

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**РОМАНОВ Алексей А.  
РОМАНОВ Александр А.**

# **ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

МОСКВА  
2019

УДК 528.88;629.785; 681.3  
ББК 30.6  
Р69

ISSN 978-5-2075-6836

Рецензенты:  
межвузовская кафедра космических исследований  
Самарского государственного аэрокосмического университета  
д-р техн. наук, профессор *А. С. Селиванов*

Р69 Романов А. А., Романов А. А. Основы космических информационных систем: учеб. пособие (научная монография).— М.: ИКИ РАН; МФТИ, 2019.— 292 с. : табл., ил., цв. ил.

ISBN 978-5-978-5-00015-034-4

Космические информационные системы связи, навигации и дистанционного зондирования Земли сегодня зачастую являются единственным источником информации о постоянно изменяющихся параметрах системы «литосфера—океан—атмосфера», используемых различными отраслями народного хозяйства. При этом существенный синергетический эффект получается за счёт комплексного использования космических технологий на основе системного анализа получаемых спутниковых данных

Данное учебное пособие написано на основе курса лекций, прочитанных профессорами кафедры «Системы, устройства и методы геокосмической физики» д-ром техн. наук Алексеем А. Романовым и д-ром техн. наук Александром А. Романовым в Московском физико-техническом институте (МФТИ) в 1998–2018 гг. в рамках курса «Основы космических информационных систем» студентам факультета аэрофизики и космических исследований, а также базовой кафедры «Радиотехнические системы» факультета радиотехники и кибернетики МФТИ. Настоящее издание представляет собой переработанное и дополненное учебное пособие «Основы космических информационных систем», изданное Алексеем А. Романовым и Александром А. Романовым в 2013 г.

Пособие содержит краткое систематическое изложение основных разделов курса. Рассматриваются вопросы системного проектирования и анализа космических систем; физические основы функционирования космических информационных систем связи, навигации и дистанционного зондирования Земли; обсуждаются автоматизированные технологии сбора, обработки и усвоения спутниковых данных в геоинформационных системах. Обсуждены телекоммуникационные технологии передачи и обмена данными между распределёнными проблемно-ориентированными базами данных, а также их практическое применение на примерах систем мониторинга различного целевого назначения.

Излагаются современные методы сбора и обработки геокодированных данных, получаемых в ходе подспутниковых верификационных экспериментов. Широко представлена космическая информация, доступная для пользователей в международных центрах по интернету.

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, аспирантов и научных работников, специализирующихся в прикладных задачах дистанционного аэрокосмического зондирования.

Первое издание в 2013 г. было рекомендовано учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению прикладные математика и физика, а также для межвузовского использования.

*Ключевые слова:* результаты эксперимента «Норвежское море—97», промысловая океанография, гидрокосмические информационные системы, дистанционное зондирование, основные принципы системного инжиниринга, ГИС, основы физики приборов ДЗ

Серия «Механика, управление и информатика»



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Перечень сокращений .....	7
Введение .....	13
<b>Глава 1. Основы системной разработки космических информационных систем .....</b>	<b>18</b>
1.1. Термины и определения системного инжиниринга .....	18
1.2. Инженерная системная разработка .....	20
1.3. Системный анализ и новые механизмы проектирования космических миссий .....	22
1.4. Современные тенденции в обучении системному инжинирингу .....	25
<b>Глава 2. Географические информационные системы .....</b>	<b>29</b>
2.1. Пространственные информационные системы. Организация пространственных данных .....	30
2.2. ГИС как инструментальное средство .....	41
2.3. Растровое и векторное представление данных. Типы пространственно распределённых данных .....	45
2.4. Спутниковая координатная система. Типы орбит космических аппаратов .....	48
2.5. Картографические проекции и их основные характеристики. Картографические проекции .....	51
2.6. Введение в неогеографию .....	61
<b>Глава 3. Спутниковые системы связи .....</b>	<b>65</b>
3.1. Основные физические принципы и понятия спутниковой связи .....	66
3.2. Системы связи на основе геостационарных искусственных спутников Земли .....	70
3.3. Системы связи на высоких эллиптических орбитах .....	72
3.4. Системы связи на основе низкоорбитальных спутников .....	72
3.5. Системы связи на базе среднеорбитальных космических аппаратов ..	75
<b>Глава 4. Спутниковые навигационные системы .....</b>	<b>77</b>
4.1. Измерение координат наземных пунктов .....	77
4.2. Методы измерения навигационных параметров .....	77
4.3. Американская спутниковая навигационная система NAVSTAR .....	82
4.4. Российская спутниковая навигационная система ГЛОНАСС .....	85
4.5. Спутниковая навигационная система «Галилео» Европейского союза .....	87
4.6. Спутниковая система BEIDOU .....	88
4.7. Региональная навигационная система QZSS .....	89
4.8. Дифференциальные навигационные системы .....	91
<b>Глава 5. Современные технологии дистанционного определения параметров поверхности океана и атмосферы .....</b>	<b>94</b>
5.1. Основные понятия дистанционного зондирования Земли .....	94
5.2. Задачи дистанционного зондирования водной среды и приборный ряд .....	96
5.3. Определение температуры поверхности океана по данным инфракрасных и микроволновых измерений .....	99

5.4. Определение первичной биопродуктивности морской воды по данным спектрометрических оптических измерений . . . . .	112
5.5. Определение динамической топографии морской поверхности по данным спутниковых альтиметров . . . . .	120
5.6. Определение мезомасштабных вихрей, фронтальных зон, зон конвергенции и спектральных характеристик морского волнения по данным РСА и РЛС БО . . . . .	135
5.7. Определение солёности морских вод . . . . .	149
5.8. Спутниковые измерения электрофизических параметров ионосферы . . . . .	155
<b>Глава 6. Принципы верификации данных дистанционного зондирования. Подспутниковые эксперименты . . . . .</b>	<b>170</b>
6.1. Верификация данных дистанционного зондирования океана . . . . .	170
6.2. Комплексный научно-производственный эксперимент в Норвежском море . . . . .	178
6.3. Верификация реконструкций вертикального распределения электронной концентрации. . . . .	196
6.4. Проект PRE-Earthquake . . . . .	202
<b>Глава 7. Основы компьютерной обработки изображений ДЗ. . . . .</b>	<b>208</b>
7.1. Характеристики изображений дистанционного зондирования Земли . . . . .	208
7.2. Обработка и анализ изображений дистанционного зондирования . . . . .	218
7.3. Общая и тематическая обработка спутниковых данных. . . . .	234
<b>Глава 8. Малоразмерные космические аппараты — прорывная технология, меняющая мировую экономику космической деятельности. . . . .</b>	<b>240</b>
8.1. Малоразмерные космические аппараты . . . . .	242
8.2. Информационный сетевой обмен в космосе — виртуальный космический аппарат . . . . .	247
8.3. Стандартизация разработки малых спутников. . . . .	249
8.4. Технологическая готовность служебной и целевой аппаратуры МКА . . . . .	253
<b>Глава 9. Современное состояние и перспективы развития индустрии космических информационных систем. . . . .</b>	<b>258</b>
9.1. Современное состояние индустрии космических информационных систем . . . . .	258
9.2. Переход от валовой обработки сырых данных к предоставлению информационных услуг . . . . .	260
9.3. Система e-CORSE — новый подход к обработке данных ДЗ. . . . .	266
9.4. Основные критерии успеха информационных систем . . . . .	267
<b>Глава 10. Практическое использование данных космического Дистанционного зондирования в интересах народного хозяйства . . . . .</b>	<b>269</b>
10.1. Отраслевая система мониторинга Госкомрыболовства России . . . . .	269
10.2. Перспективная многоцелевая космическая система «Арктика». . . . .	273
10.3. Система слежения за подвижными объектами на основе спутниковой автоматической идентификационной системы . . . . .	276
10.4. Автоматизированная система спутникового мониторинга электрофизических характеристик ионосферы . . . . .	281
Литература . . . . .	284

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Уважаемый читатель!

Перед Вами второе издание учебного пособия Алексея А. Романова и Александра А. Романова «Основы космических информационных систем». За более чем 7 лет после выхода в свет в 2012 г. первого издания произошли кардинальные изменения, в первую очередь, в методике преподавания данной дисциплины в ряде ведущих вузов Российской Федерации и зарубежных университетов. В основном это коснулось вопросов использования космических наблюдений для решения различных прикладных задач. За прошедшие годы значительное внимание стало уделяться не только изучению общетеоретических и методических вопросов, связанных с восстановлением различных физико-химических характеристик системы «литосфера – атмосфера – ионосфера», но и вопросам проектирования и создания комплексных систем дистанционного мониторинга для решения конкретных научных и прикладных задач. С учётом развития направления было переработано и расширено данное учебное пособие. В том числе:

- были переработаны и дополнены актуальными результатами части пособия, посвящённые обсуждению различных экспериментов, проводимых с использованием результатов дистанционного зондирования поверхности океана и толщи атмосферы. В том числе, введён раздел, посвящённый представлению описанию комплексного эксперимента, проведённого в Норвежском море в интересах решения проблем промысла морских гидробионтов. Этот эксперимент, который сегодня стал уже классическим, позволяет понять логику проведения и организации анализа данных подобных крупномасштабных исследований;
- добавлен раздел, основанный на опыте зарубежных университетов Европы, ориентированный на самостоятельное проектирование студентами спутников типа CubeSat;
- в учебное пособие были добавлены и другие новые материалы и ссылки, которые позволят читателям получить актуальную об обсуждаемой проблеме.

При подготовке издания особое внимание уделялось обсуждению вопроса использования современных методов и средств системного инжиниринга космических информационных систем. В том числе, управлению полным жизненным циклом таких комплексных систем, которые позволяют перейти от предоставления конечному потребителю не только низкого уровня обработки данных, к представлению возможностей работы с различными информационными продуктами и, в конечном итоге, к сервисам, обеспечивающим возможность работы с инструментами распределённой обработки и анализа данных дистанционных наблюдений.

Авторы выражают глубокую признательность всем коллегам, сотрудничеству с которыми сделало возможным получение многих интересных результатов. Приносят искреннюю благодарность Комаровой Наталии Юрьевне — за внимательное и вдумчивое техническое редактирование и подготовку макета учебного пособия, Лупяну Евгению Аркадьевичу — за обсуждение результатов и позитивную критику нашей работы, а также нашей семье — которая поддерживает нас и служит нашим вдохновением.

Заместитель директора ИКИ РАН по вопросам обеспечения  
проектов дистанционного мониторинга Земли,  
доктор технических наук  
*Евгений Аркадьевич Лупян*

Заместитель генерального директора  
АО «Российские космические системы»,  
доктор технических наук, профессор МФТИ  
*Алексей Александрович Романов*

Заместитель генерального директора АО «ЦНИИмаш».  
доктор технических наук  
*Александр Алексеевич Романов*

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- АЗН-В — автоматическое зависимое наблюдение режим вещательный (automatic dependent surveillance-broadcast —ADS-B)
- АИС — автоматическая идентификационная система
- АПК — анализ принципиальных компонент
- АРУ — автоматическая регулировка усиления
- АЧТ — абсолютно чёрное тело
- БД — база данных
- БРЛ — ближняя радиолокация
- БСУ — бортовое синхронизирующее устройство
- ВВ — внутренние волны
- ВВС — военно-воздушные силы
- ВКС — верхний квазиоднородный слой
- ВНИРО — Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
- ГИС — геоинформационная система (географическая информационная система) (см. GIS)
- ГК — гравитационно-капиллярные
- ГНСС, ГЛОНАСС — глобальная навигационная спутниковая система (см. GNSS)
- ДВИК — длинноволновый инфракрасный диапазон (см. LWIR)
- ДДЗ — данные дистанционного зондирования
- ДЗ — дистанционное зондирование
- ДЗЗ — дистанционное зондирование Земли
- ЕКА — Европейское космическое агентство (см. ESA)
- ЕМ — электромагнитное
- ЕЭС — Европейское экономическое сообщество
- ЗС — земная станция
- ЗУ — запоминающее устройство
- ИК — ближний инфракрасный диапазон (см. NIR)
- ИК-В — коротковолновый инфракрасный диапазон (см. SWIR)
- ИК-С — средневолновый инфракрасный диапазон (см. MWIR)
- ИКЕС — Конвенция о международном совете по исследованию моря (см. ICES)
- ИКТ — информационно-коммуникационных технологий
- ИМ — индекс модуляции
- ИПС — информационно-поисковая система
- ИСЗ — искусственный спутник Земли
- ИЭЗ — исключительная экономическая зона
- КА — космический аппарат
- КПД — коэффициент полезного действия
- КС — космическая станция
- ЛГГ — лебёдка грузовая гидравлическая
- ЛЭРОК — лебёдка электрическая океанографическая
- МАА — Международная академия астронавтики (см. IAA)
- МАМС — Международная ассоциация маячных служб (см. IALA)
- МВД России — Министерство внутренних дел Российской Федерации
- Минтранс России — Министерство транспорта Российской Федерации

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- МКА — малый космический аппарат  
МКСР — Многофункциональная космическая система ретрансляции  
МПС России — Министерство путей сообщения Российской Федерации  
МС — морское судно  
МСУ-МР — многоканальное сканирующее устройство метеорологического назначения  
МЧС России — Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий  
НАП — навигационная аппаратура потребителя  
НАСА — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США (см. NASA)  
НАФО — Конвенция о международном сотрудничестве в области рыболовства в Северо-западной части Атлантического океана (см. NAFO)  
НЕАФК — Международная конвенция о рыболовстве в северо-восточной части Атлантического океана (см. NEAFC)  
НИР — научно-исследовательская работа  
НИС — научно-исследовательское судно  
НКПОР — наземный комплекс приёма, обработки и распространения информации  
НКУ — наземный комплекс управления  
ННКА — низкоорбитальный навигационный космический аппарат  
НССС — низкоорбитальная система спутниковой связи  
НЦМС — Национальный центр мониторинга и связи  
НЭЗ — Норвежская экономическая зона  
ОВЧ — очень высокая частота (см. VHF)  
ОДУ — общий допустимый улов  
ОКР — опытно-конструкторская работа  
ОНЧ — очень-низкочастотное излучение  
ОСМ — Отраслевая система мониторинга  
ПАВ — поверхностно-активное вещество  
ПК — персональный компьютер (см. PC)  
ПО — программное обеспечение  
ПРБ — персональный радиобуй  
ПТС — платиновое сопротивление (платиновый резистор)  
ПЭВМ — персональная электронная вычислительная машина  
ПЭС — полное электронное содержание  
РА — радарный альтиметр  
РЛ — радиолокационный  
РЛИ — радиолокационные изображения  
РЛС БО — радиолокационная система бокового обзора  
РЛС — радиолокационная станция  
РН — ракетonosитель  
РОВ — растворённое органическое вещество  
Росрыболовство — Федеральное агентство по рыболовству  
РСА — радар с синтезированной апертурой (см. SAR)  
САРП — средство автоматической радиолокационной прокладки  
СВЧ — сверхвысокая частота  
СДКМ — Российская широкозонная система дифференциальной коррекции и мониторинга радионавигационных полей  
СКО — среднеквадратичное отклонение  
СЛУ — система линейных уравнений  
СНГ — Содружество Независимых Государств  
СНО — средство навигационного оборудования  
СОЛАС — Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (см. SOLAS)  
СПО — солёность поверхности океана  
СПОИ — станция приёма и обработки информации

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- ССС — система спутниковой связи
- СТД — солёность, температура, давление (см. CTD)
- СУБД — система управления базами данных
- СУДС — система управления движением судов
- ТВД — театр военных действий
- ТНА — телевизионная наземная антенна
- ТНС — технологический наноспутник
- ТПО — температура поверхности океана
- УКВ — ультракороткие волны (см. USW)
- УНЧ — ультра-низкочастотное излучение
- ФАР — фазированная антенная решётка
- ФПК — Федеральная космическая программа России
- ФСБ РФ — Федеральная служба безопасности
- ЭВМ — электронно-вычислительная машина
  
- AATSR — Advanced Along Track Scanning Radiometer
- AATSR — Advanced Along-Track Scanning Radiometer
- ADSC — Attitude Determination and Control System
- AIAA — American Institute of Aeronautics and Astronautics
- AMSR — Advanced Microwave Scanning Radiometer
- AMSU — Advanced Microwave Sounding Unit
- ART — Algebraic Reconstruction Technique (алгоритм алгебраической реконструкции с релаксацией)
- ASCAT — Advanced Scatterometer
- ATMS — Advanced Technology Microwave Sounder
- ATRR — Ambient Test Readiness Review
- AVHRR — Advanced Very High Resolution Radiometer
- C&DH — Command and Data Handling
- CD — Committee draft
- CDMA — Code-Division Multiple Access
- CDR — Critical Design Review
- CeBIT — Centrum der Büro- und Informationstechnik (Центр офисных и информационных технологий)
- CERTO — Coherent Electromagnetic Radio Tomography
- CHAMP — Challenging Mini-Satellite Payload
- COSMIC — Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate
- COTS — Commercial Off-The-Shelf
- CSIRO — Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
- CTD — Conductivity-Temperature-Depth
- CZCS — Coastal Zone Color Scanner
- DAAC — Distributed Active Archive Center
- DARPA — Defense Advanced Research Projects Agency
- DDA — Delay Doppler Access
- DGPS — differential global positioning system (система дифференциальной коррекции глобальных навигационных спутниковых систем)
- DIS — Draft International Standard
- DMC — Disaster Monitoring Constellation
- DMSP — Defense Meteorological Satellite Program
- DN — Digital Number
- DNSS — Defense Navigation Satellite System
- DORIS — Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite (французская гражданская система точного (сантиметрового) определения орбиты и позиционирования)
- EADS — European Aeronautic Defence and Space Company (Европейский аэрокосмический и оборонный концерн)
- EARSC — European Association of Remote Sensing Companies
- EBITDA — Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- ECMRWF — European Center of Medium Range Weather Forecasting
- e-CORCE — electronic-Continuous Observing system Relayed by Cellular processing Environment
- EGNOS — European Geostationary Navigation Overlay Service (европейская геостационарная служба навигационного покрытия)
- EOS — Earth Observing System (система наблюдения за Землёй)
- EOSDIS — Earth Observing System Data and Information System
- EQuOS — Earthquakes Observation System
- ERS — European Remote Sensing Satellite
- ESA — European Space Agency
- ESE — Earth Science Enterprise (инициатива НАСА в науках о Земле)
- ESRI — Environmental Systems Research Institute
- ESS — Earth system science (наука о Земных системах)
- ETRR — Environmental Test Readiness Review
- EUMETSAT — European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
  - F6 — Future, Fast, Flexible, Fractionated, Free- Flying Spacecraft united by Information eXchange (System F6)
- FAR — Flight Acceptance Review
- FDMA — Frequency Division Multiple Access
- FIPS — Federal Information Processing Standard (Федеральные стандарты обработки информации)
- FIR — Far-infrared
- FNOC — Fleet Numerical Oceanographic Center
- FR — Final Review
- FYS — “Fly Your Satellite” («Запусти свой спутник»)
- GAGAN — GPS Aided Geo Augmented Navigation
- GDR — Geophysical Data Records
- GEBCO — General Bathymetric Chart of the Ocean
- GEOS-3 — Geodynamics and Earth Ocean Satellite
- GOSS — Global Earth Observation Satellite System of Systems
  - GIBS — Global Imagery Browse Services
  - GIS — geographical information system
- GNSS — Global Navigation Satellite System
- GOCE — Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
- GPS — Global Positioning System
- GRD — Ground Resolvable Distance
- GSD — Ground Sampling Distance
- GSM — Global System for Mobile Communications
- HRPT — High-resolution picture transmission
- HRV — High Resolution Visible
- IAA — International Academy of Astronautics
- IALA — International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
- IARU — International Amateur Radio Union
- IBM — International Business Machines
- ICES — International Council for the Exploration of the Sea
- IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers
- IOC — Initial Operation Capability
  - IoS — Internet of Space (космический интернет)
  - IoT — Internet of Things (интернет вещей)
  - IP — Internet Protocol
- IRI — International Reference Ionosphere
- IRR — Infrared Radiometer
- ISIS — Innovative Solutions In Space
- ISO — International Organization for Standardization
- ITU — International Telecommunication Union
- JAXA — Japan Aerospace Exploration Agency (Японское агентство аэрокосмических исследований)



## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- JERS — Japan Earth Resources Satellite
- JPSS — Joint Polar Satellite System
- LADEE — Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer
- LAIC — Lithosphere Atmosphere Ionosphere Coupling
- LOWTRAN — Low resolution atmospheric transmittance
  - LRA — Laser Reflector Array
  - LRM — Low Resolution Mode
  - LUT — Look Up Table
  - LWIR — Long-wavelength Infrared
- MART — Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique
- MBSE — Model Based System Engineering
- MEMS — Micro-electro-mechanical Systems
- MERIS — Medium Resolution Imaging Spectrometer
- MIRAS — Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis
- MMSI — Maritime Mobile Service Identifier
- MODIS — Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- MODTRAN — Moderate resolution atmospheric transmittance
- MSAS — Multi-functional Satellite Augmentation System  
(многофункциональная система дифференциальной коррекции спутникового базирования)
- MTF — Modulation Transfer Function
- MWIR — Mid-wavelength Infrared
- MWR — Microwave Sounder
- NAFO — Northwest Atlantic Fisheries Organization
- NASA — National Aeronautics and Space Administration
- NAVSTAR GPS — Navigation Satellites providing Time and Range; Global Positioning System
- NEAFC — North-East Atlantic Fisheries Commission
- NEAFC — North-East Atlantic Fisheries Commission
- NEAT — Noise Equivalent Change in Temperature
- NIIRS — National Imagery Interpretability Rating Scale
  - NIR — Near-infrared
- NISAR — NASA Indian SAR
- NOAA — National Oceanic and Atmospheric Administration
- NORAD — North American Aerospace Defense Command
- OHB AG — Orbitale Hochtechnologie Bremen – Orbital High-technology Bremen
  - OLCI — Ocean and Land Color Instrument
  - ORS — Operative Response Space
- OSCAR — Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio
- PEG — Pre-Earthquakes Geoportal
  - pH — pondus Hydrogenii (водородный показатель)
  - PPS — Precise Positioning Service
- PRE-Earthquakes — Processing Russian and European Earth Observations for Earthquake Precursors Studies
- QZSS — Quasi-Zenith Satellite System
- RCM — Radarsat Constellation Mission
- RGB — Red, Green, Blue (красный, зелёный, синий)
- RID — Review Item Discrepancy
- RINEX — Receiver Independent Exchange Format
- RTG — Radioisotope Thermal Generator
  - SA — Selective Access
- SAR — Synthetic Aperture Radars
- SARM — Synthetic Aperture Resolution Mode
- SDR — Software Defined Radio
- SeaWiFS — Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
- SGP4 — Simplified General Perturbations
- SIRAL — SAR/Interferometric Radar Altimeter
- SLSTR — Sea and Land Surface Temperature Radiometer

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- SMAP — Soil Moisture Active Passive
- SMDC-ONE — Space and Missile Defense Command – Operational Nanosatellite Effect)
- SMOS — Soil Moisture Ocean Salinity
- SNR — Signal-To-Noise
- SOLAS — International Convention for the Safety of Life at Sea
- SOTDMA — Self-Organized Time Division Multiple Access
- SPOT — Systeme Probatoire d’Observation de la Terre
- SPS — Standard Positioning Service
- SRAL — Synthetic Aperture Radar Altimeter
- SSIWG — Salinity of Sea Ice Working Group
- SSM/I — Special Sensor Microwave/Imager
- SSTL — Surrey Satellite Technology
- SVD — Singular Value Decomposition
- SWH — Significant Wave Height
- SWIR — Short Wavelength Infrared
- SWOT — Surface Water and Ocean Topography
- System F6 — Future, Fast, Flexible, Fractionated, Free- Flying Spacecraft united by Information eXchange
- TDMA — Time-Division Multiple Access
- TEC — Total Electron Content
- TECU — Total Electron Content Unit (единица измерения ПЭС)
- TMR — Topex Microwave Radiometer
- TRL — Technology Readiness Levels
- UHF — Ultra High Frequency
- USAT — Ultra Small Aperture Terminal
- USW — Ultra Short Waves
- UTC — Coordinated Universal Time (всемирное координированное время)
- UTM — Universal Transverse Mercator
- VDL — Very High Frequency Digital Link
- VHF — Very High Frequency
- VIIRS — Visible/Infrared Imager Radiometer Suite
- VSAT — Very Small Aperture Terminal
- WAAS — wide area augmentation system (система распространения поправок к данным, передаваемым навигационной системой GPS)
- WAG — Wide Area Grid
- WD — Working Draft
- WOCE — World Ocean Circulation Experiment
- PC — personal computer

## ВВЕДЕНИЕ

Космические технологии позволяют получать высококачественную оперативную информацию о комплексе физических, химических и биологических параметров системы «литосфера – океан – атмосфера». При этом собственно космические технологии включают в себя процедуры сбора данных, их координатную привязку и передачу по спутниковым каналам связи на наземные центры приёма и распространения. Достаточно условно космические информационные системы можно разделить на спутниковые системы мониторинга, связи, навигации, калибровки и юстировки, а также научно-исследовательские. В свою очередь, космические системы мониторинга представлены спутниковыми системами дистанционного зондирования Земли, космическими системами контроля космического пространства, а также геодезическими и метеорологическими космическими системами.

В настоящее время наиболее известными являются космические системы дистанционного зондирования Земли: фотографические, оптико-электронные, радиолокационные и СВЧ-зондирования (сверхвысокочастотного) гидроресурсов и атмосферы. Указанные космические системы предназначены для получения из космоса пространственно привязанных данных о состоянии объектов и явлениях в системе «литосфера – океан – атмосфера».

Предлагаемый материал представляет собой обзорный курс лекций, обеспечивающий студентам соответствующих специальностей введение в специальность 010900 «Космические информационные системы: связь, навигация, дистанционное зондирование Земли». В последнее время рядом вузов разработаны и введены в несколько других государственных образовательных стандартов, обеспечивающих подготовку специалистов в направлениях использования результатов космической деятельности: 120100 «Геодезия и дистанционное зондирование»; 161702 «Навигационно-баллистическое обеспечение применения космической техники». Однако, по нашему мнению, предлагаемый подход предусматривает реальную системную многоаспектную интеграцию набора дисциплин начиная от основ системного проектирования космических информационных систем до используемых методов, устройств и технических средств обеспечивающих применение космических технологий в реальных народнохозяйственных приложениях.

А. М. Берлянт, известным учёным-картографом, профессором МГУ имени М. В. Ломоносова, был предложен проект нового научного направления — *геоиконики* как отрасли знания, изучающей общие свойства всех геоизображений: карт, электронных карт, аэро- и космических снимков, стереоизображений и компьютерной анимации, трёхмерных моделей и др. Данная дисциплина формируется на стыке взаимодействия картографии, аэрокосмического дистанционного зондирования и компьютерных технологий [1].

Сегодня можно констатировать, что геоиконика стала новым научным направлением, интегрирующим в себе все последние достижения современных

космических информационных систем. Усилия картографов почти всецело направлены на тематическое картографирование. Специалисты по аэрокосмическому зондированию сосредоточили усилия на проблемах сбора космической информации, разработке алгоритмов обработки и интерпретации космических снимков, а геоинформатики озабочены, в основном проблемами ввода-вывода, а также, безусловно, актуальными технологическими и техническими проблемами.

Основной информационный продукт геоинформационных технологий — это всё-таки тематически обработанная карта, где с учётом всей полноты априорной информации об исследуемом объекте или явлении, сосредоточены результаты комплексной обработки интегрированной совокупности данных. Следовательно, можно согласиться с Берлянтом — нельзя допустить расплывания разных составных частей единого целого — понимания сущности геоизображений, их свойств и возможностей.

Однако динамика экономического освоения и развития регионов приводит к тому, что картографическая основа очень быстро устаревает, а существующие возможности обновления карт недостаточно оперативны. Выходом из такого положения является применение методов *неогеографии* — использования в качестве картографической основы снимков земной поверхности высокого и сверхвысокого пространственного разрешения.

Очевидно, что новое направление должно с позиций системного анализа охватывать все составные части геоинформатики. При этом представляется, что в основу всего направления должна быть положена сквозная информационная технология от физической (в широком смысле слова) постановки задачи до конкретной алгоритмической, технической, организационной, аппаратно-программной реализации, позволяющая получить информационный продукт требуемого потребителю качества.

С изложенных позиций хотелось бы, чтобы в результате знакомства с данным курсом у слушателей возникло законченное представление о новых космических информационных технологиях, инфраструктуре космических систем и конкретном применении полученных знаний в практической деятельности при реализации научных и технических проектов, в разработке которых студентам придётся участвовать в процессе обучения на базовых кафедрах, и в последующей самостоятельной научной и производственной деятельности. При этом основной акцент делается на использование современных и перспективных средств космического базирования.

Достижения научно-технического прогресса, в первую очередь, современной электроники и математики, компьютерных технологий, которые сегодня многократно увеличили наши возможности по сбору информации, позволили создать адекватные возрастающим потребностям средства для её хранения, поиска, переработки, распространения и анализа. Прежде всего это относится к направлению создания малоразмерных космических аппаратов микро и нано классов, позволяющих существенно снизить стоимость создания, а также время, затрачиваемое на разработку при сохранении всех функциональных возможностей космических информационных систем.

Вся совокупность этих средств и методов обращения с информацией, с акцентом на те из них, которые имеют универсальный характер, а не определяются спецификой конкретной предметной области, называется *информационными технологиями* и является предметом рассмотрения *информатики* (общая информатика) [2].

Программные и технические средства, реализующие информационные технологии на практике, очень многообразны. Те из них, которые предназначены для обеспечения доступа к информационным ресурсам — ввода информации, хранения, её модификации, осуществления поиска необходимой ин-

формации, и её представления в нужном виде, называются *информационными системами* (информационно-поисковыми системами, ИПС). Понятие «информационная система» необязательно относится только к сфере компьютерных технологий. Существуют и аналоговые, некомпьютерные информационные системы, манипулирующие информацией в аналоговой, а не в цифровой форме. Например, библиотека — организованное хранилище книг, снабжённое системой каталогов, инструкций и правил пользования, реализующее некоторые процедуры контроля состояния (инвентаризацию и реставрацию фонда) и обновления (пополнение фонда) — тоже информационная система.

Однако сегодняшние информационные системы, как правило, являются цифровыми, т. е. основанными на использовании компьютерной техники, и информация в них находится в цифровом виде. Хотя внутреннее представление для такой системы информации цифровое, в машиночитаемой форме, непригодной для прямого восприятия человеком, рядовой пользователь системы может никогда на практике не иметь дела с этим внутренним представлением и всё время воспринимать информацию в удобной для него форме, используя мощные современные средства визуализации, в том числе, компьютерной графики. Современные информационные системы, как правило, создаются с использованием специального программного обеспечения, называемого *системами управления базами данных* (СУБД), а сами упорядоченные массивы данных, организованные с помощью СУБД, называются *базами данных*. Существуют специализированные пространственные информационные системы для работы с информацией об объектах и явлениях, которые имеют привязку к определённой позиции в пространстве, с информацией о тех объектах и явлениях, для которых важную роль играет их положение, форма, размеры, взаиморасположение по отношению к другим объектам и явлениям.

Термин «пространственный» имеет в данном контексте достаточно общий смысл. «Пространственные» объекты могут быть расположены в каком-то месте на земной поверхности, под ней или над ней, быть плоскими или объёмными, могут вообще не иметь никакой привязки именно к поверхности Земли с определёнными для неё координатными системами. Важно, что объекты привязаны к некоторой координатной системе, возможно, местной и условной, и этот факт признаётся существенным и используется системой при организации данных и их использовании. При этом основу координатной привязки геопространственных данных составляют данные, получаемые с помощью глобальных спутниковых навигационных систем: российской — ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система) и американской NAVSTAR (Navigation Satellites providing Time and Range).

В данном учебном курсе мы будем иметь дело с геоинформационными технологиями — вопросами практического применения геоинформатики для решения научных и практических задач. При этом в качестве альтернативы централизованным технологиям сбора и обработки космической информации будут рассмотрены и географически распределённые информационные веб-технологии.

Для перехода к дальнейшему важно разобраться в вопросе о том, что такое и как соотносятся друг с другом такие понятия как информация, данные и знания.

*Информация* — это те данные, которые мы можем полезно использовать — например, увеличить наше знание о каком-либо явлении или предмете реального мира. Если мы имеем в нашей базе данных множество каких-то чисел и не вооружены абсолютно никаким, даже приблизительным знанием, что это за числа, к чему относятся, какие величины представляют и для чего предназначены, то эти числа не являются для нас полезной информацией, как-то уменьшающей неопределённость нашего представления об окружающей действительности.

Тем не менее, эти непонятные цифры, хранимые в базе данных, тоже являются данными. Но информация извлекается из них только с приложением нашего мышления или интуиции, базирующихся на некоторых *знаниях* о предмете.

Имеется несколько определений информации:

1. От латинского (*informatio* — разъяснение, изложение), первоначально — сведения, передаваемые людьми устным, письменным или другим способом (с помощью условных сигналов, технических средств и т. д.; с середины XX века — общенаучное понятие, включающее обмен сведениями между людьми, человеком и автоматом, автоматом и автоматом; обмен сигналами в животном и растительном мире; передачу признаков от клетки к клетке, от организма к организму, одно из основных понятий *кибернетики* [3].
2. Information is a total number of messages contained by a sequence of data, или «информация» — это общее число сообщений, содержащееся в последовательности данных (по Найквисту).
3. Сведения о лицах, предметах, фактах, событиях, явлениях и процессах, независимо от формы их представления [4].

Термин «*геоинформатика*» состоит из трёх корней: география, информатика и автоматика. В англоязычной литературе есть термины *Informatics* и *Computer Science*. Собственно термин *геоинформатика* в английской терминологии до недавнего времени не использовался, хотя термин ГИС — географическая информационная система (*geographical information system, GIS*) [1] существует достаточно давно.

Первая попытка дать определение *геоинформатике* принадлежит С. Н. Сербенюку [5]:

*Геоинформатика* — понятие, обозначающее автоматическую переработку пространственно-временной информации о геосистемах различного иерархического уровня и территориального охвата». Поскольку данное определение связывает *геоинформатику* с изучением геосистем, это создаёт предпосылку для рассмотрения её в составе наук о Земле.

Интеграция наук в современной картографии и смежных дисциплинах ведёт к попыткам создания новых синтетических научных направлений. Одно из них — *геоматика*. Опять три корня: геонауки, математика и информатика. Близость определений *геоматики* и *геоинформатики* позволила различным авторам просто поставить между ними знак равенства. При этом отмечается, что в состав *геоматики* входят такие дисциплины как: математика, физика, информатика, картография, геодезия, фотограмметрия и дистанционное зондирование.

Авторам более всего нравится определение *геоматики* как науки и технологии, изучающей характер и структуру пространственной информации, методы её сбора, организации, классифицирования, оценки, анализа, управления, отображения и распространения, а также инфраструктуру, необходимую для оптимального использования этой информации.

Это определение хорошо выражает интегрирующую роль геоинформационных технологий, обеспечивающих естественное взаимодействие картографии, дистанционного зондирования и компьютерных технологий. Это представляется наиболее важным аспектом, определяющим необходимость постановки подобного курса, так как сегодня сильно проявляются тенденции взаимного удаления отдельных областей знания.

По мере того, как учёные, представляющие перечисленные узкие направления, всё дальше углубляются в свои, очень важные сами по себе, проблемы, всё сильнее дифференцируются и всё дальше расходятся в своих интересах картография, ДЗ (дистанционное зондирование) и компьютерная графика.

Выходом из подобного положения может быть быстрое развитие новых научных направлений геоинформационного плана, что будет весьма полезным для картографии, ДЗ, ГИС, телекоммуникационных сетей и, в не меньшей степени, в целом для наук о Земле. Это особенно актуально сегодня, поскольку стратегические планы развития космической индустрии таких стран, как США, Франции, а также Европейского космического агентства (ЕКА) имеют чётко выраженную ориентацию на внедрение спутниковых технологий в получение новых данных о Земле через создание специализированных целевых программ. Япония пошла ещё дальше, сосредоточив космические, связные и информационные технологии в одном и том же промышленном секторе, что создаёт им конкурентные преимущества в поиске новых применений.

Таким образом, главной целью курса является *попытка* дать студентам аэрокосмических специальностей *видение* системных перспектив при разработке их собственных проектов вместо того, чтобы сделать каждого прослушавшего курс системным инженером.

Практически в соответствии с этим подходом и построен наш курс. Он структурирован по модульному принципу, так что названия различных модулей могут быть встроены в любые другие существующие курсы. Модули внутри учебного плана могут меняться местами в соответствии с предпочтениями преподавателя. Модули могут добавляться и убираться в соответствии с основным интересом изучаемого раздела.



# ГЛАВА 1

## ОСНОВЫ СИСТЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Подготовка специалистов инженерных профессий вообще и для аэрокосмической промышленности в частности в наше время становится важной государственной задачей. Ведущие зарубежные университеты как Америки, так и Европы на протяжении ряда последних лет уже обеспечивают подготовку по специальностям системного инжиниринга, в том числе и для аэрокосмических отраслей промышленности в рамках магистерской программы «космический системный инжиниринг».

Целью данной главы является знакомство с основными положениями системной разработки космических информационных систем, терминами и определениями дисциплины системного инжиниринга в контексте разработки космических проектов. Обосновывается необходимость применения современных подходов системной разработки, а также продемонстрируются последствия плохого системного проектирования.

### 1.1

#### ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМНОГО ИНЖИНИРИНГА

*Инжиниринг* — творческое применение научных методов и принципов к проектированию и разработке зданий (сооружений), машин, аппаратов, производственных процессов и методов их использования отдельно или в комбинации; к строительству и эксплуатации, прогнозам поведения всего этого в специфических условиях эксплуатации» [6]. Соответственно, *системный инжиниринг* представляет собой единый подход к проектированию, созданию и функционированию системы. В России в последние годы системный инжиниринг часто отождествляется с системной разработкой и созданием изделий различного назначения. Данный термин уже имеет достаточно широкое хождение в научной и профессиональной среде.

Поэтому далее авторы используют понятие *системная разработка*, представляющее собой единый подход к проектированию, созданию и функционированию космической информационной системы, состоящий:

- из идентификации и структурирования системных целей;
- создания альтернативных концепций проекта системы;
- спецификации работ по проектированию;
- выбора и реализации наилучшего проекта;
- верификации того, что проект правильно структурирован и интегрирован;
- оценки соответствия проекта заданным целям системы.

*Функция системного инжиниринга* заключается в руководстве конструированием сложных систем. Данный подход — итеративный, с нарастанием



по мере укрупнения уровней системы, содержащих требования, детали проектирования, планы верификации, а также оценки стоимости и характеристик создаваемой системы. Следует отметить основные ограничения, возникающие при разработке сложной системы. Как правило, системы, создаваемые из частей, построенных различными группами разработчиков, независимо друг от друга, без должной координации не обеспечивают требуемых системных функций. Наиболее часто рассогласование возникает на механических соединениях и электрических интерфейсах. Это во многом обусловлено тем, что руководящие разработкой менеджеры и главные конструкторы стараются уделять внимание только тем вопросам, в которых они сами наиболее компетентны. В результате это приводит к тому, что спроектированные системы не решают поставленных задач, цена разработки растёт, а графики создания постоянно срываются.

Таким образом, становится очевидным, что для больших и сложных проектов всегда существует потенциальная вероятность неудачи, поскольку при их разработке необходимо, чтобы многие подсистемы проектировались параллельно и независимо. Без ясного понимания, что должно быть реализовано в каждой подсистеме, команда разработчиков рискует выполнить несостоятельное проектирование и конфликтующие интерфейсы или неоправданно дублировать усилия.

Именно поэтому тренды в разработке и проектировании новых космических систем требуют больше системных инженеров, задействованных в разработке.

Команды разработчиков больших космических проектов постоянно борются за обеспечение стоимостных и технических параметров и свойств систем, а также за своевременное выполнение графиков их создания. При этом условия, в которых сегодня развиваются аэрокосмические отрасли во всём мире, имеют очень похожие внешние ограничения: демографические проблемы — старение работников и проблемы поддержания необходимой квалификации специалистов, участвующих в разработках. Причём новые космические системы масштабнее и сложнее, поэтому требуют больше новых системных инженеров.

Многие факторы, выявленные различными мировыми космическими агентствами при анализе неудач выполнения собственных космических программ и значительного превышения цен, обусловлены недостатками в *системном проектировании*, а именно:

- неадекватным формулированием требований;
- неразвитыми процессами системного проектирования;
- неадекватным анализом существующего опыта проектирования на ранних стадиях;
- неадекватной оценкой и управлением рисками на системном уровне [7].

Можно сказать, что системный инжиниринг — это относительно новая для России быстро развивающаяся техническая дисциплина, фундамент которой составляют проекты, успешно реализованные в прошлом. Положительный опыт удачно выполненных миссий собран в методиках и руководствах (например, в работе [8]) и поскольку неисправности и ошибки каждой миссии уникальны, их идентичность сохраняется и в новых разработках.

Фундаментальный термин системного проектирования — это *редукционизм*, позволяющий разложить сложные проблемы на более простые. Древний принцип — разделяй и властвуй — определяет стратегию успеха реализации проекта. Это означает, что системное проектирование разделяет сложные проекты, направленные на разработку космических систем, на конечные *продукты* и *фазы* (этапы) реализации.

Декомпозиция продукта в свою очередь создаёт иерархию постоянно уменьшающихся составных элементов, например: *система, сегмент, элемент, подсистема, комплекс, подкомплекс, составная часть*.

В тоже время этапы жизненного цикла разработки нового проекта создают последовательность определённых действий, таких как: *обоснование необходимости, специфицирование, декомпозиция, проектирование, интеграция, верификация, эксплуатация, утилизация*.

При этом собственно системное проектирование осуществляется на стадиях концептуального и детального проектирования. Аналогами таких стадий в Российской Федерации являются НИР (научно-исследовательская работ), а также выполнение первой стадии ОКР (опытно-конструкторская работа) — разработки технического предложения (аванпроекта).

Детальное проектирование осуществляется в ходе выполнения ОКР: эскизного проекта, технического проекта, разработки конструкторской документации, изготовления и испытаний. После защиты эскизного проекта изменения в выбранных технических решениях крайне затруднительны.

## 1.2 ИНЖЕНЕРНАЯ СИСТЕМНАЯ РАЗРАБОТКА

Структурная схема процесса системной разработки представлена на рисунке 1. Традиционно процесс начинается с анализа требований. Методы системного анализа, оптимизации и контроля позволяют обеспечить постоянный мониторинг прогресса выполнения разработки, а также управляет конфигурацией проекта, разработкой всех видов интерфейсов, а также многообразием данных. Отдельный вид деятельности представляет собой анализ существующих рисков.

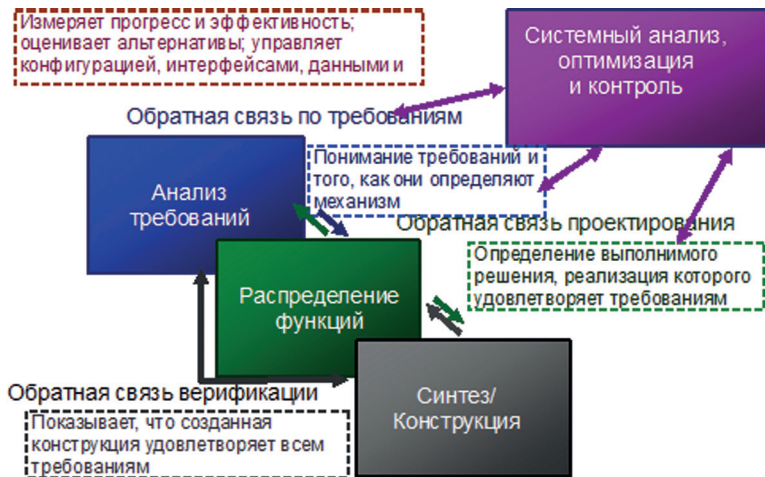


Рисунок 1. Схема процесса системного проектирования

В процессе системного анализа возникают обратные связи, корректирующие требования к системе и её составным элементам. Соответственно, из этого возникает понимание механизма функционирования системы, определяется наиболее приемлемое проектное решение, обеспечивающее выполнение предъявляемых к системе требований. В свою очередь на этапе синтеза обеспечивается проверка соответствия, что созданная конструкция полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

К сожалению, процедуры стандартизации проектирования в различных странах несколько различаются и, например, в Российской Федерации такого стандартизованного термина не существует. Вместе с тем, некоторые этапы жизненного цикла проектирования очень похожи. Следует отметить, что в последние годы, по мере усиления международной интеграции при создании космических систем, данному вопросу начали уделять существенное большее внимание, поэтому гармонизация стандартов системного проектирования и их международное одобрение различными космическими агентствами — это вопрос времени.

Традиционно процесс проектирования выполнялся последовательно: переход к следующей фазе проекта происходил только после завершения предыдущей. Подобный подход является очень затратным по времени. Кроме того, валидация разрабатываемого продукта может быть выполнена только после завершения всех стадий проектирования, изготовления и испытаний. Причём ошибки проектирования, выявляемые в ходе экспериментальной отработки изделия, могут быть исправлены только в ходе нового проектирования.

Подобных недостатков можно избежать, если использовать современные методы *модельно-ориентированного системного инжиниринга* (Model Based System Engineering — MBSE) [9]. Метод MBSE — это формализованное применение моделирования поддержки разработки от системных требований, концептуального и детального проектирования, анализа, верификации и валидации на всех фазах жизненного цикла изделия до изготовления, эксплуатации и утилизации изделия. Более прагматично: MBSE превращает физические, функциональные, экономические и другие социально значимые проектные данные во взаимосвязанные цифровые модельные представления

Отличие процессов традиционного проектирования и MBSE представлено на рисунке 2 (см. с. 21) [10].



Рисунок 2. Различие диаграмм традиционного документо-ориентированного системного инжиниринга от MBSE

Видно, что теоретически каждая стадия левой ветви V-диаграммы разработки, представленной на рисунке, верифицируется независимо по завершении соответствующего этапа интеграции на правой ветви. Однако на практике реальное поведение разработанного изделия проявится только по завершении интеграции в целом. В случае же применения методов MBSE поведение каждого элемента может быть всесторонне оценено на моделях. В идеале это приводит к тому, что изделие разрабатывается без ошибок и сдаётся с первого предъявления.

Поскольку упрощённо система — это интегрированная совокупность людей, продукции и процессов, обеспечивающая удовлетворение необходимых потребностей

*и достижение заданных целей*, в общем виде системная разработка как инженерная дисциплина включает в себя многие составные элементы.

Основные из них следующие: формулирование требований к участникам для работы в команде проекта; структурирование жизненного цикла проекта; формулирование целей миссии и концепции её функционирования; обоснование архитектуры системы, её иерархии и структуры набора выполняемых работ; процесс аналитической иерархии; формулирование требований к системе; функциональный анализ системы; синтез системы; основы проектирования и системные интерфейсы; измерение технических параметров; стоимостной анализ; анализ рисков; осознание уровней технологической готовности; исследование компромиссов; надёжность системы; проблемы валидации и верификации; отчётная документация процесса проектирования; разработка графиков проекта; управление проектом, этика отношений разработчиков.

### 1.3 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И НОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

Структурная схема процесса системного анализа и проектирования приведена в таблице 1. Данная глава написана с использованием материалов [11].

**Таблица 1.** Схема процесса системного анализа и проектирования

Процессы наивысшего уровня				
Анализ и проектирование космической миссии	⇒	Идентификация альтернативных архитектур миссии	⇒	Формулировка концепции
Оценка стоимости		Определение требований	⇐	Процесс оценки системных компромиссов
Определение элементов				
Концепция функционирования		Космическая платформа Выбор конструкции Исходные данные Предварительная разработка		Орбита/группировка
Компромиссные задачи				Выбор орбиты
Полезная нагрузка Выбор конструкции Целевая аппаратура Линия связи				Бюджет ΔV Проектирование группировки
Функционирование миссии				Коммуникационная архитектура
		Оценка бюджета Взвешенный бюджет Бюджет энергетики Бюджет топливозапаса		Пусковой сегмент
				Наземный сегмент
Детальное проектирование космической платформы				
Системы ориентации		Радиолинии		Сбор данных
Энергетическая установка		Система терморегулирования		Служебные системы
Управление и навигация		Топливо		Компьютеры

Разделы таблицы «Процессы наивысшего уровня» и «Определение элементов» обычно относят к процессам концептуального проектирования миссии, в то время как заключительный раздел относится к детальному проектированию.

Приведём далее основные шаги при выполнении анализа и проектирования космической миссии в соответствии с приведённой выше таблицей. Анализ начинается с *определения целей* миссии, включающих достигаемые результаты и ограничения.

При этом количественно оцениваются основные характеристики миссии, а также определяются её требования, затем анализируются *альтернативные концепции* миссии, выявляются возможные альтернативные архитектуры, идентифицируются системные драйверы, на основании чего формулируются окончательная концепция и архитектура системы. На следующем этапе проводится *оценка миссии*, включающая идентификацию критических требований, оценку единства элементов миссии, а также определение исходных данных для проектирования миссии. На заключительном шаге формируется *определение требований* к системе, а также осуществляется присвоение (назначение) выбранных требований элементам системы.

*Идентификация альтернативных архитектур* миссии начинается с определения компромиссных задач для элементов миссии, затем идентифицируются основные варианты каждого компромиссного элемента, формируется дерево компромиссов всех возможных вариантов, которое урезается путём устранения нереалистичных комбинаций.

*Формулировка концепции* начинается с определения предварительной концепции миссии. Определяются характеристики решаемых задач, затем выявляются необходимые параметры орбиты и вид группировки, определяются характеристики полезной нагрузки и её габаритно-весовые параметры. На следующем шаге выбирается характер функционирования миссии: архитектура каналов связи, основные функции и наземный комплекс. После этого производится проектирование космической платформы, удовлетворяющей требованиям полезной нагрузки, орбитального построения, а также телекоммуникаций. Выбирается система запуска и ракетоноситель (РН), определяется циклограмма выведения, логистика, а также стратегия утилизации миссии. После формулировки концепции переходят к определению элементов миссии. При этом сохраняются два самостоятельных направления: *разработка требований*, вытекающих из процесса анализа компромиссных задач миссии, а также *стоимостная оценка* миссии.

Процесс создания *концепции функционирования миссии* начинается с определения механизма доставки целевой информации и служебных телеметрических данных, определяемого выбором вариантов бортовой или наземной обработки данных, уровнем автономности, а также схемой последующей централизованной или децентрализованной обработки.

Определяются задачи, временные графики и управление для целевой и служебной информации, архитектура каналов связи для передачи всей этой информации, зависящая от ширины полосы передачи данных. После чего обуславливаются предварительные исходные данные для разработки детальной концепции, производственной конструкторской документации, функционирования на орбите и утилизации.

Чрезвычайно важным этапом анализа космической системы является *разработка требований* к космической системе в целом и её составным частям. От того, насколько правильно проведено определение требований, часто зависит успех реализации проекта создаваемой космической миссии в целом. Требования определяют, что должно быть разработано в процессе проектирования, насколько хорошо и при каких ограничениях — если задать неправильные требования, то проект также получится неправильными.

Очень много проектировщиков начинают решать проблему до того, как они осознают, а в чём собственно эта проблема состоит. Правильные требования, наряду с соответствующими ограничениями и допущениями, позволяют



чётко сформулировать решаемую проблему, распределить её на составные части, что в конечном итоге определяет успех проекта в целом. Требования формулируются на основании обзора архитектуры миссии, определённой в проекте. Они разграничены масштабом проблем, которые необходимо решить наилучшим образом на основании существующих знаний, а соответствующая иерархия должным образом контролируемых требований гарантирует, что в рамках проекта создаётся именно то, что требуется. В будущем требования являются основой для валидации и верификации проекта создаваемой космической системы.

Вся совокупность разрабатываемых требований может быть условно разделена на функциональные, точностные, ограничительные и верификационные.

*Функциональные* требования определяют, что данный элемент системы *должен делать*, например: система должна обеспечивать связь между землёй и КА (космическим аппаратом).

*Точностные* требования определяют количественные параметры соответствующих функций, выполняемых системой: в каком диапазоне частот, с какой скоростью осуществляется передача данных и как часто должна обеспечиваться связь.

*Ограничительные* требования вытекают из ограничений режимов эксплуатации, состояния окружающей среды, безопасности или соответствия принятым правилам:

- система связи должна использовать X-диапазон частот;
- система связи должна обеспечить функционирование в диапазоне температуры минимально  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и по меньшей мере до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальная плотность излучаемой мощности радиочастот должна быть менее чем  $10\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ .
- стандарты проектирования (единицы измерения, языки программирования и т. д.).

*Верификационные* требования обеспечивают выполнение условий, насколько можно доверять тому, что характеристики системы соответствуют заданным в реальных условиях эксплуатации. Например, все заданные характеристики и функциональные требования должны обеспечиваться в процессе испытания системы в вакуумной камере при освещении потоком видимого света  $2,5\text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$  со стороны координаты  $z$ .

В завершение изложения материала главы кратко остановимся на задаче стоимостной оценки проекта создания космической системы. В общем виде разработанные требования и концепция разработки прогнозируют затраты до того, как они будут понесены. На рисунке 3 (см. с. 25) приведены графики планируемых и понесённых затрат при проектировании и создании системы [12].

Видно, что более 80 % планируемых затрат приходится на этапы разработки исходных данных и концептуального проектирования, в то время, как понесённые затраты в основном приходятся на этапы детального проектирования, производства и испытаний. Именно поэтому ошибки, возникающие на ранних этапах разработки, требуют непропорционально больших затрат для их устранения.

Для преодоления указанной проблемы наряду с MBSE применяются подходы параллельного (concurrent engineering) и непрерывного (continuous engineering) проектирования, когда в принятие технических решений проектирования от начала до конца на всех этапах жизненного цикла одновременно вовлечены все участники разработки, включая заказчика работ [13].

Такие команды разработчиков объединяют представителей всех тематических направлений и называются интегрированными междисциплинарными командами.



Рисунок 3. Затраты при проектировании и создании системы [12]

Завершая данный раздел, сформулируем следующие аксиомы системного анализа и проектирования космических миссий:

1. Основная стоимость формируется на начальных шагах цикла разработки (разработка концепции), незначительно увеличиваясь на более поздних стадиях.
2. На момент завершения проектирования 85 % затрат уже законтрактовано обязательствами, а стоимость преодоления ошибочных решений на более поздних стадиях возрастает экспоненциально.
3. Цена опоздания на рынок очень высока.
4. Междисциплинарные команды разработчиков обычно обеспечивают более качественные системные решения при разработке сложной продукции, чем индивидуальные разработчики — особенно на ранних стадиях.
5. Вовлечение в разработку продукции междисциплинарных команд, использующих структурированные процессы разработки, экономит время и деньги на жизненном цикле, особенно если проектируется новое изделие.

## 1.4 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБУЧЕНИИ СИСТЕМНОМУ ИНЖИНИРИНГУ

Ускорение сроков возникновения новых технологий разработки и производства космической техники при сохранении консервативного подхода к высшему образованию привели к тому, что выпускник современного технического университета, в полном объеме освоивший теоретическую программу обучения, уже отстал от реальных потребностей практики. Указанное обстоятельство требует внедрения новых технологий обучения, в том числе принципам дистанционного образования. Одним из удачных примеров подобного подхода являются программы, поддерживаемые рядом космических агентств, например ЕКА, НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства) и JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency).

Поскольку все они похожи в своей сущности, рассмотрим более подробно программу европейского космического агентства «Запусти свой спутник» (“Fly

Your Satellite!» — FYS) [14]. Программа, разработанная и управляемая офисом высшего образования ЕКА, предназначена для того, чтобы студенты университетов получали поддержку ЕКА при реализации их собственных проектов создания кубсатов путём получения дополнительного высшего образования. Участие в данной программе помогает студентам более эффективно войти в выбранную профессию, востребованную в космической индустрии.

Координацию и руководство работами на разных фазах реализации программы от проектирования до лётной эксплуатации спутника осуществляют как университетские профессора, так и ведущие специалисты аэрокосмической отрасли. Подобный подход к образованию применяет все профессиональные стандарты разработки космической техники ЕКА, соответствующие реальной космической программе ЕКА, что позволяет студентам обучаться на реальных наилучших практиках отрасли.

В дополнение к программе практической подготовки предлагается пятидневная стажировка создания кубсата, нацеленная на вовлечение студенческих команд в ранние стадии разработки проектов, включающая участие в рабочей группе «Параллельная разработка кубсата», а также недельную стажировку по проектированию и испытаниям малых спутников.

Таким образом можно сказать, что FYS — это программа, направленная на разработку и создание студентами государств, входящих в ЕКА, одно-, двух- и трёхюнитовых кубсатов с получением всеобъемлющих теоретических знаний [15].

## ФАЗЫ ПРОГРАММЫ FYS

В настоящее время программа поделена на пять фаз, которые в широком смысле соответствуют фазам жизненного цикла изделия С, D1, D2, E1, и E2 (адаптированным к учебной программе, каждая типовая фаза проекта обозначена самовыражающим названием: «Спроектирую свой спутник!», «Собери свой спутник!», «Испытай свой спутник!», «Запусти свой спутник!» и «Эксплуатируй свой спутник!»), как показано на рисунке 4. Прежде, чем перейти к следующей фазе программы команды студентов, разрабатывающие спутники, должны преодолеть промежуточные ключевые точки экспертиз и принятия. На всех фазах реализации программы команды студентов получают всестороннюю поддержку и специалистов ЕКА и лекторов университета.



Рисунок 4. Фазы программы «Запусти свой спутник»

### Фаза С: «Спроектируй свой спутник!»

Главная цель данной фазы состоит в обеспечении понимания, что детальный проект кубсата является законченным и соответствующим всем требованиям миссии, используемым интерфейсам и безопасности. Как часть фазы



проектирования команды разработчиков готовят исчерпывающий набор данных для проведения экспертизы эскизного проекта (Critical Design Review — CDR), включающий всю документацию на составные части проекта, такие как: конструкторская документация, управление качеством, управление проектом и нормативную документацию. Успешное прохождение экспертизы означает готовность начинать фазу сборки.

Разработанный комплект документов обновляется по мере выполнения всех фаз программы. Для последовательного отслеживания вопросов, возникших в процессе экспертизы и контроля их успешного разрешения, создаётся сводный перечень отклонений (Review Item Discrepancies — RIDs), определяется стратегия корректирующих мероприятий, которые постоянно обсуждаются участниками разработки до тех пор, пока не будет достигнут консенсус между специалистами ЕКА и студенческими командами разработчиков в ходе совместных рабочих совещаний.

### Фаза D1: «Собери свой спутник!»

Данная фаза нацелена на изготовление спутника. Университетские команды завершают интеграцию лётного образца и выполняют функциональное тестирование на полностью собранном спутнике для обнаружения возможных дефектов проектирования и сборки. Функциональные испытания выполняются на университетском оборудовании в лабораторных условиях, позволяющих продемонстрировать функциональность кубсата, а также для проведения валидационных испытаний. При подготовке мероприятий функционального тестирования команды выполняют так называемую экспертизу готовности к климатическим испытаниям (Ambient Test Readiness Review — ATRR), для которой они должны выполнить мероприятия, предусмотренные CDR, скорректировать необходимый набор данных и выпустить необходимые новые документы, обеспечивающие испытания, такие как программа проведения испытаний и перечень необходимых испытаний.

### Фаза D2: «Испытай свой спутник!»

При выполнении данной фазы студенческие команды, поддержанные ЕКА, выполняют климатические и механические испытания, демонстрирующие, что лётный образец кубсата соответствует предъявленным требованиям в моделируемых условиях, соответствующих ожидаемым условиям полёта спутника. Тесты включают вибрационные испытания (тестирование на фиксированных частотах, испытания на случайных частотах вибраций, ударные испытания), а также тепловвакуумные и температурные циклические испытания. Студенты готовятся к проведению испытаний путём выполнения экспертизы готовности (Environmental Test Readiness Review — ETRR). Условия испытаний обычно задаются как модельная квалификация, но схема тестирования (квалификация, приемлемость) определяется для каждого конкретного случая в зависимости от философии модели и подхода к испытаниям кубсатов. В завершающей стадии данной фазы команды выполняют верификацию и демонстрируют, что кубсат (как лётный, так и наземный сегменты) соответствует предъявленным требованиям. До завершения фазы D2 выполняется также экспертиза готовности к запуску (Flight Acceptance Review — FAR), подтверждающая, что кубсат создан правильно и готов для перехода к фазе «Запусти свой спутник!»

### Фаза E1: «Запусти свой спутник!»

Данная фаза состоит из подготовки к запуску и собственно пусковой компании. Кубсаты размещаются на внутриорбитальной системе выведения, поэтому требуется дополнительная верификация по требованиям запускающей организации.

Команды создателей кубсатов или их университеты являются собственниками спутников и несут за них полную ответственность. Для того чтобы спутник был принят для установки в пусковое устройство команда разработчиков кубсата должна подтвердить своё соответствие правилам регистрации частот спутника в международном союзе электросвязи (ITU), а в случае использования частот любительской радиосвязи они должны координироваться международным союзом любительской радиосвязи (International Amateur Radio Union — IARU).

### Фаза E2: «Эксплуатируй свой спутник!»

Заключительная фаза программы называется «Эксплуатируй свой спутник!» После размещения спутника на орбите спутники активируются и инициализируют свои миссии. Обычно студенческие команды работают со своими спутниками с собственных университетских наземных станций, собирают данные, полученные их миссиями, а затем представляют результаты обработки на конференциях. Программа завершается заключительной экспертизой (Final Review — FR), в ходе которой оцениваются предварительные результаты миссии и уроки, извлечённые из выполнения всей программы целиком.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММЫ

Рассмотренная программа «Запусти свой спутник» замышлялась как постоянно повторяющаяся практическая практика, основанная на опыте и уроках выполнения образовательных программ ЕКА, адаптированных на образовательные кубсаты. Новые циклы программы начинаются после проведения нового конкурса проектов. В общих чертах процесс отбора проектов включает формирование студенческой команды, задействующей как минимум восемь ключевых участников (особенно приветствуется участие аспирантов), идентификацию двух руководителей (штатного профессора университета, а также руководителя команды или системного инженера), и представление предложения. На отборочное заседание конкурсной комиссии приглашается ограниченное количество студенческих команд, отобранных образовательным офисом ЕКА. На данном заседании для студенческих команд проводятся вводные занятия, но прежде всего студентам предлагается возможность представить свои задумки миссий кубсатов, конкурирующих за возможность победы при отборе.

Завершая главу, отметим, что во всей полноте описание дисциплин системной разработки, а также системного анализа и проектирования космических миссий в данном курсе не предусматривалось, однако мы дали исчерпывающее представление о том, что в них входит. Желющие подробнее познакомиться с материалами системного инжиниринга могут воспользоваться библиографией работ [16].

## ГЛАВА 2 ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Географические информационные системы (ГИС) рассматриваются как автоматизированные аппаратно-программные комплексы, осуществляющие сбор, хранение, обработку, отображение и распространение пространственно-координированных данных. Они принадлежат к классу информационных систем преимущественно ресурсного направления. К задачам, решаемым на основе ГИС-технологий, относятся также научные и прикладные вопросы инвентаризации, оценки, прогноза, оптимизации и управления окружающей средой и территориальной организацией общества.

Обязательными признаками ГИС являются:

- 1) географическая (пространственная) привязка данных;
- 2) генерирование новой информации на основе синтеза имеющихся данных;
- 3) автоматическое обновление баз данных на основе поступающей информации;
- 4) обеспечение принятия управленческих решений [17].

Прежде всего, следует напомнить и пояснить, что ГИС — это не столько новая концепция, сколько новая технология. Поэтому возникает вопрос, что нового и в чём особенности концепции, с которой знакомы все географы: сводится ли дело к взаимосвязям между природными и социальными объектами или особенно важны их местоположение и распространение.

Ответ лежит в «новых технологиях» и, отчасти, в возможностях ЭВМ (электронно-вычислительная машина), которые меняют сам подход к обработке такой информации. Возможности эти настолько велики, что теперь можно обрабатывать и природную, и социально-экономическую информацию для обширных районов, почерпнув её из различных источников. При этом намного возросли возможности детализации, вплоть до использования в качестве базовых единиц отдельные хозяйства [18].

Многие процедуры обработки и анализа данных в ГИС основаны на методическом аппарате, ранее разработанном в недрах отдельных отраслей картографии. К ним принадлежат операции трансформации картографических проекций и иные операции на эллипсоиде, опирающиеся на теорию и практику математической картографии и теории картографических проекций, операции вычислительной математики, позволяющие осуществлять расчёт площадей, периметров, показателей форм геометрических объектов, не имеющих аналогов в карто- и морфометрии.

Однако задачи ГИС выходят за пределы картографии, делая их основой для интеграции частных географических и других наук о Земле при комплексных системных геонаучных исследованиях.

Методический аппарат геоинформационных технологий прямо или косвенно связан с различными областями прикладной математики (вычислительная геометрия, аналитическая и дифференциальная геометрия, откуда заимствованы многие алгоритмические решения аналитических операций технологической схемы ГИС), с машинной графикой (в части компьютерной реализации визуализационно-картографических возможностей ГИС),

распознаванием образов, анализом сцен, цифровой фильтрацией и автоматической классификацией в блоке обработки цифровых изображений растровых ГИС, океанографией (например, в модулях обработки данных динамической топографии, полученных традиционными методами или с использованием спутниковых альтиметрических систем и глобальных навигационных систем GPS). Отметим, что материал следующего раздела и многие использованные иллюстрации заимствованы из работы [2].

## 2.1 ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Чтобы извлечь из отдельно взятых, не находящихся в каком-либо смысловом контексте *данных* полезную информацию, необходимы дополнительные сведения особого, структурного плана, помогающие проинтерпретировать новые данные и ввести их в общую систему знаний об окружающем мире. Иначе говоря, данные, пока мы не имеем информации о том, как они связаны с системой знаний, в эту систему не входят и не являются полезной информацией. Как только мы привлекаем сведения о структуре их связи с существующей системой знаний, они оказываются связанными с этой системой, становятся её частью и тем самым увеличивают объём этой системы знаний, становятся *полезной информацией*. Таким образом, *знания* предполагают системность, структурированность информации, обеспечивая возможность описания не только свойств, но и взаимосвязей между явлениями и объектами реального мира. Ценность данных возрастает на пути от разобщённых элементов данных к полезной информации и к систематическим знаниям.

С другой стороны, *данные* — это физическое представление информации. Наше познание мира, включающее такие процессы как отбор важнейшего, обобщение, анализ и синтез, обогащает нас информацией, которой возможно делиться с другими людьми, делая её тем самым доступной не только для тех, кто её создал. Такое накопление и обмен информацией возможны только с помощью данных — зафиксированных элементарных фактов.

Данные могут быть *структурированы* или *организованы* определённым образом, например, в виде таблиц или в виде пространственной базы данных под управлением *географической информационной системы* (рисунок 5, см. с. 31). Одной из разновидностей ГИС становятся системы, основанные на материалах дистанционного зондирования, объединяющие функциональные возможности геоинформационных технологий с развитыми функциями обработки дистанционных изображений, так называемые интегрированные ГИС.

Именно вопросы структурирования информации с помощью компьютерных систем занимают особо важное место в информатике и в геоинформатике.

Одним из общепринятых принципов организации пространственной информации является *послойный принцип* (рисунок 6, см. 31). Суть его заключается в том, что многообразная информация о какой-то территории организуется в виде серии тематических слоёв, отвечающих конкретным потребностям. Каждый слой может содержать информацию, относящуюся только к одной или нескольким темам.

Такое подразделение информации на слои интуитивно понятно и привычно, и легко соотносится с общепринятыми принципами использования прозрачных калек-накладок при работе с бумажными картами. Послойная организация данных предполагает, что слои в пространстве не имеют разрывов, и что везде мы имеем какую-то информацию.



Рисунок 5. Структурная схема ГИС

**Тематические слои      Временные срезы**

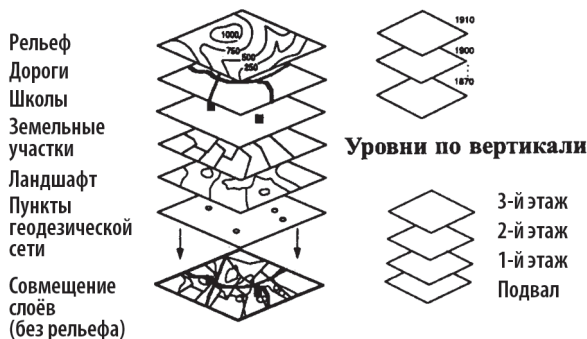


Рисунок 6. Послойная организация данных

Представленные отдельными слоями данные могут относиться к разным точкам или разным периодам на временной шкале.

Аналогичное структурирование информации на темы, а также на отдельные листы по территории широко распространено и при работе с аналоговой информацией, в первую очередь, с бумажными картами. Среди компьютерных пространственных информационных систем такое послойное представление является сегодня доминирующим, явно отражая тот факт, что ГИС выросли на базе методов традиционного картографического анализа.

Другой принцип организации пространственной информации называется бесслоевым, или *объектно-ориентированным подходом*.

В нём отсутствует разбиение информации на тематические слои, точнее, отсутствует группировка объектов в тематические слои, с которыми можно манипулировать как с тематическими картами. Группировка объектов происходит более сложным образом в соответствии с логическими взаимосвязями между ними, с построением иерархий, отвечающих их более общим и более частным свойствам (рисунок 7, см. с. 32).



Рисунок 7. Объектно-ориентированная организация данных

Такой подход, возможно, несколько ближе к структуре человеческого мышления и особенно эффективен, когда требуется подчеркнуть индивидуальные логические взаимосвязи объектов, но менее эффективен, если необходимо вводить в рассмотрение также и непрерывно распределённые в пространстве признаки, такие как рельеф местности или данные о загрязнении почвы тяжёлыми металлами.

Для всех этих общих концепций организации пространственной информации существует и более детальный уровень, именуемый *физическим уровнем представления*. Например, если мы работаем с информацией о дорожной сети какого-то района, мы можем выразить её в виде таблиц с номерами дорог по какому-то классификатору и массой числовых характеристик. Или мы можем представить эту же информацию в виде карты, где дороги отображены в виде линий, а те же связанные с ними числовые характеристики (ширина, число полос движения, тип покрытия) выражены в виде условных знаков (тип линии, цвет, толщина).

Пользователи пространственной информации, ещё задолго до появления компьютерных систем, уже работали с ней, используя её определённую организацию. Они в основном работали с бумажными картами. Карта, великолепное изобретение человечества, представляет собой, в сущности, картографическую модель действительности, один из способов организации пространственной информации. Она близка по идеологии, но не эквивалентна послойной организации информации в современных компьютерных системах.

Схема процесса познания окружающего мира с помощью карт иллюстрируется рисунком 8 (см. с. 33) [19]. Карты очень разнообразны по принципам организации информации, но в целом более синтетичны и часто более эклектичны, чем результат следования строгим принципам организации информации в ГИС. Карта — это один из важнейших шагов на пути к современной геоинформатике, базирующейся на цифровых компьютерных системах. Долгий путь развития и применения бумажных карт нашёл своё отражение в использовании и частичном заимствовании геоинформатикой терминологии традиционной картографии, в воспроизведении с помощью компьютерных методов



многих традиционных процедур работы с картами. Историческая связь геоинформатики и традиционных методов работы с картами очень тесная.

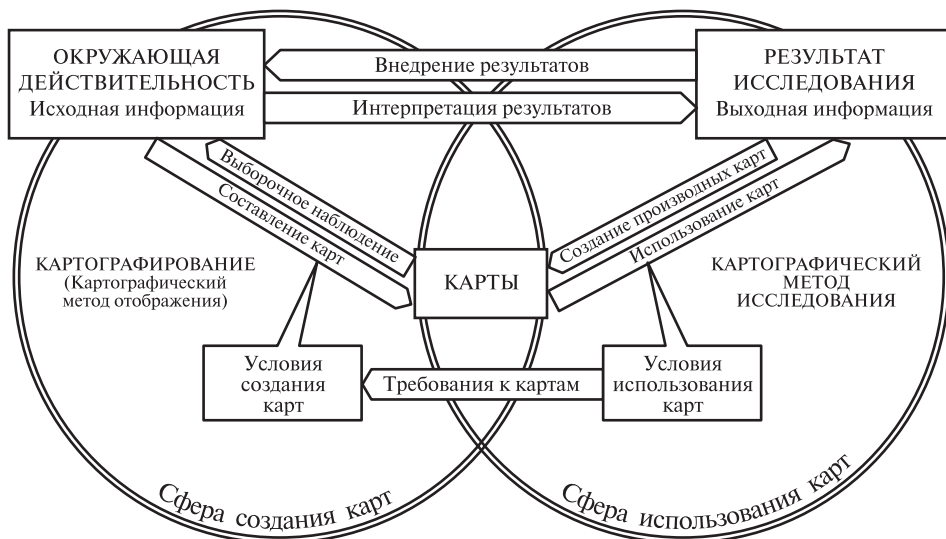


Рисунок 8. Картографический метод познания окружающего мира

Более того, сходство карт, аэрофотоснимков и космических изображений как моделей действительности проявляется в наличии масштаба, метричности, высокой обзорности, наглядности, непрерывности и других свойств. При этом карты способствуют познанию общих глобальных, зональных, региональных закономерностей, а снимки открывают возможность детализации этих закономерностей, т. е. космические изображения, как модели, соединяют в себе достоинства аэрофотоснимков и карт.

Одна из важнейших областей совместного применения картографического и дистанционного методов исследований на основе геоинформатики — это организация цифрового мониторинга природной среды. Он предполагает, с одной стороны, слежение за факторами воздействия на среду, её состоянием и происходящими изменениями, а с другой — прогнозированием состояния и рекомендации по управлению природной средой. В каждой из прикладных областей существуют свои специфические потребности и своя специфическая терминология, своя история внедрения *геоинформационных технологий*.

## РАЗЛИЧНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ РАБОТЕ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Сегодня можно назвать, оставляя в стороне сугубо научные приложения, следующие крупные области применения ГИС, причём этот список далеко не полный, и приводится просто для примера:

- управление земельными, водными и биологическими ресурсами, кадастры;
- инвентаризация и учёт объектов распределённой производственной инфраструктуры, и управление ими;
- проектирование, инженерные изыскания и планирование в градостроительстве, архитектуре, промышленном и транспортном строительстве;

- тематическое картографирование практически в любых областях его применения;
- морская картография, навигация и управление движением транспорта;
- дистанционное зондирование;
- управление природными ресурсами (водными, биологическими и т. д.);
- представление и анализ рельефа местности;
- моделирование процессов в природной среде, управление природоохранными мероприятиями;
- мониторинг состояния окружающей среды;
- реагирование на чрезвычайные и кризисные ситуации;
- геология, минерально-сырьевые ресурсы и горнодобывающая промышленность;
- планирование и оперативное управление перевозками;
- планирование развития транспортных и телекоммуникационных сетей;
- маркетинг, анализ рынка;
- археология;
- комплексное управление и планирование развития территории, города;
- безопасность, военное дело и разведка;
- сельское хозяйство.

Никакого особенного порядка в этом списке нет. Отметим только, что в нём присутствуют термины, относящиеся как к *предмету* активности (земельные ресурсы), так и к *задачам* или целям (планирование развития, управление перевозками), а также и к *методам* и *средствам* (дистанционное зондирование).

В этой большой области приложений можно выделить несколько основных типов. Одни связаны с задачами учётно-инвентаризационного типа, акцент делается на данных и измерениях (например, задачи земельного кадастра или управления распределённой производственной инфраструктурой большого предприятия). Другие связаны с задачами управления и принятия решений. В третьих — акцент делается на моделировании и сложном анализе данных.

Отметим, что вне зависимости от того, применяются ли при работе с данными мощные аналитические процедуры и сложные запросы или нет, ГИС очень часто используются как средства поддержки принятия решений. Достижимая здесь эффективность, даже при использовании минимальных средств, доступных геоинформатике, часто очень высока за счёт высокой наглядности картографической визуализации информации и удобства доступа к информации.

Минимальный набор критериев, позволяющих идентифицировать каждую конкретную ГИС, включает: территориальный охват и связанный с ним функционально масштаб (или пространственное разрешение), предметную область информационного моделирования и проблемную ориентацию.

В частности, мы будем иллюстрировать многие разделы примерами мониторинга океанографических условий различных районов Мирового океана, которые содержат в себе все три типа приложений.

На рисунке 9 представлена схема комплексного анализа разнородных данных в океанографической ГИС, направленного на выявление потенциально биопродуктивных районов.

Из приведённой схемы видно, как исходные данные, содержащиеся в разных источниках, с использованием процедур оцифровки превращаются сначала в цифровые файлы, а затем в поля физико-химических параметров водной толщи. Обработка таких полей позволяет выделить из них промежуточные свойства наблюдаемых океанографических явлений, после чего их совместный анализ обеспечивает возможность получения рекомендаций для выработки управленческих решений.



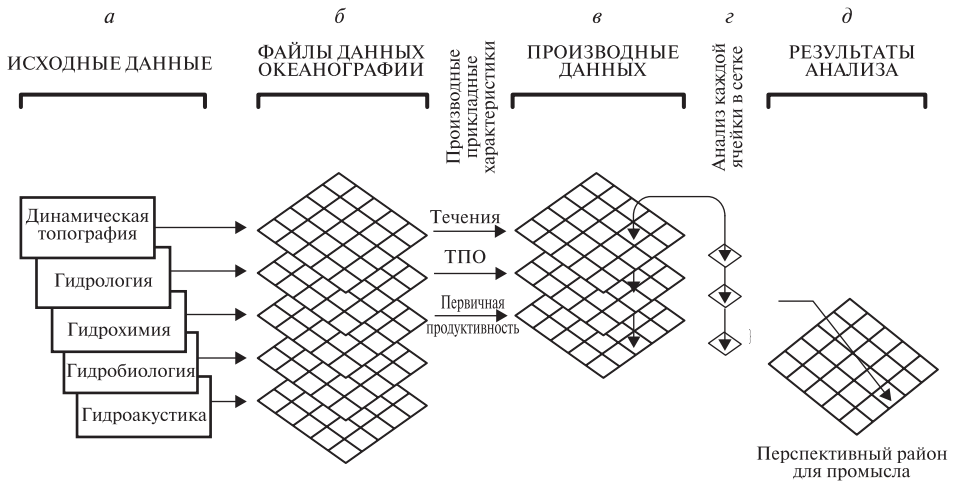


Рисунок 9. Комплексный анализ пространственных данных в ГИС

Знание конкретных потребностей той или иной области применения, той или иной задачи является важным для рационального выбора программных средств и построения эффективной структуры базы данных. Например, для одних применений наиболее эффективной является послынная организация данных, для других — объектно-ориентированная модель данных. Часто оптимальным решением оказывается комбинирование этих двух подходов.

Перейдём теперь от рассмотрения возможностей системы (они быстро развиваются и совершенствуются) к вопросу о данных, необходимых для её функционирования. Независимо от решаемой задачи — отыскания самого быстрого пути по городским улицам, мониторинга путей миграции химических элементов в ландшафте, инвентаризации уличных телефонов-автоматов, подсчёта ущерба от лесных пожаров, поиска лучшего места для строительства нового склада товаров, прогноза погоды для порта Находка, или планирования реконструкции канализационной системы в городе Москве, мы, в сущности, имеем дело с немногими категориями данных, такими как:

- явлениями, условиями или объектами, которые имеют определённую изменчивость от места к месту. В случае океанографического мониторинга это могут быть различные мезомасштабные явления в океане (вихри, фронтальные и градиентные зоны, зоны вергенций, апвеллинги и пр.);
- природными объектами, часто с нечёткими границами или вообще не имеющими границ;
- объектами, созданными человеком, обычно имеющими чёткие и ясные границы и формы;
- явлениями, чётко локализованными в пространстве, например, извержение вулкана;
- объектами, которые связаны или не связаны друг с другом в пространстве.

Другими словами, мы имеем дело со свойствами пространственных объектов, как-то расположенных в некоторой системе координат или привязки.

Можно также отметить исключительно высокую роль обеспеченности ГИС данными, которые являются одной из важнейшей компоненты работающей системы и необходимым условием её практически полезного функционирования.

## ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Для эффективного использования всех возможностей ГИС необходимо, чтобы проблема, решаемая в ГИС, была определена максимально чётко. При этом разные вопросы, с которыми пользователи при решении своих специфических прикладных задач обращаются к пространственной информации, могут быть сведены к небольшому числу типов, отличающихся с точки зрения общей геоинформатики. Эти типы следует уметь выделять из практически бесконечного разнообразия запросов к пространственной информационной системе, возникающих в различных прикладных областях.

Практическое значение такой типизации весьма велико. Только умея видеть общее за частным, распознавая различные типы запросов не с точки зрения их содержательного смысла, а с точки зрения общих особенностей работы с пространственной информацией, можно правильно подойти к определению необходимой функциональности пространственной информационной системы, выбору способа организации информации в ней, т. е. в конечном счёте — к правильному выбору программного обеспечения (ПО) и построению оптимальной структуры базы данных.

## ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАПРОСОВ

Наиболее часто используются две простейшие группы, отличающиеся направлением нашего запроса — «Что это?» и «Где это находится?», или, иначе говоря, «Что мы имеем в конкретном месте?» и «Где находится какой-либо объект (объекты) с заданными характеристиками?» В первом случае мы имеем дело с поиском объекта в пространственной базе данных по его положению, во втором — ищется положение для уже выбранных объектов. Первый случай можно назвать «картографическим интерфейсом запроса к базе данных», «запросом информации „через“ карту». Второй можно сравнить с выдачей отчёта, распечатки с найденными данными при использовании обычной СУБД, и назвать его можно «созданием картографического отчёта». В последнем случае результат поиска выдаётся на карту, или карта строится по результатам информационного поиска.

Некоторые варианты пространственных запросов, включающих пространственные ограничения, продемонстрированы на рисунке 10. Видно, что могут существовать как многообразные типы искомым пространственных объектов, так и многообразие пространственных объектов, используемых для наложения дополнительного пространственного ограничения на поиск.

Кроме пространственных запросов на поиск информации или объектов может потребоваться провести измерения, или определить пространственные взаимоотношения объектов. Пространственные измерения могут включать, например, измерения расстояний или площадей («Расстояние от административного центра», «Размеры озера», «Расстояние до ближайшей железной дороги»), а определения пространственных взаимоотношений, например, могут быть анализом соседства — «Какие земельные участки граничат с данным?», а также иметь вид «Пересекаются ли где-нибудь Рижская железная дорога и Дмитровское шоссе в Москве?» Отметим, что предпоследний пример одновременно является и примером анализа пространственных взаимоотношений и примером пространственного запроса на поиск объектов.

Системы поддержки принятия пространственных решений могут иметь дело с выводами в отношении реально ненаблюдаемых объектов на основе изучения наблюдаемых объектов. Таковы, например, практически все задачи

прогнозирования месторождений полезных ископаемых в геологии, а также в промысловой океанографии. Мы наблюдаем выходы тех или иных горных пород, измеряем геофизические и геохимические поля, и на основе их изучения и установления характера взаимоотношения между ними делаем выводы относительно возможности обнаружения месторождений тех или иных полезных ископаемых в целом на заданной территории.

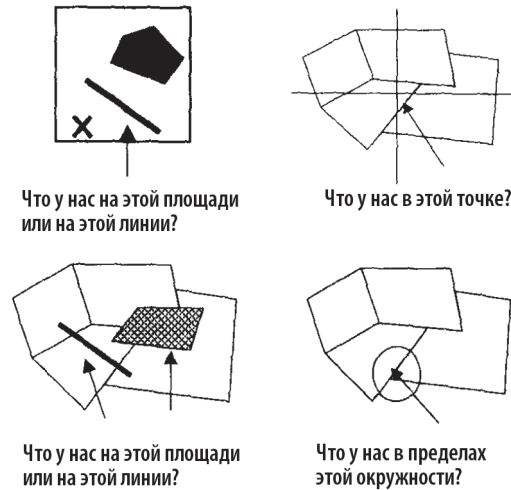


Рисунок 10. Некоторые типы пространственных запросов

Таблица 2. Использование пространственных данных

Дано	Требуется найти
Имя объекта Характеристики объекта Местоположение объекта	Местоположение объекта Имя объекта Имена объектов Характеристики объектов
Категория действия	Конкретизация действия
Провести измерения	Площади, расстояния, формы, и т. д. Включения, направления, прилегания, связности, и т. д. Выбрать место размещения, выбрать маршрут или путь на основе прямых геометрических построений, используя статическое моделирование, используя динамическое моделирование
Выявить пространственные взаимоотношения	
Принять решение	
Сделать прогноз	

Аналогично и в случае поиска потенциально продуктивных в промышленном отношении районов Мирового океана. По совокупности косвенных признаков и явлений на поверхности океана, измерению трёхмерных полей и распределению гидрофизических и гидробиологических параметров — на основе

их изучения делаются выводы о возможности нахождения рыбных косяков на той или иной акватории.

Итак, мы получаем фактически ещё один вид пространственных проблем — проблему *предсказания, пространственного прогноза*.

Нетрудно представить себе ещё и такой тип пространственных проблем, как нахождение оптимального места для размещения какого-либо объекта. Такая задача представляет собой, в сущности, один из вариантов поддержки принятия пространственных решений.

Иллюстрация решения подобной проблемы с помощью средств ДЗ и ГИС убедительно продемонстрирована фирмой Макдоналдс (McDonald's), которая анализирует застройку мегаполисов с помощью спутниковых снимков высокогорного пространственного разрешения и таким образом выбирает места для размещения новых ресторанов быстрого питания. Поддержка принятия пространственного решения может быть также связана с использованием статической или динамической пространственной модели.

Подводя краткий итог, приведём таблицу-сводку (таблица 2) основных типов активности, связанной с использованием пространственных данных.

## ИНФОРМАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМЫ (ПРОСТРАНСТВЕННАЯ) И ИНФОРМАЦИЯ АТРИБУТИВНАЯ (ОПИСАТЕЛЬНАЯ)

Два упомянутых понятия — это *положение и характеристики, свойства*, всегда в явной или неявной форме присутствуют в рассуждениях при обсуждении любой пространственной проблемы. Они как бы определяют два возможных взгляда на предмет, по-разному направляя мыслительный процесс. Представим себе ситуацию, когда вертолёт забрасывает человека с завязанными глазами куда-то в середину большого лесного массива. Естественно, первый вопрос: «Где я?» Но что может послужить в этой ситуации системой координат, системой привязки, точкой отсчёта? Как узнать своё местонахождение, передвигаясь по лесу? Это представляет собой трудную проблему (конечно, если в кармане нет GPS-приёмника и листа нужной топографической карты).

Человечество за тысячелетия своей истории выработало несколько вариантов таких систем привязки или систем координат. Они могут быть частными, используемыми разово в одном единственном случае («расстояние в шагах и направление по отношению к Солнцу от места посадки вертолётки») или использоваться во многих случаях как стандартные (общеземная сетка параллелей и меридианов).

Системы координат могут быть *полярными*, основанными на направлении на конкретную точку и расстоянии до неё. (Такие системы называют также азимутальными.) Другой общепотребительный вариант — это *прямоугольные* системы координат, использующие также два числовых значения, представляющие собой два расстояния во взаимно перпендикулярных направлениях (прямоугольные системы координат называют ещё *картезианскими*, или *декартовыми* по имени математика Декарта) (рисунок 11).

Сегодняшние ГИС всегда работают с прямоугольной системой координат, обычно построенной на плоскости. При этом обычно имеется возможность связи с географическими (градусными) координатами (которые представляют собой вариант азимутальных). Эта связь реализуется в возможности преобразования координат из одной системы в другую для всех или избранных объектов в пространственной базе данных. Данная процедура обеспечивается переписыванием их значений в файлах. Альтернативой является возможность пересчёта «на лету» координат текущего положения курсора, или даже в преобразовании «на лету» всего картографического представления из одной системы в другую.

Именно так реализован этот механизм в современных программных пакетах. В них базой для определения абсолютного положения и измерений расстояния является евклидова геометрия.



Рисунок 11. Способы указания положения

Обычно пространственные объекты и явления рассматриваются в какой-то из систем привязки или координат. Два этих понятия — система привязки и система координат не являются полными синонимами. Системой координат нам представляется разумней называть только системы числовых координат. Понятие система привязки является более общим термином, включающим в себя и понятие система координат. Два другие термина — позиция и местоположение, место, тоже не являются синонимами, хотя в обыденной жизни различие между ними часто игнорируется. Термин позиция лучше употреблять по отношению к положению существующего объекта, а место — по отношению к определённой точке в системе привязки безразлично к тому, находится в ней какой-то объект, или не находится.

Пространственная привязка, т. е. фиксация положения в пространстве, может быть выполнена в различных формах:

- 1) в виде конкретной системы числовых координат, как прямоугольной, так и азимутальной (полярной);
- 2) указанием объектов-соседей, т. е. линейных или площадных объектов, которые касаются искомого;
- 3) заданием линейной привязки, т. е. линии и расстояния, измеренного вдоль неё, как пикетаж по профилю нивелирования или километровые столбы вдоль дороги;
- 4) с помощью указания минимального описанного многоугольника, включающего искомый объект (т. е., фактически, указания минимальных и максимальных прямоугольных координат по осям  $X$  и  $Y$ );
- 5) с помощью имени объекта или его числового кода-номера;
- 6) указанием того участка в системе разбиения территории (или объёма), который содержит искомый объект. При этом разбиение может быть на участки правильной или неправильной формы, одинакового или

разного размера. Например, указанием номенклатуры листа масштаба 1:25 000, в пределах которого расположен объект. Или указанием страны, в пределах которой он расположен.

## Измерения и пространственные взаимоотношения

Приняв, что рассматриваемые объекты реального мира могут быть чётко отграничены от их окружения, и их положение в пространстве может быть задано в той или иной системе привязки, выполнение различных задач с использованием информации об этих объектах может потребовать определения пространственных характеристик этих объектов и наличия средств измерения этих характеристик.

Для начала рассмотрим примеры пространственных характеристик, определённых для индивидуальных объектов (рисунок 12):



Рисунок 12. Основные пространственные характеристики

*Длина*, например, длина реки или длина береговой линии озера.

*Площадь* поверхности, например, площадь озера, острова или конкретного земельного участка.

*Объём*, например, количество земли, которое необходимо удалить для постройки дорожной выемки:

*Форма*, например, округлая или вытянутая, прямолинейная или изогнутая.

*Регулярность* или неправильность формы, например, угловатая, состоящая из прямолинейных отрезков граница штата Юта в США, или резко нерегулярная форма морского побережья в Далмации на Адриатике.

*Ориентировка*, например, направление длинной оси.

Объект может иметь *центр*, как, например, середина дороги или центр города.

*Уклон*, крутизна склона — это пространственное свойство, например, горы.

Как обстоит дело с измерением этих свойств? Все замечательно просто, если мы уже имеем отображение этих объектов на карте или в геоинформационной системе. Или если мы в состоянии посетить объекты на местности и произвести прямые наблюдения и измерения. Однако мы получим различные ответы, например, при измерении длины, в зависимости от точности используемых нами измерительных устройств, а также в зависимости от масштаба,



в котором мы изначально зафиксировали объекты (т.е. при разной детальности рассмотрения). Длина береговой линии даже такого относительно простого по конфигурации побережья как мурманский берег Кольского полуострова будет значительно отличаться, если мы проведём её измерения по картам масштаба 1:1 000 000 и 1:50 000. В случае более изрезанного побережья различия будут ещё значительнее.

Поэтому обычно измерения пространственных характеристик объектов реального мира включают и рассмотрение вопроса о необходимой и достаточной точности измерения, допустимой величине ошибки, источниках данных, методах и инструментах проведения измерений. В одних случаях требуется высокая инструментальная точность, как в описании землевладения в земельном кадастре, в других — достаточно визуальной качественной оценки, как это часто бывает при описании формы объекта.

Для более-менее однородных по тематике типов объектов, например, для озёр, могут рассматриваться их групповые пространственные характеристики. Например, определённые типичные формы бывают характерны для озёр, связанных своим происхождением с тектоническими разломами на древних щитах, другие формы характерны для озёр в местах активного развития многолетнемерзлых грунтов.

Как для описания изменчивых во времени пространственных характеристик одного объекта, так и для описания обобщённых, групповых характеристик нескольких однородных объектов часто используется один из вариантов такого обобщённого, генерализованного описания:

- 1) минимальное и максимальное значения характеристики или диапазон возможных значений;
- 2) среднее значение характеристики и характеристика степени её изменчивости (дисперсия, среднеквадратическое отклонение (СКО) и т. п.).

Обратим внимание, что ряд характеристик, упомянутых выше (которые можно рассматривать как пространственные), относящихся к группам объектов, фактически определяется характеристиками положения объекта и его атрибутивными (описательными) характеристиками. Например, это касается высотной поясности растительности или типов территории вблизи города.

Вообще, когда рассматриваются особенности взаиморасположения объектов, упорядоченности в их расположении, последовательности расположения, мы обычно не можем обойтись одними геометрическими или топологическими характеристиками, а учитываем атрибутивные характеристики объектов, задающие деление их на классы, ранжирование, степень подобия по значениям каких-либо непространственных параметров. Хотя из этого правила и есть исключения — постепенное расширения русла реки вниз по её течению.

## 2.2

### ГИС КАК ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ СРЕДСТВО

ГИС, в сущности, представляет собой средство, инструмент для представления, моделирования реального мира с помощью данных о том или ином месте в пространстве. *Геоинформационные технологии* — это технологии организации, манипулирования, анализа и представления пространственных данных.

Практически любая ГИС предоставляет собой набор различных средств, иногда огромный их арсенал, которые по желанию человека используются для выполнения различных функций. При этом такие средства всегда работают с информацией, содержащейся в системе в организованном виде — всей или какой-то её частью. Кроме данных, требуется само программное обеспечение,



реализующее функции ГИС, для работы которого необходимо некоторое компьютерное оборудование.

И, разумеется, требуется человек со своими знаниями и навыками, с пониманием потребностей в решении конкретных задач и способный взаимодействовать с системой, т. е. требуется некоторая организация различных ресурсов.

Далее приведём перечень наиболее важных процедур, реализуемых в ГИС, в сущности представляющих собой *геоинформационные технологии*.

*Ввод данных:* программы преобразования разнообразных форматов исходных данных для создания цифровых файлов данных и интерфейсов общего пользования, что позволяет потребителям формировать свои собственные программы, а также механизмы цифрования и устройства ввода текстов, обеспечивающие доступ к вводимым документам.

*Редактирование данных:* редактирование описания типа данных при вводе и обновлении цифровых файлов; редактирование мультибаз данных, ориентированных на данные нескольких типов.

*Хранение данных:* хранение данных в их естественных структурах, что позволяет избежать старения данных, обеспечивая их постоянное уточнение и обновление описаний содержания, характеристик и путей прохождения любого файла; управление доступом к файлам посредством монопольного использования или с помощью разделения функций; связь файлов через геосхему.

*Доступ к данным:* каталог данных, представляющий собой перечень всех имеющихся локальных и удалённых файлов; устройство поиска и выбора, которое располагает файлы в соответствии с параметрами, определёнными пользователем.

*Предварительная обработка данных:* устройства предварительной обработки изображений; геопривязка и классификация изображений по ссылке на данные об объекте и знания; геопривязка и трансформирование объекта по ссылке на таблицы и данные об объекте; кодирование и описание объекта, возможно по ссылке на видеоданные.

*Вывод данных:* программы преобразования форматов в популярные файлы и их приспособление для интерфейсов общего пользования, что позволяет потребителю формировать собственные выходные файлы; наличие классифицирующих данных для выходных файлов.

*Отображение данных на дисплеях и графопостроителях:* отображение на экране и вывод на графопостроитель комбинированных данных (например, трёхмерные виды, включающие изображение, объект и данные о рельефе); создание картографических произведений; наличие дисплеев, приспособленных для графического вывода на экран изображения и объекта.

*Сервисные программы:* простейшие операции, которые нужны пользователю для выбора данных. Они включают: пространственную ассоциацию файлов, которая базируется на их геосхемах и автоматически выполняет взаимное трансформирование; объединение файлов, включая пространственное перекрытие и пересечение для создания при необходимости новых файлов; поиск и выбор регионов и объектов по пространственным и описательным критериям; вычисления, получение отчётов, устройства отображения на экране и вывода на графопостроитель; преобразование различных типов данных.

*Интерфейс пользователя:* меню или выбираемый из меню интерфейс; наличие подсказки и обеспечение доступа к любому из имеющихся устройств; просмотр каталога данных, снабжённого механизмом поиска и выбора, который находит соответствующий файл; определение проекта, который выбирает геосхему (геосхемы), разделы памяти, процедуры и т. д.; определение геосхемы и установление последовательности простейших операций; определение задачи, в результате чего вырабатываются процедуры, упрощающие работу системы.

*Конфигурация системы:* существуют обязательные требования к проекту ГИС, которые непосредственно сказываются на её реализации в данной среде обработки; пользовательский интерфейс ГИС и концепция обработки данных не должны меняться от системы к системе; структура программного обеспечения ГИС должна быть модульной, что позволяло бы реализовать множество функциональных вариантов в соответствии со средствами, предлагаемыми вычислительной системой; сами функции ГИС должны быть многовариантными, обеспечивающими наиболее рациональное использование вычислительной техники.

## ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И РЕЖИМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИС

По типу выполняемых функций и по режиму использования геоинформационные системы могут значительно отличаться друг от друга. Например, от системы, используемой для поддержки принятия оперативных решений, может потребоваться практически непрерывно и быстро отвечать на запросы, обеспечивающие получение необходимой информации. В этом случае мы имеем систему запросного типа, типа информационно-поисковой системы.

Или же система может быть ориентирована на подготовку и оформление в заданном виде информации для её последующего использования уже вне системы. Например, система может готовить информацию по определённому запросу в виде таблиц или карт. Эти выходные документы могут готовиться на любом носителе — в бумажной или цифровой форме. Независимо от этого, такие формы выдачи результатов анализа или запроса, будучи предназначены для последующего использования, содержат обычно гораздо больше информации, чем в первом случае, и более сложны по форме. Режим же поддержки принятия оперативных решений требует быстрой реакции на запросы, которые должны быть по возможности сформулированы очень чётко и конкретно, а объём выдаваемой информации обычно невелик.

Два рассмотренных различных режима использования ГИС не исчерпывают всего спектра возможностей, но к ним или к их комбинации можно свести подавляющее большинство реальных ситуаций. Для обеспечения любого из этих режимов система в целом, так или иначе, должна быть способна выполнять несколько групп функций. Рассмотрим их в самом первом приближении.

Система должна обеспечивать средства для формирования цифрового представления пространственных объектов и явлений, иначе говоря, должны обеспечиваться функции сбора, кодирования и ввода информации.

Для поддержания массива данных в актуальном состоянии должны обеспечиваться средства редактирования, обновления, эффективного хранения данных, а также реорганизации данных и преобразования их в разные формы, средства для контроля правильности и качества данных.

Требуется обеспечивать средства для получения информации как в первичном её виде, так и обобщённой в различных смыслах (генерализованной, суммарной, усреднённой), а также средства для анализа, моделирования ситуаций и процессов и интегрирования разнородной информации.

Система должна обеспечивать выполнение сложных запросов на получение информации. Выполнение таких сложных запросов само по себе также является методом анализа.

Наконец, система должна представлять результаты работы в виде наглядных документов — таблиц, карт, диаграмм и т. п., привычных для восприятия человеком.

Таким образом, при всём многообразии операций, целей, областей информационного моделирования, проблемной ориентации и иных атрибутов,

характерных для создаваемых и действующих ГИС, логически и организационно в них можно выделить несколько конструктивных блоков, называемых также модулями или подсистемами, выполняющими более или менее чётко определённые функции, которые в свою очередь вытекают из четырёх основных типов решаемых ею задач: 1) сбора, 2) обработки, 3) моделирования и анализа, 4) их использования в процессах принятия решений (рисунок 13).

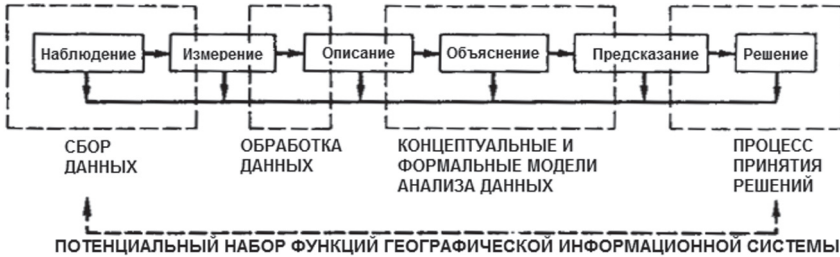


Рисунок 13. Функции ГИС

В некотором смысле, любая работающая ГИС является частью более общей инфраструктуры информационного обеспечения потребностей конкретных областей человеческой деятельности. При этом относительная и абсолютная роль ГИС (или, скажем иначе, — информационных систем для работы с пространственной информацией) уже сейчас весьма значима и продолжает возрастать.

Отметим, что с точки зрения информатики в любом районе Мирового океана всегда можно выделить составляющую реального наблюдения — например, поверхностное и глубинное распределение гидрофизических параметров (температура, солёность, плотность), течения, фронтальные и градиентные зоны, топография поверхности и дна со своими условиями динамики поверхностных вод, т. е. всё то, что создаёт реальные данные. Выделим также компоненту наших знаний обо всём этом, который может выражаться как в некоторой упорядоченной системе понятий, так и во вполне вещественных предметах, таких как бумажные планы и карты, документы и, например, компьютерные информационные системы. Все это вместе можно обозначить как информационную инфраструктуру.

Наряду с этим можно отдельно выделить также инфраструктуру управления, обеспечивающую рациональное природопользование и изъятие биологических ресурсов. В своей реальной деятельности она использует информационную инфраструктуру, описывающую объекты, отношения и процессы реальной экосистемы Мирового океана.

## ФИЗИЧЕСКАЯ КОМПОНЕНТА ГИС

В качестве «физической», «материальной» компоненты пространственной информационной системы (или ГИС) рассматривается компьютерное (аппаратное) обеспечение, понимаемое в широком смысле. Это не только сами компьютеры тех или иных типов, но также и разнообразные периферийные устройства, обеспечивающие хранение данных на внешних носителях информации, ввод и вывод информации в различной форме, а также оборудование компьютерных сетей и средств коммуникации, позволяющее различным, в том числе иногда и весьма удалённым компьютерам взаимодействовать друг с другом и обмениваться информацией.

## ПРОГРАММНАЯ КОМПОНЕНТА ГИС

В качестве программной компоненты конкретной работающей ГИС в первую очередь надо рассмотреть программное обеспечение, специально предназначенное для работы с пространственной информацией, т. е. сами геоинформационные системы разных классов, уровней и типов.

Но не только, не следует забывать, что реальная действующая ГИС всегда использует и другое программное обеспечение, как минимум, операционную систему компьютера. Нередко используется и дополнительное программное обеспечение для организации компьютерной сети, доступа в глобальную сеть интернет, организации дополнительной защиты информации от несанкционированного доступа. В отдельных случаях вместе с ГИС, во взаимодействии с ней, используется и дополнительное программное обеспечение для решения специальных задач, как, например, пакеты САПР или углублённого статистического анализа данных.

Если ГИС находится в процессе развития и совершенствования выполняемых ею функций, вместе с ней могут использоваться те или иные инструментальные средства программирования, такие как компиляторы и отладчики. ГИС может тесно взаимодействовать с общеофисным программным обеспечением, таким как текстовые редакторы, электронные таблицы, системы поддержки документооборота. Наконец, особо важную роль из других типов программных пакетов могут играть системы обработки данных дистанционного зондирования и СУБД. Относительно обоих этих типов ПО сегодня часто бывает трудно определить, являются ли они внешними по отношению к ГИС, или являются её частью, настолько высока в отдельных случаях степень их интеграции с ГИС.

Появление сетевых версий ГИС позволяют производить доступ и обработку данных в распределённых базах данных.

## ДААННЫЕ КАК КОМПОНЕНТА ГИС

Мы уже упоминали, что данные являются важнейшей компонентой любой функционирующей информационной системы, составляя нередко её наиболее ценную, в том числе и в прямом стоимостном смысле, часть. В ГИС, как в пространственных информационных системах, роль и стоимость компоненты данных в типичном случае многократно возрастает. Особенно актуальным это становится в случае использования данных дистанционного зондирования.

### 2.3 РАСТРОВОЕ И ВЕКТОРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ. ТИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ДАННЫХ

Пространственно распределёнными являются данные, содержащие информацию о двух- или трёхмерном распределении условий в различных координатно обусловленных точках. Существуют два основных типа пространственно распределённых данных: *растровые* и *векторные*.

*Растровые данные* возникают при получении изображений районов интереса фотографическим или электронным способом. При этом каждому *пикселю* (pixels — picture elements) изображения соответствует значение *интенсивности* исследуемой *физической величины*, и пиксели покрывают область интереса

рядами и колонками. Форма пикселей может быть квадратной и прямоугольной. Именно такими и являются спутниковые данные.

Минимальный элемент картирования или элемент разрешения представляет собой наименьший элемент, различаемый системой изображения. Чтобы избежать потери важных параметров изображения, размер пикселя должен быть меньше элемента разрешения.

Данные об изображении могут включать информацию, полученную в нескольких диапазонах спектра. Как правило, в системе ГИС данным, соответствующим различным спектральным диапазонам, соответствуют различные слои хранения данных. В процессе импортирования данных в ГИС, каждый спектральный диапазон становится независимым слоем информации, которая может обрабатываться по-разному. Положение пикселя в файле данных или при отображении на экране монитора задаётся с использованием соответствующей системы координат. В двумерной координатной системе положения пикселей задаётся на сетке строк и столбцов. Любое расположение на сетке задаётся парой координат  $X$  и  $Y$ . Координата  $X$  задаёт столбец сетки, в то время как координата  $Y$  отражает соответствующую строку. Данные изображения, организованные в такую сетку, и называются растровыми данными.

Обычно в ГИС используют две основные координатные системы:

*Файловые координаты* — отражают координаты пикселя в изображении (файл данных). Файловые координаты для пикселя, соответствующего верхнему левому углу изображения всегда начинаются с  $0,0$ .

*Картографические координаты* — отражают положение пикселя на карте и задаются географическими координатами в соответствующей картографической системе. Как правило, в ГИС существует возможность преобразования из одной картографической проекции в другую.

В то же время *векторные* данные представляют собой наборы, основанные на элементарных точках, положения которых известны и привязаны к карте местности. По сравнению с компьютерным представлением растровых данных, векторная графика значительно экономичнее, поэтому обычные карты создаются компьютером в векторной форме. Подобными данными являются массивы судовых измерений гидрологических, гидрохимических, гидробиологических и других данных.

Как векторные, так и растровые данные важны для пользователей ДДЗ, поскольку возрастает интерес к их комплексному использованию на единой картографической основе.

Векторные данные состоят:

- из точек, представляющих собой пару координат  $x, y$ . Точки могут показывать местоположение географического явления или точку без площади, например горную вершину;
- линий, являющихся наборами незамкнутых отрезков;
- полигонов, получающихся замыканием линий, ограничивающих площади с однородными свойствами.

Точки, определяющие начало, конец и точки излома линии называются *вертексами*. Концевые точки линий называют *узлами*. Каждая линия имеет два узла, первый, из которого вышла линия, и второй, в который она вошла. Начальный узел — первый вертекс в линии. Конечный узел — последний вертекс. Линии могут соединяться друг с другом только в узлах. Набор линий, у которых начальный узел первого отрезка совпадает с последним узлом последнего отрезка, является полигоном.

Векторные данные полностью описаны координатами вертексов. На рисунке 14 (см. с. 47) представлен процесс преобразования границы замкнутого объекта на карте в набор векторных данных.



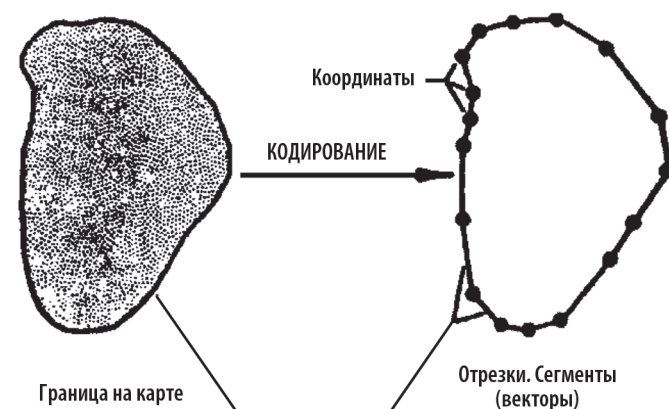


Рисунок 14. Векторное представление данных

Растровый слой может быть легко преобразован в векторный для использования в качестве дополнительного слоя в векторной базе данных. На рисунке 15 представлен результат преобразования растрового изображения в векторное и отчётливо проявляется разница между ними. Подобное преобразование, как правило, осуществляется с помощью соответствующего конвертора, встроенного в ГИС.

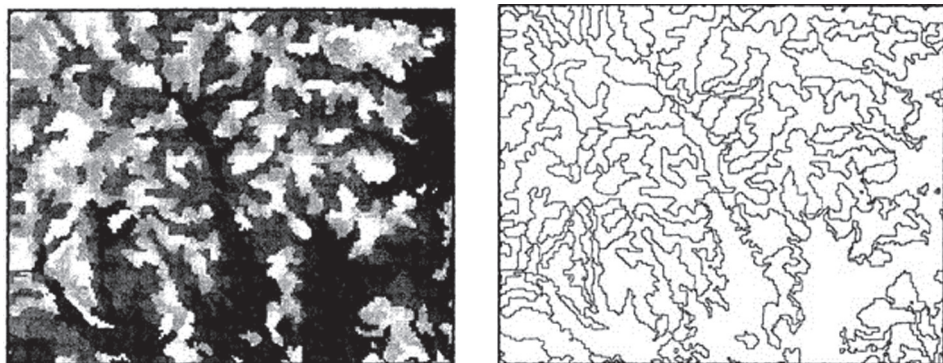


Рисунок 15. Сравнение растрового и векторного представления данных

## ГЕОКОДИРОВАННЫЕ ДАННЫЕ

*Геокодированные данные*, также известные как географически привязанные данные, подразумевают, что *пиксели* изображения соответствуют *географическим координатам*. Таким образом, геокодированные данные — это такие данные, которые получены трансформацией изображений ДЗ в соответствующую картографическую проекцию с определённым размером пикселя.

Исходные (сырые) данные ДЗ, получаемые определённым датчиком, установленным на спутнике или самолёте, не соответствуют никакой картографической системе. Процесс преобразования данных изображения ДЗ в плоское изображение, соответствующее выбранной картографической проекции, называется *ректификацией*.

Для понимания соотношения координат изображения и реальных картографических проекций рассмотрим кратко спутниковую систему координат.

## 2.4 СПУТНИКОВАЯ КООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА. ТИПЫ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В одной из космических координатных систем, применяемых учёными и инженерами, основой является географический центр Земли. Очевидно, что это очень удобный логический выбор, поскольку центр является фокусом для любых земных орбит. Задав центр, необходимо создать координатную систему, в которой можно производить условные измерения по отношению к центру Земли. Подобная система наиболее просто реализуется с помощью сферы.

Сфера Земли могла бы быть идеальной пробной координатной системой, если бы была зафиксирована в космосе, она же постоянно вращается. Тем не менее, *небесная сфера* часто используется в качестве координатной системы. Под этим подразумевается неподвижная сфера бесконечного радиуса, центр которой совпадает с центром Земли, на поверхности которой отображается проекция появляющихся в небе тел (предметов). *Небесный экватор* — это проекция земного экватора на небесную сферу. Соответственно, проекцию следа спутника легко получить, продолжая плоскость орбиты спутника до её пересечения с небесной сферой.

После того, как определены центр подобной системы координат и её экватор, необходимо задать начало отсчёта для измерения положения небесных тел в околоземном пространстве.

Этой точкой является точка пересечения небесного экватора с линией, проведённой из центра Земли к центру Солнца в момент перехода от зимы к весне, которая называется *весенним равноденствием*.

После того, как мы определили опорные точки координатной системы, необходимо дать определения самой орбите небесного тела. Первый термин — *долгота восходящего узла* ( $\Omega$ ), которая определяется как дуга небесного экватора, измеренная восточнее точки весеннего равноденствия в направлении восходящего узла (рисунок 16) [20].

*Восходящий узел* — это точка пересечения проекции орбиты спутника с небесным экватором. Другими словами, долгота восходящего узла — это угол, измеряемый восточнее из точки начала координат небесного экватора до точки, где спутник пересекает экватор в направлении с юга на север.

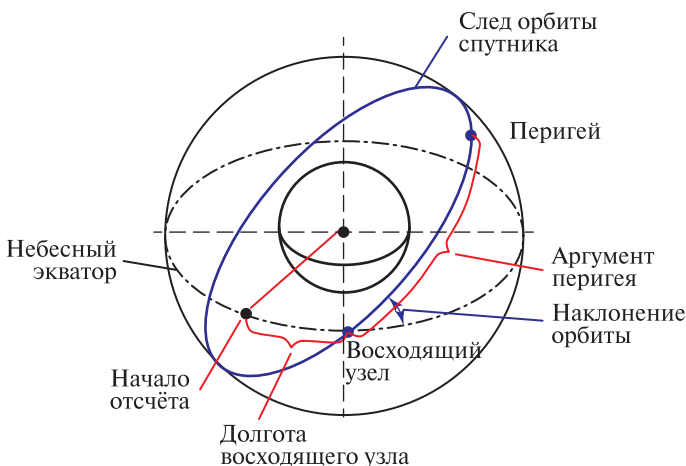


Рисунок 16. Небесная координатная система



Следующим по важности понятием является угол, образуемый пересечением плоскости орбиты спутника с плоскостью небесного экватора и называемый *углом наклона орбиты* ( $i$ ). Он измеряется против часовой стрелки от экватора в точке восходящего узла. Следовательно, экваториальные орбиты имеют  $i = 0^\circ$ , полярные —  $i = 90^\circ$ .

Следующий параметр, характеризующий орбиту — *перигей*. *Аргумент перигея*,  $\omega$ , — название углового измерения, выполненного от восходящего узла к перигею вдоль пути по орбите в направлении движения спутника.

Если в дополнение к координатам орбиты известно либо время перигея, либо время пересечения долготы восходящего узла совместно с *эксцентриситетом* и *главными осями орбиты*, то можно определить точное положение и скорость спутника в любой момент времени. Таким образом, шесть параметров (долгота восходящего узла, наклонение орбиты, аргумент перигея, эксцентриситет орбиты, главная ось, а также *эпохальное время* либо в перигее, либо в точке восходящего узла) определяют минимальное необходимое количество информации для описания положения спутника на орбите в любой момент времени. Они составляют набор орбитальных элементов, известный как *набор кеплеровых элементов*.

Другой интересный аспект искусственных спутников Земли (ИСЗ) касается *орбитальной плоскости* и связан с взаимосвязью места запуска ИСЗ и возможной орбитальной плоскостью. Данное ограничение вызвано тем обстоятельством, что центр Земли должен быть фокусом орбиты и должен лежать в плоскости орбиты. Существует формула, определяющая угол наклона плоскости орбиты  $i$  в зависимости от широты места запуска ИСЗ и азимутального направления движения ракетносителя, измеренного по часовой стрелке от северного полюса.

$$\cos i \text{ (наклонение)} = \cos \text{ (широта)} \cdot \sin \text{ (азимут)}. \quad (1)$$

Например, спутник, запущенный с мыса Канаверал на широте  $30^\circ$  с. ш. в направлении на восток (азимут  $90^\circ$ ), в соответствии с формулой (1) будет помещён в орбитальную плоскость, наклонённую на  $30^\circ$  к плоскости экватора.

Отсюда можно заключить, что широта места запуска будет достаточно точно определять минимальное наклонение плоскости орбиты для прямого (не маневрирующего) запуска. Однако практически все космодромы допускают запуск спутников от минимальных углов наклона орбиты (примерно равных широте стартовой площадки) до полярных орбит, имея в виду отсутствие географических ограничений на азимут запуска, за исключением диапазона обеспечения безопасности пуска.

Например, прямой пуск с базы Ванденберг, Калифорния, ( $35^\circ$  с. ш.) обеспечивает плоскости наклонения орбиты от  $35$  до  $145^\circ$ .

## ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ ОРБИТЫ

*Геостационарной* называется такая орбита, на которой спутник кажется неподвижным относительно поверхности Земли.

Если спутник движется по орбите, параллельной экватору в том же самом направлении, что и вращение Земли и с тем же самым периодом 24 ч, спутник будет казаться неподвижным относительно земной поверхности. Спутники на геостационарных орбитах расположены на большой высоте в 36 000 км. Эти орбиты позволяют спутнику постоянно рассматривать одну и ту же значительную по размерам область на Земле. Геостационарные орбиты обычно используются метеорологическими и связными спутниками.

Большая высота этой орбиты позволяет обозревать большие области Земли и особенно экваториальную часть и средние широты, наиболее интересные с точки зрения формирования погодных процессов. Высокие северные и южные широты ( $50...60^\circ$ ) менее удобны для наблюдения, но и здесь различимы крупномасштабные объекты, такие как граница снежного покрова, циклоны, зоны осадков и др. Три спутника на таких орбитах способны обеспечить полный обзор всей приэкваториальной зоны, средних, а также частично высоких южных и северных широт.

Неподвижность относительно поверхности Земли спутников на стационарной орбите делает её особенно предпочтительной. В этом случае наземные объекты и процессы могут наблюдаться сколь угодно долго при неизменном относительном положении к спутнику. Это позволяет наилучшим образом выявить изменение их состояния и проследить за всем циклом развития — от зарождения до разрушения. Кроме того, появляются большие возможности по использованию большого времени экспозиции: на время экспозиции в этом случае не оказывает влияние скорость относительного движения спутника и поверхности Земли. Решающим фактором становится длительность просмотра всей области Земли, что определяет оперативность наблюдения, а также требование к точности угловой стабилизации, влияющей на «смаз» изображения при съёмке наземного сюжета.

Спутники на геостационарной орбите удобны в управлении и в организации наземных средств приёма информации. Каждый из них может управляться с одной станции, на неё же может передаваться и измерительная информация. При этом антенные устройства станций могут быть неподвижными.

В принципе спутник движется вокруг земли по эллиптической орбите. Время, необходимое для совершения одного полного оборота орбиты, называется *орбитальным периодом*. Проекция орбиты спутника на земную поверхность называется *подспутниковой трассой*. Поскольку Земля вращается, подспутниковые трассы создают различные траектории на поверхности в каждом последующем цикле. Спутники ДЗ часто запускаются на специальные орбиты так, что спутник повторяет подспутниковую трассу после установленного временного интервала. В этом случае временной интервал называется *циклом повторения* или *изомаршрутным циклом* спутника.

Существует отдельная разновидность орбит с периодом обращения КА близким к 24 ч, при этом с наклоном отличным от  $0^\circ$ . Такие орбиты называют *геосинхронными*.

## НИЗКИЕ КРУГОВЫЕ ОРБИТЫ

*Приполярная орбита* — это такая орбита, плоскость которой наклонена под небольшим углом относительно оси вращения Земли. Спутник, движущийся по правильно созданной приполярной орбите, пролетает близко к полюсам и способен охватить почти целиком всю земную поверхность в одном цикле повторения (рисунок 17, см. с. 51).

Спутники наблюдения Земли обычно движутся по *солнечно-синхронным орбитам*. Солнечно-синхронной называется такая приполярная орбита, угол между плоскостью которой и направлением на Солнце остаётся постоянным во времени. А это значит, что спутник будет всегда пролетать над одной и той же территорией на заданной широте в одно и то же местное солнечное время. Таким образом, для изображений заданного местоположения, полученных спутником, может быть достигнуто одинаковое солнечное освещение (за исключением сезонной изменчивости).

Для такой орбиты *прецессия восходящего узла*, вызываемая полярным сжатием Земли, происходит с той же средней скоростью и в том же направлении, что и движение среднего экваториального Солнца, т. е.

$$2\pi \frac{\varepsilon \cdot \cos i}{\mu P^2} \cdot \frac{1}{T_c} = 2\pi \frac{1}{T_3}, \quad (2)$$

где  $T_c$  — драконический период обращения спутника;  $T_3$  — период обращения Земли вокруг Солнца;  $\varepsilon = 2,634 \cdot 10^{10} \text{ км}^2$  — постоянная сжатия Земли;  $\mu = 3,986 \cdot 10^3 \text{ км}^3 \cdot \text{с}^{-2}$  — произведение гравитационной постоянной на массу Земли;  $P = a(1 - e)$  — параметр орбиты;  $a, e, i$  — большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты соответственно.



Рисунок 17. Приполярная орбита

Использование солнечно-синхронной орбиты даёт возможность проводить съёмку местности в практически постоянных условиях по освещённости Солнцем. За время работы спутника это позволяет обеспечить наилучшие условия для съёмки всех интересующих районов Земли. Кроме того, постоянство освещённости и взаимного расположения спутника и Солнца относительно наблюдаемой территории создают благоприятные условия для фотометрической обработки снимков. В этом случае упрощается задача составления каталога — он может быть организован для узкого диапазона значений освещённости и взаимного расположения лучей Солнца и оптической оси спутникового датчика относительно снимаемого объекта.

Солнечно-синхронные орбиты обладают высокой устойчивостью, здесь имеется в виду сохранение постоянства угла Солнца с плоскостью орбиты при наличии ошибки выведения спутника. Если эти ошибки не превышают нескольких десятков километров по координатам и десяти метров в секунду по скорости (что имеет место для современных носителей), то угол Солнца с плоскостью орбиты изменится за год на величину, не большую, чем  $5 \dots 10^\circ$ . Такие отклонения могут считаться допустимыми или в случае необходимости (при времени существования спутника в несколько лет) могут быть скомпенсированы корректирующим удельным импульсом тяги спутника, не превышающим  $20 \dots 30 \text{ м/с}$ , который может быть реализован с помощью бортовой двигательной установки.

## 2.5 КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЕКЦИИ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЕКЦИИ

Картографические проекции позволяют представлять области земной поверхности (в общем виде эллипсоида) на карте (плоской поверхности). Таким образом, точное положение объекта на земной поверхности может быть вычислено по карте.

Все картографические проекции в некоторой степени искажают форму объектов, площадь, расстояние или направление. Воздействие этого искажения на вашу работу зависит от предназначения карты и от её масштаба.

В большинстве бизнес-приложений характеристики картографической проекции не имеют принципиального значения. Бизнес-приложения обычно используют относительное расположение пространственных объектов вместо их точной локализации на земной поверхности.

На крупномасштабных картах, типа плана улиц, искажение от проекции незначительно, потому что ваша карта отображает только небольшую часть поверхности земли.

На мелкомасштабных картах, типа региональных или всемирных, где малое расстояние на карте соответствует значительному расстоянию на земной поверхности, искажение проявляется в большей степени, особенно если ваше приложение использует сравнение форм объектов, площадей и расстояний между различными объектами. В этом случае становится более важным знание характеристик проекции.

ГИС работает с пространственными данными из различных источников. В зависимости от вашего приложения и масштаба, с которым вы работаете, иногда очень важно знать какая проекция используется для каждого источника данных, чтобы избежать использования данных с разными проекциями в одном виде. Для гарантии точности и качества вашей работы вы должны удостовериться, что все используемые вами исходные данные (все источники данных) находятся в одной картографической проекции.

Тип используемой картографической проекции влияет как на эстетические, так и на геометрические свойства, однако для большинства основных задач, решаемых с помощью ГИС, это влияние мало.

## КЛАССИФИКАЦИЯ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ

По *характеру искажений* различают следующие картографические проекции [21]:

- Равновеликие, в которых на карте отсутствуют искажения площадей, следовательно, соотношения площадей территорий передаются правильно. В этих проекциях карты больших территорий отличаются значительными искажениями углов и форм.
- Равноугольные, в которых на карте отсутствуют искажения углов. Вследствие этого в них не искажаются также формы бесконечно малых фигур, а масштаб длины в любой точке остаётся одинаковым по всем направлениям. В этих проекциях карты больших территорий отличаются значительными искажениями площадей.
- Равнопромежуточные, в которых масштаб длины по одному из главных направлений сохраняется постоянным. В них искажения углов и искажения площадей как бы уравновешены.
- Произвольные, в которых на карте в любых соотношениях имеются искажения и углов, и площадей.

Различают проекции по виду вспомогательной поверхности, на которую проектируется земной эллипсоид или шар при его отображении на плоскости:

- азимутальные, в которых поверхность эллипсоида или шара переносится на касательную к ней или секущую её плоскость;
- цилиндрические, в которых поверхность эллипсоида или шара переносится на боковую поверхность касательного к ней или секущего её цилиндра, после чего последний разрезается по образующей и развёртывается в плоскость;

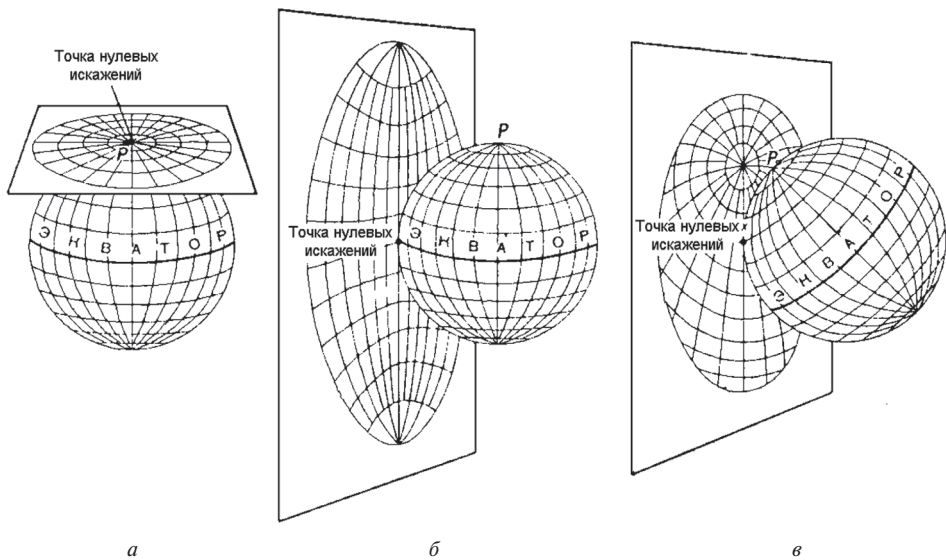
- конические, в которых поверхность эллипсоида или шара переносится на боковую поверхность касательного к ней или секущего её конуса, а затем последний разрезается по образующей и развёртывается в плоскость.

По ориентировке вспомогательной поверхности относительно полярной оси или экватора эллипсоида или шара различают проекции:

- нормальные, в которых ось вспомогательной поверхности совпадает с осью земного эллипсоида или шара; в азимутальных проекциях плоскость перпендикулярна к полярной оси;
- поперечные, в которых ось вспомогательной поверхности лежит в плоскости экватора земного эллипсоида или шара и перпендикулярна к полярной оси; в азимутальных проекциях плоскость перпендикулярна к нормали, лежащей в экваториальной плоскости поверхности;
- косые, в которых ось вспомогательной поверхности совпадает с нормалью, находящейся между полярной осью и плоскостью экватора земного эллипсоида или шара; в азимутальных проекциях плоскость к этой нормали перпендикулярна.

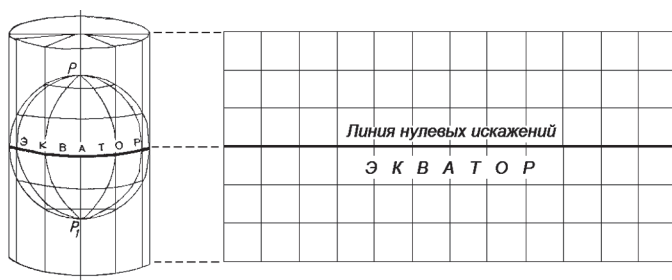
Различные положения касательной плоскости в азимутальных проекциях показаны на рисунке 18. На рисунке 19 (см. с. ) изображены положения касательного цилиндра в цилиндрических проекциях. Конические проекции обычно применяют в нормальной ориентировке (рисунок 20, см. с. ).

В косых и поперечных проекциях картографические сетки отличаются от сетки нормальных проекций. В этих проекциях с нормальной сеткой схожи сетки вертикалов и альмукантаратов. Вертикалы и альмукантараты можно рассматривать как смещённые меридианы и параллели, получившиеся после перемещения географического полюса в положение  $Q$  (рисунок 21, см. с. ), которое показано в косой ориентировке. В поперечной ориентировке полюс  $Q$  лежит на экваторе, а в нормальной — совпадает с географическим полюсом.

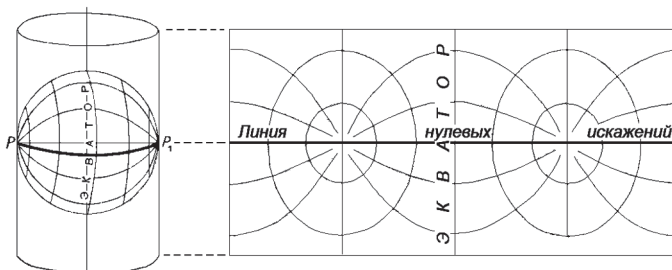


**Рисунок 18.** Положение касательной плоскости относительно референц-поверхности и вид картографической сетки в нормальной (*а*), поперечной (*б*) и косой (*в*) азимутальных проекциях

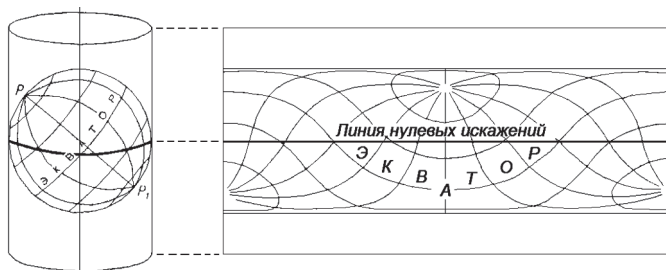
2.5. КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЕКЦИИ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.  
КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЕКЦИИ



а

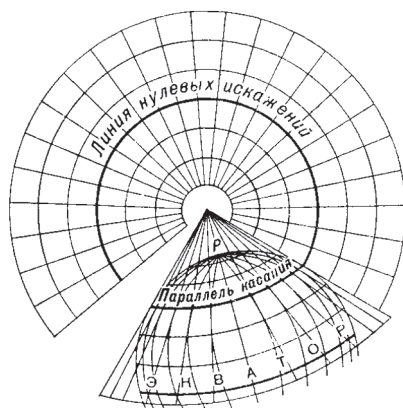


б



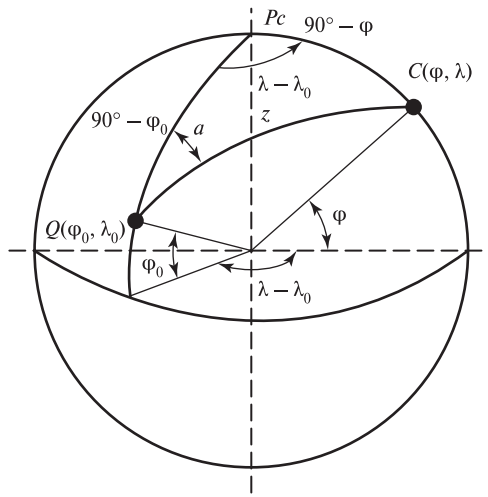
в

**Рисунок 19.** Положение касательного цилиндра относительно референц-поверхности и вид картографической сетки в нормальной (б), поперечной (а) и косой (в) цилиндрических проекциях



**Рисунок 20.** Положение касательного по параллели конуса относительно референц-поверхности и вид картографической сетки в нормальной конической проекции





**Рисунок 21.** Сферические полярные координаты  $z$  и  $a$  и их взаимосвязь с географическими координатами

Положение вертикала определяется азимутом  $a$  — двугранным углом между плоскостью меридиана полюса  $Q$  и плоскостью, проведённой через нормаль в точке  $Q$  в направлении на текущую точку  $C$  (см. рисунок 21). Положение альмукантарата определяется зенитным расстоянием  $z$ , отсчитываемым от полюса  $Q$  до текущей точки  $C$ . Вертикалы — линии, для которых  $a = \text{const}$ , альмукантараты — линии, для которых  $z = \text{const}$ .

После перемещения на поверхности относительно полюса  $Q$  в географический полюс вертикалы совпадают с меридианами, альмукантараты — с параллелями. В случае шара вертикалы — дуги больших кругов, альмукантараты — дуги малых кругов. Величины  $z$ ,  $a$  называют полярными сферическими координатами. Переход от широты  $\varphi_0$ , долготы  $\lambda$  к азимуту  $a$  и зенитному расстоянию  $z$  осуществляется по формулам сферической тригонометрии:

$$\cos z = \sin \varphi \cdot \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \cos(\lambda - \lambda_0), \quad (3)$$

$$\text{ctg } a = \text{tg} \varphi \cdot \cos \varphi_0 \cdot \text{cosec}(\lambda - \lambda_0) - \sin \varphi_0 \cdot \text{ctg}(\lambda - \lambda_0), \quad (4)$$

где  $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$  — широта и долгота полюса  $Q$ . В случае поперечной ориентировки  $\varphi_0 = 0$  и формулы упрощаются.

В нормальной ориентировке вспомогательные поверхности касаются эллипсоида или шара по какой-то параллели или пересекают их по двум параллелям. На этих параллелях сохраняется главный масштаб длины, и их называют главными параллелями.

По виду *нормальной картографической сетки* прежде всего выделяют проекции, в которых параллели изображаются на плоскости линиями постоянной кривизны, т. е. прямыми линиями, окружностями или их дугами.

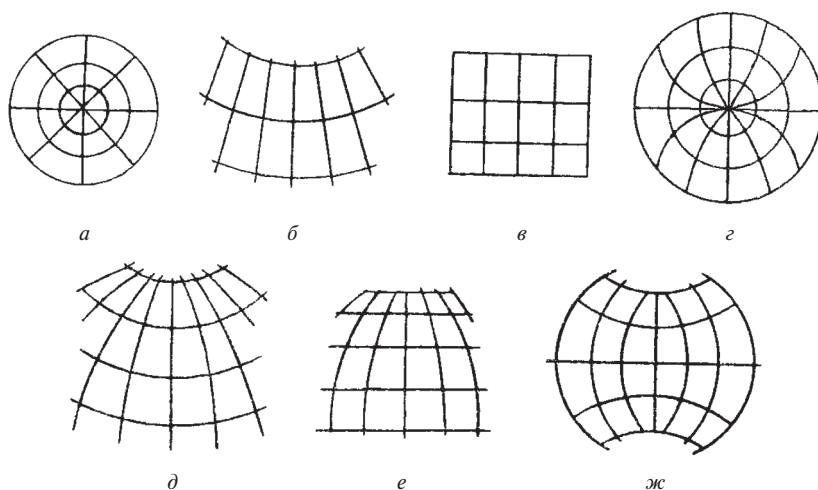
Наиболее распространённые картографические проекции показаны на рисунке 22:

- *азимутальные* (рисунок 22а), в которых параллели изображаются концентрическими окружностями, а меридианы — прямыми, исходящими из общего центра параллелей под углами, равными разности их долгот;
- *конические* (рисунок 22б), в которых параллели изображаются дугами концентрических окружностей, а меридианы — прямыми, расходящимися из общего центра параллелей под углами, пропорциональными



разности их долготы; известны также обобщённые конические проекции, которые отличаются от конических тем, что угол между прямыми меридианами есть более сложная функция долготы;

- *цилиндрические* (рисунок 22в), в которых меридианы изображаются равноотстоящими параллельными прямыми, а параллели — перпендикулярными к ним прямыми, в общем случае не равноотстоящими; известны обобщённые цилиндрические проекции, в которых расстояния между меридианами есть более сложная функция долготы;
- *псевдоазимутальные* (рисунок 22г), в которых параллели изображаются концентрическими окружностями, меридианы — кривыми, сходящимися в точке полюса; средний меридиан — прямой;
- *псевдоконические* (рисунок 22д), в которых параллели изображаются дугами концентрических окружностей, средний меридиан — прямой, проходящей через их общий центр, а остальные меридианы — кривыми;
- *псевдоцилиндрические* (рисунок 22е), в которых параллели изображаются параллельными прямыми, средний меридиан — прямая, перпендикулярная к параллелям, а остальные меридианы — кривые или прямые, наклонённые к параллелям;
- *поликонические* (рисунок 22ж), в которых параллели изображаются дугами эксцентрических окружностей с радиусами тем большими, чем меньше их широта, средний меридиан — прямой, на которой расположены центры всех параллелей, остальные меридианы — кривые.



**Рисунок 22.** Изображения меридианов и параллелей нормальных сеток наиболее распространённых классов картографических проекций

Проекции, которые получают *перспективным* проектированием точек поверхности, чаще всего шара, на плоскость, поверхность цилиндра или конуса различают по типу вспомогательных поверхностей. Соответственно получают *перспективные* азимутальные, цилиндрические или конические проекции. Практическое применение имеют две первые.

В зависимости от того, где расположен центр проектирования (точка глаза), получают проекции *гномонические* — проектирование из центра шара, *стереографические* — проектирование с поверхности шара, внешние — точка глаза за пределами шара на конечном расстоянии от него, *ортографические* — проектирование из бесконечности параллельными прямыми лучами. Если

шар проектируется изнутри — получают *перспективные проекции с негативным изображением*.

При проектировании снаружи, когда из центра проектирования (точки глаза) видна внешняя поверхность шара, получают *проекцию с позитивным изображением*.

## СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ. РАВНОВЕЛИКАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ

Метод проектирования — цилиндрический. Это нормальная перспективная проекция по касательной цилиндра — экватору. Меридианы и параллели — прямые линии с прямыми углами между ними. Меридианы равноудалены через 0,32 часть экватора, где экватор является главной параллелью. При удалении главной параллели от экватора возрастает длина меридиана. Полюса — линии с длиной, соответствующей экватору.

Объекты правильны вдоль главных параллелей в нормальном виде. Объекты несколько искажаются ближе к полюсам. Искажений площади нет. Локальные углы корректны вдоль главных параллелей или главных линий. Иначе направление искажается.

Масштаб правильный вдоль экватора, ближе к полюсам масштаб искажается.

Рекомендуется для незначительных площадей вдоль главной линии. Некоторое искажение объектов и масштаба будет при приближении к полюсам. Пригодна для экваториальных областей.

## ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ (GEOGRAPHIC)

Это не картографическая проекция. Принцип её использования заключается в удалении проекции, связанной с видом. Система координат определена широтой и долготой. Эта система рассматривает земной шар как сферу или эллипсоид. Сфера разделена на 360 равных частей равными частями — градусами. Каждый градус может далее делиться на 60 минут. Стандартное начало — от *Гринвичского основного меридиана* в точке пересечения с экватором. Все точки севернее экватора и восточнее основного меридиана — положительны. Земной шар делится на четыре квадранта: северо-западный, северо-восточный, юго-западный и юго-восточный. Каждая линия долготы проходит с севера на юг и измеряется в градусах, начиная от основного меридиана. Диапазон значений — от положительных 180°, до отрицательных 180°. Линии широты проходят с запада на восток и измеряются в градусах, начиная от экватора. Диапазон значений от северного полюса — положительное число в пределах 90°, до южного полюса — отрицательное число в пределах 90°.

## КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ МЕРКАТОРА

Первоначально создана для точного отображения направлений в соответствии с показаниями компаса путешествующих по морям. Дополнительным свойством этой проекции является точное отображение формы отдельных объектов.

Метод проектирования — цилиндрическая проекция. Меридианы параллельны друг другу на всем протяжении. Линии широты также параллельны, но постепенно расходятся в направлении полюсов. Полюса показать нельзя.

Линии пересечения — экватор. Также могут быть две секущие по двум широтам, симметричным относительно экватора.

Форма объектов — конформная (сохраняются углы). Небольшие объекты отображаются хорошо, потому что эта проекция поддерживает локальные угловые связи.

Площадь — искажения возрастают по направлению к полярным областям. Например, на карте мира в проекции Меркатора Гренландия будет больше, чем Южная Америка, в действительности её площадь в восемь раз меньше, чем у Южной Америки.

Направление — любая прямая линия, изображаемая в этой проекции, фактически представляет показание компаса. Линии истинного направления упоминаются как румб (rhumb) линии. Следует отметить, что эти линии в целом не показывают кратчайшего расстояния между пунктами (точками).

Едиственный истинный масштаб — вдоль экватора, или по секущим широтам.

В проекции Меркатора полюса показать нельзя. Можно показать все меридианы, но они будут ограничены примерно 80 градусом северной и южной широты. Значительные искажения площади не позволяют использовать проекцию Меркатора для общегеографических карт мира.

Использование и приложения — стандартные морские навигационные карты (направление). Другие приложения, где в основном нужно корректное направление: воздушные перелёты, направления воздушных потоков, океанические течения, сохраняющие конформность (равноугольные) карты мира.

Оптимально использовать эту проекцию для экваториальных районов, например Индонезии и соответствующих частей Тихого океана.

## СТЕРЕОГРАФИЧЕСКАЯ КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ

Из всех азимутальных проекций только одна равноугольна — стереографическая.

Метод проектирования: плановая перспективная проекция, просматриваемая из точки на глобусе (через глобус) напротив точки касания. Все меридианы и параллели показаны как концентрические дуги или как прямые. Пересечения равны  $90^\circ$ , с точки зрения экватора, кривые параллелей противоположны в разных направлениях от экватора. Параллели противоположны в знаках от главной широты, которая является прямой; другие параллели вогнуты к полюсам по каждую сторону от прямой параллели.

Точка касания — одна любая точка на глобусе. Точки, представляющие северный и южный полюса могут быть использованы в выборе проекций: стереографическая (Северный полюс) и стереографическая (Южный полюс).

Линейная сетка — плоскость проектирования касается полюса: все меридианы.

Плоскость проектирования касается экватора: средний меридиан и экватор.

Плоскость проектирования касается любой точки между полюсом и экватором: средний меридиан и параллель со знаком, противоположным главной параллели.

Объекты — подобны. Локальные объекты корректны.

Площадь — правильный масштаб в центре. Искажения увеличиваются при удалении от центра. От центра — направления корректны. Локальные углы корректны везде.

Масштаб увеличивается с расстоянием от центра.

Нормально ограничено одним полушарием, радиус в  $90^\circ$  от центра. Часть другой полусферы может быть показана, но с сильно возрастающими искажениями.

Может быть использована для карт округлых регионов на Луне, Марсе и Меркурии.

## UTM

Для универсальной поперечной системы Меркатора (Universal Transverse Mercator System — UTM), земной шар делится на шестьдесят зон, каждая в шесть градусов долготы. Каждая зона имеет собственный средний меридиан. Эта проекция — частный случай поперечной проекции Меркатора.

Метод проектирования — каждая зона UTM имеет собственный средний меридиан, расположенный в  $3^\circ$  от западного края зоны и соответственно в  $3^\circ$  от восточного края. Цилиндрическая методология такая же, как и для поперечной проекции. Необходимо обратить внимание, что позиция цилиндра систематически поворачивается вокруг земного шара. Координаты  $X$  и  $Y$  записываются в метрах. Расположение каждой зоны определяется экватором и средним меридианом. Для устранения отрицательных координат проекция изменяет значения координат в зависимости от местоположения. Значения восточнее среднего меридиана ложны, как и значения севернее экватора. Для значений расположения в северном полушарии применяется ложный сдвиг на восток 500 000, и на север 0. Для значений расположения в южной полусфере применяется ложный сдвиг на восток 500 000 и на север 10 000 000.

Линии сечения — две параллельные линии приблизительно в 180 км каждая от центрального меридиана зоны UTM.

Объекты — подобны. Точное представление небольших объектов. Минимальное искажение больших объектов.

Площадь — минимальные искажения внутри каждой зоны UTM.

Направление — локальные углы правильны.

Масштаб постоянен вдоль среднего меридиана, но с масштабным коэффициентом 0,9996 для уменьшения бокового искажения внутри каждой зоны. С таким коэффициентом масштаба линии, находящиеся в 180 км к востоку и западу от среднего меридиана и параллельные ему, имеют масштабный коэффициент 1,0.

Ошибки в масштабе внутри каждой зоны не более 0,1 %. Ошибки и искажения увеличиваются для областей, охватывающих более чем одну зону UTM.

Использование и приложения. Топографическая сетка Соединённых Штатов Америки масштаба 1:100 000. Крупномасштабное топографическое картирование России. Среднемасштабные карты регионов во всем мире.

## СВОЙСТВА КАРТ. МАСШТАБ КАРТЫ

*Масштаб карты* — связь между расстоянием на карте и расстоянием на поверхности земли. Масштаб обычно выражается как отношение (коэффициент) между расстоянием на карте и расстоянием на земной поверхности, например 1:63 360.

Отношение (коэффициент) масштаба 1:63 360 означает, что одна единица расстояния на карте представляет 63 360 тех же самых единиц расстояния на земной поверхности. Так, на карте масштаба 1:63 360 один дюйм на карте равняется одной миле на земной поверхности, потому что одна миля содержит в себе 63 360 дюймов.

Так как коэффициент масштаба — константа, это истинно для любых единиц измерения, в которых определена дробность. Так, на карте с масштабом 1:24 000 один сантиметр равняется 24 000 сантиметрам на земной поверхности, точно как один дюйм представляет 24 000 дюймов.

## КРУПНОМАСШТАБНЫЕ И МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ КАРТЫ

*Крупномасштабная* карта — карта, в которой данная часть земной поверхности представлена большой площадью карты. Крупномасштабные карты более подробны по сравнению с мелкомасштабными, так как на них больше пространства для отображения деталей. Крупномасштабные карты обычно используются для отображения планов местности, отдельных областей и городов. Масштаб 1:2 500 — пример крупномасштабной карты.

*Мелкомасштабная* карта — карта, в которой данная часть земной поверхности представлена небольшой площадью карты. Мелкомасштабные карты менее подробны по сравнению с крупномасштабными, но отображают большую часть земной поверхности. Региональные, национальные и международные карты обычно имеют небольшие масштабы, типа 1:1 000 000.

Обратите внимание, что чем больше масштаб карты, тем меньше номер обозначающий его. Например, карта 1:18 000 имеет более крупный масштаб, чем карта 1:136 000.

## ДЕТАЛЬНОСТЬ КАРТЫ

Естественно приравнять подробность и точность карт. Однако когда мы говорим о подробности карты, мы говорим о количестве представленной на ней географической информации. Точность карты, с другой стороны, является показателем качества этой информации.

Крупномасштабные карты обычно показывают большее количество подробностей, чем мелкомасштабные карты, но нет никакого стандартного правила для определения того, сколь *детально* должна отображать все черты местности карта данного масштаба, и с какой точностью. Это определяется картографической задачей и числом обозначений на доступном пространстве, без помех для просмотра.

На картах мелкого масштаба просто недостаточно места, чтобы показать все доступные детали, так что объекты типа потоков и путей сообщения часто представляются как линии, а объекты, подобные городам, представляются как точки. Это называется обобщением (генерализацией).

При обобщении подробности уменьшаются, чтобы не перегрузить карту, но общая форма и положение объектов сохраняются. То есть мелкомасштабная карта береговой линии не будет отображать каждую бухту, в отличие от крупномасштабной карты. Мелкомасштабные карты могут также полностью опускать детали.

Пространственные данные обычно уже обобщены. Например, данные ESRI ArcUSA 1:25 000 000 по USA содержат меньшее количество деталей (и намного меньший набор данных), чем данные ESRI ArcUSA 1:2 000 000. Данные масштаба 1:25 м были обобщены из данных масштаба 1:2 м. Пространственные данные могут быть также обобщены (генерализованы) уже после их создания.

## ТОЧНОСТЬ КАРТЫ

*Точность* карты не зависит от масштаба карты. Она зависит от точности первоначальных (исходных) данных, используемых при построении карты, от точности переноса этих данных на карту, и разрешающей способности при выводе на печать или отображении карты.

При создании пространственных данных используются уже готовые карты, которые могли быть оцифрованы или сканированы, или другие первичные

материалы, типа отчётов, аэрофотографий, изображений, а также данные, полученные со стороны. Ваша конечная карта будет отражать точность всех этих исходных материалов.

Не забывайте, что при уменьшении масштаба одна единица измерения на карте представляет большее расстояние на земной поверхности. Так, если один из объектов, показанный на очень мелкомасштабной карте, сдвинут на небольшую долю миллиметра, в действительности это представляет реальную погрешность на земной поверхности.

Всегда важно помнить, что точность карты определяет достоверность ваших данных.

## РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КАРТЫ

*Разрешающая способность* карты определяет, с какой точностью объекты на карте могут быть описаны при данном масштабе. Разрешающая способность зависит от физических характеристик карты, метода её изготовления, от того, какие виды символов используются, и от того, каким образом выведена карта на экран, или на печать.

Например, представьте, что вы делаете карту границ собственности в масштабе 1:63 360 и используете символ граничной линии (проходящей по внешнему краю) толщиной в 1/100 дюйма. Толщина этой линии в реальности представляет коридор на земле шириной почти 15 м! Разрешающая способность тех символов, которые масштабируются, несомненно, влияет на уровень детальности и точности карты.

Точно так же, разрешающая способность экрана вашего компьютера влияет на детальность и точность выводимых на него карт. Экраны используют пиксели для отображения карт и не могут отобразить детали или их части, которые меньше ширины пикселя.

Карта, основанная на высокоточных пространственных данных, потеряет точность, если она напечатана или отображается на устройстве с низкой разрешающей способностью.

Все сказанное выше для карт справедливо и для изображений ДЗ. Развитие ГИС послужило мощным толчком к интенсификации использования данных ДЗ в конце 1980 — начале 1990 гг. Важным направлением развития ГИС является стандартизация форматов данных, используемых в них, включая космические данные от различных спутниковых платформ.

Вопрос стандартизации данных, используемых в ГИС настолько важен, что в США даже было создано специальное федеральное агентство: Federal Geographic Data Committee [22]. Среди многих других вопросов данный комитет является лидером в обеспечении применения различных программных пакетов в ГИС, обеспечивая их совместимость в федеральных правительственных учреждениях. Так, с февраля 1994 г. все федеральные агентства обязаны покупать аппаратно-программные средства, позволяющие передавать данные между несовместимыми системами. Для обмена подобными данными был принят специальный стандарт (Federal Information Processing Standard — FIPS).

## 2.6 ВВЕДЕНИЕ В НЕОГЕОГРАФИЮ

Безусловно, появление ГИС в своё время было чрезвычайно революционным событием для специалистов, занимавшихся вопросами интерпретации космической информации, поскольку такой инструмент впервые позволил на единой картографической основе производить комплексный анализ разнородной



информации. Однако сегодня это уже далеко не самый современный инструмент. С появлением таких сервисов, как Google Earth и аналогичных, обозначился явный тренд к переходу к работе с пространственной геоинформацией практически в реальном масштабе времени. Принципиально новым стало то, что исчезла необходимость во множестве взаимных преобразований данных в различные картографические форматы, кроме того, появилась возможность гибкого масштабирования получаемого информационного продукта. Первое сообщение о появлении новой информационной технологии, получившей название *неогеография* принято соотносить с работой [23], в которой было предложено следующее определение: «Неогеография объединяет воедино сложные технологии картографии и ГИС и делает их доступными для пользователей и разработчиков».

Следует отметить, что как вокруг самого термина, так и по предметной области нового направления продолжается непрерывная дискуссия классических географов и сторонников нового подхода. Время, безусловно, расставит все точки в этом споре.

Приведём основные соображения сторонников использования принципов неогеографии в использовании различных данных ДЗЗ (дистанционного зондирования Земли) в интересах повышения эффективности управления различными отраслями народного хозяйства. Для анализа использованы данные работ Е. Н. Еремченко с соавторами.

В работе [24] Е. Н. Еремченко даёт определение понятия неогеографии как нового подхода к работе с геопространственной информацией, отличающегося от предыдущих (традиционных карт и геоинформационных систем — ГИС) тремя основными признаками:

- использованием географических, а не картографических, систем координат;
- применением растрового, а не векторного представления географической информации в качестве основного;
- использованием открытых гипертекстовых форматов представления геоданных.

При этом разработчики новой идеологии предложили, чтобы сущностное содержание обработки геопространственных данных создавалось самими пользователями, которые, как правило, не являются географами-профессионалами. Первые и наиболее известные сервисы, реализованные в идеологии неогеографии — Google Earth и Google Maps сегодня являются классическими. Стремительное развитие упомянутых сервисов привело к созданию ряда программных продуктов, предназначенных для работы с геопространственной информацией.

По мнению авторов статьи [25], с точки зрения представлений об окружающем мире новое качество неогеографии проявляется в следующем:

- минимизация условностей в представлении земного шара, характерных для картографического метода, за счёт применения фотографически точного источника данных — цифровых изображений местности, полученным по данным дистанционного зондирования;
- преодоление ограничений, задаваемых традиционными картографическими проекциями, что позволяет обеспечить возможность всеракурсного отображения данных и существенно улучшает качество и оперативность восприятия местности;
- стирание резких границ между географическими и топографическими картами за счёт возможности плавного изменения эквивалентного масштаба в широчайших пределах — от глобального до сверхдетального (порядка 1:10), при этом естественным образом обеспечивается



возможность обеспечения неортогонального, но метрически точного трёхмерного представления;

- появление эффективной среды массового создания и агрегации геоданных самими пользователями, что обеспечивает в результате решение вопроса своевременной актуализации геоданных.

Указанное новое качество неогеографии возникло именно потому, что в XXI веке появилась технологическая возможность объединения перечисленных выше методов из различных направлений развития геоинформатики. При этом принципиально важным является то, что в рамках подходов неогеографии обеспечивается метрическая обработка данных. Более того, кроме трёхмерного представления изучаемых объектов и явлений появляется возможность оперативного исследования динамики всех изменений. При этом Земной шар в геосервисах класса Google Earth полностью, без «белых пятен», покрыт изображениями — как правило, космическими, но также и аэроснимками различного разрешения. Мировой океан представлен рельефом дна — условной моделью, визуально воспринимаемой так же, как изображение.

Характерным, бросающимся в глаза отличием продуктов класса Google Earth является отсутствие (точнее, «минимизация») использования привычных для карт «заливок» (векторных слоёв полигональной топологии). Векторные слои в новых продуктах начинают играть вспомогательную роль, становясь в большей степени из носителя информации о геометрических характеристиках объектов средством представления описательной (так называемой *семантической*) информации об объектах.

Из вышесказанного следует вывод, что в продуктах класса Google Earth стёрта грань между географическими и топографическими картами, чётко обозначенными в «классической» географии. Вместо этого пользователь может непрерывно и практически мгновенно менять расстояние до исследуемого объекта, а следовательно, и эквивалентный масштаб — от предельно генерализованного (на экране виден земной шар целиком, масштаб порядка 1:10 000 000) до предельно детального (масштаб порядка 1:10, ракурс — произвольный). Субъективное ощущение «новизны» продукта, замечаемое в той или иной степени всеми пользователями, дополняется «лёгкостью», с которой осуществляется изменение масштаба — «виртуальный перелёт».

Смена ракурса и масштаба, перелёт от одного объекта к другому «через космос» занимают считанные секунды, изображения при этом сменяют друг друга плавно и создают субъективную иллюзию такого перелёта.

Таким образом, необходимо отметить, что основной инструментарий неогеографии в настоящее время находится в активной разработке и в ближайшей перспективе информационные продукты неогеографии могут стать основой государственного управления, обеспечивая деятельность «электронного правительства» — новой формы организации деятельности органов государственной власти, предполагающей за счёт широкого применения информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) качественно новый уровень оперативности и удобства получения организациями и гражданами государственных услуг и информации о результатах деятельности государственных органов.

Принципиально новые возможности неогеографии во многом обусловлены синергетическим эффектом, возникающим от интегрирования геопространственных данных с данными спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. В работе [25] отмечается, что благодаря системам класса ГЛОНАСС и «геоцентрической революции», связанной с появлением интерфейсов, становится реально возможным экспериментальное изучение ноосферы. Подобное изучение не сводится только лишь к чистому академизму:

результаты могут либо подтвердить, либо опровергнуть антропологическую модель — фундамент современного общества.

Указанное обстоятельство предопределило интерес различных групп исследователей к указанному приложению неогеографии. Директор Национального агентства геопространственной разведки США Л. Лонг (L. Long) на исходе 2010 г. впервые заявила, что её ведомство приступает к решению кардинально нового спектра задач — проблем «географии человека». Эксперт компании Booz Allen Hamilton С. Келвэйт (S. Kalweit) выразилась ещё определённые. «Карта перестала быть нашей концептуальной парадигмой» — прямо заявила она в ходе сетевого семинара для специалистов в области геопространственной разведки, состоявшегося 9 декабря 2010 г. [25].

Далее в работе [25] отмечается, что «в начале 2009 г. Командующий космическими войсками ВВС США генерал Р. Келер (R. Kehler) сформулировал новую концепцию глобального доминирования, известную как концепция „геоцентрического театра военных действий (ТВД)“». Генерал обратил внимание на сущностное родство космического, околоземного пространства — точнее, пространства геоцентрического, включающего в себя также и собственно нашу планету, с принципиально новым в истории человечества искусственным пространством — пространством кибернетическим, информационным. Синтез пространства и киберпространства, реального мира и его информационного образа создаёт новую сущность. По своей пространственной локализации «геоцентрический ТВД» тождествен ноосфере. Американский генерал, по сути, заново и независимо открыл её, но по-иному акцентировал её смысл. Отныне именно господство в ноосфере, понимаемой как единство космического, кибернетического и земного пространств, в настоящее время становится одним из основных приоритетов развития государств.

Это связано, в частности, с тем, что синтез технологий геоинтерфейсов как средства представления информации и глобальных навигационных спутниковых систем, как источника такой информации, привёл к фактическому снятию противопоставления между полярными уровнями систем управления — уровнем глобальным, или стратегическим, и локальным, или тактическим. В этом ещё одна особенность нового, ноосферного управления.

Возможность локализации информации уже не на картах, неизбежно фрагментирующих пространство по масштабному признаку, но в геоинтерфейсах позволяет реализовать важнейшее требование теории управления, известное как принцип ситуационной осведомлённости. И обеспечить глобальность, детальность, целостность представления информации без отрыва от её общегеографического контекста. В итоге снимается противоречие между тактическим и стратегическим уровнями систем управления.

## ГЛАВА 3 СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Спутниковая связь, начавшая своё развитие в середине 1960-х гг. с появлением советского спутника «Молния» и американского «Телстар» быстро развивается во всем мире. Мировая космическая промышленность последние 30 лет показывает стремительный рост доходов, которые в 2016 г. составили рекордную сумму в 110 млрд долл. США. В указанный период рост доходов сосредоточен главным образом в секторе предоставления спутниковых услуг связи (Satellite Services); с 15,8 до 62,6 млрд долл. США и, в меньшей степени, в секторе производства наземного оборудования (Ground Equipment): с 9,7 до 28,8 млрд долл. США. Доходы в секторах производства спутников (Satellite Manufacturing) и производства средств запуска спутников (Launch Industry) колеблются в пределах 7,8...12,4 и 2,7...5,3 млрд долл. США соответственно. Создано большое число систем спутниковой связи и вещания, различных по функциям, обслуживаемой зоне, составу и ёмкости.

Приведём далее определения основных понятий:

*Космическая радиосвязь* — радиосвязь, при которой используются космические станции, расположенные на ИСЗ или других космических объектах.

*Космическая станция (КС)* — станция, расположенная на объекте, который находится за пределами основной части атмосферы Земли (либо находится там, либо предназначен для вывода), например на ИСЗ.

*Спутниковая линия* — линия связи между земными станциями с помощью одного ИСЗ, на каждом направлении включает в себя участок «Земля — спутник» (линия вверх) и участок «спутник — Земля» (линия вниз).

Системы спутниковой связи (ССС) применяют для передачи различных видов информации:

- *программ телевидения* — при этом необходимо различать системы обмена ТВ-программами между равноправными *земными станциями* (ЗС) и системы циркулярного распределения программ от передающей станции к большому числу приёмных ЗС;
- *других видов симплексных (односторонних) сообщений*, чаще всего циркулярного характера: изображений газетных полос, программ звукового вещания;
- *информационных сообщений*, дуплексных (двусторонних) по своему характеру; каналы тональной частоты или их группы можно использовать для обмена другими видами информации — телефонной, телеграфной, а также дискретных данных от ЭВМ и других источников.

В зависимости от вида передаваемой информации различают универсальные многофункциональные системы, ЗС которых обмениваются различными видами информации (таковы системы Intelsat, «Орбита», Telesat и др.) и специализированные — для передачи одного вида или нескольких однородных видов информации. Так, система дальней космической связи «Орбита» предназначена для передачи, приёма и ретрансляции программ центрального телевидения,

а также обеспечения двусторонней телефонной, телеграфной и фототелеграфной связи на территории России и стран СНГ среднеазиатского региона. Космический аппарат «Экспресс-АТ1» ретранслируют сигналы «НТВ-плюс» для циркулярного распределения телевизионного и звукового вещания для восточной части Российской Федерации.

По охватываемой территории, размещению и принадлежности ЗС, структуры управления ССС можно подразделить:

- на *международные*, в состав которых входят станции различных стран; такие системы могут быть *глобальными* (с мировым охватом), как «Интерспутник», Intelsat, либо *региональными*, как Eutelsat, Arabsat;
- *национальные*, все ЗС, которые расположены в пределах одной страны, в том числе *зоновые*, все ЗС которой расположены в пределах одной из зон (районов) страны, и *ведомственные* системы (деловые «Ямал», фирменные «Банкир»), ЗС которых принадлежат одному ведомству (организации, фирме) и передают только деловую информацию и данные в интересах ведомства.

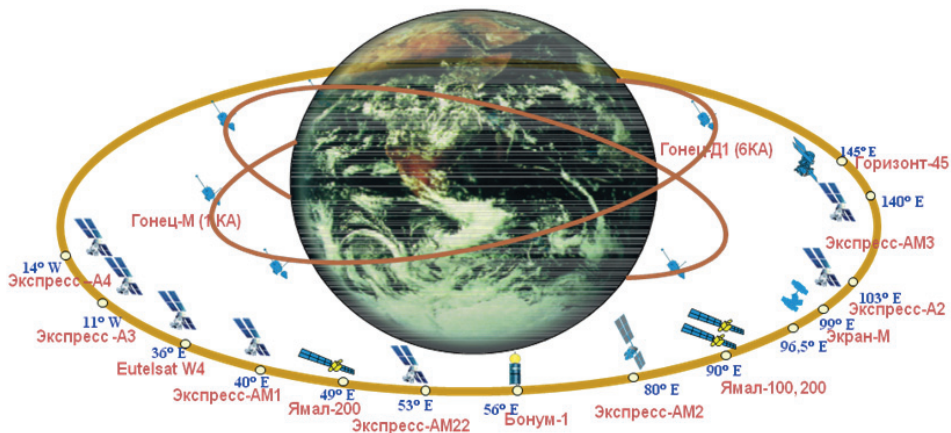


Рисунок 23. Орбитальная группировка российских спутников связи

Орбитальная группировка спутников связи Российской Федерации представлена на рисунке 23.

### 3.1 ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И ПОНЯТИЯ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

По диапазону используемого спектра частот системы спутниковой связи могут подразделяться на *радиотехнические* и *оптические*. Радиотехнические системы для передачи информации используют радиосигналы различных частот, тогда как оптические системы, как следует из названия, передают данные с использованием оптической части электромагнитного спектра.

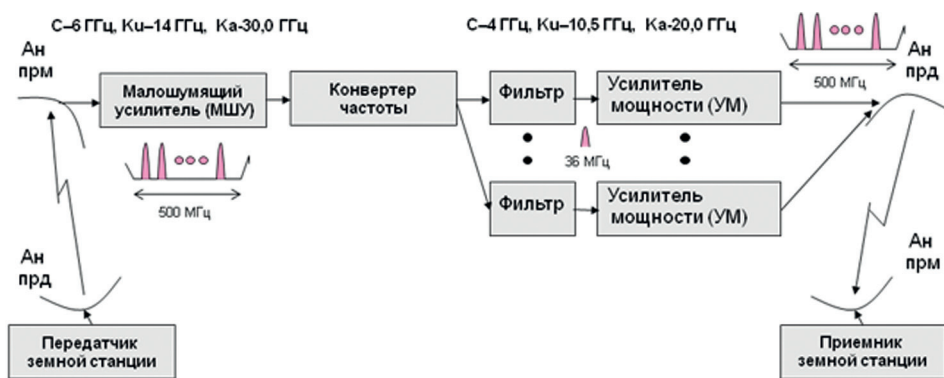
В состав любой ССС, несмотря на их различие, входит несколько одинаковых по назначению элементов:

- КС, представляющая собой ретрансляционное (приёмопередающее) устройство, размещённое на ИСЗ, с антеннами для приёма и передачи радиосигналов и системами обеспечения, источниками энергоснабжения, системами ориентации антенн на Землю и солнечных батарей на

Солнце, системами коррекции положения ИСЗ на орбите, терморегулирования и т. д.

- ЗС различного типа (приёмные, передающие, приёмопередающие).

На рисунке 24 представлен принцип ретрансляции радиосигнала с использованием космической линии связи, а также основное энергетическое уравнение радиолинии. Очевидно, что наилучшие характеристики ретрансляции могут быть реализованы при достижении максимального отношения сигнал/шум (SNR — Signal-To-Noise).



**Рисунок 24.** Принцип ретрансляции радиосигнала (An прм — антенна приёмная, An прд — антенна передающая)

Соотношение сигнал/шум определяется как:

$$\frac{S}{N} = P_{\text{изл}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \frac{(\lambda/4\pi r)^2}{kTL}, \quad (5)$$

где:  $G_{\text{прд}}$  — коэффициент усиления передающей антенны;  $P_{\text{изл}}$  — мощность передатчика;  $L$  — затухание сигнала и потери полезного сигнала в тракте от приёмника к передатчику;  $\lambda$  — полоса сигнала;  $r$  — расстояние между приёмником и передатчиком;  $T$  — эквивалентная шумовая температура приёмника;  $k$  — постоянная Больцмана. Соотношение (5) называют *уравнением радиолинии*.

Одним из основных радиотехнических устройств, используемых в космических радиолиниях является приёмопередающая антенна. Антенны подразделяются:

- по месту установки: бортовые, наземные;
- конструкции: зеркальные (осесимметричные и офсетные, двухзеркальные Кассегрена/Грегори), рупорные, фазированные антенные решётки (ФАР), спиральные, директорные (логопериодические);
- поляризации: линейные (вертикальные/горизонтальные), круговые (правые, левые);
- формируемой диаграмме: узколучевые, многолучевые, контурные, ненаправленные.

На рисунке 25 (см. с. 68) представлены основные соотношения, характеризующие эффективность работы антенны — диаграмму направленности антенны, а также типовые значения диаграммы направленности, необходимые для обеспечения различных режимов работы спутникового ретранслятора связи.

Внешний вид типовой антенны наземных приёмных пунктов систем «Орбита» — ТНА-57 диаметром 12 м приведён на рисунке 26 (см. с. 68).

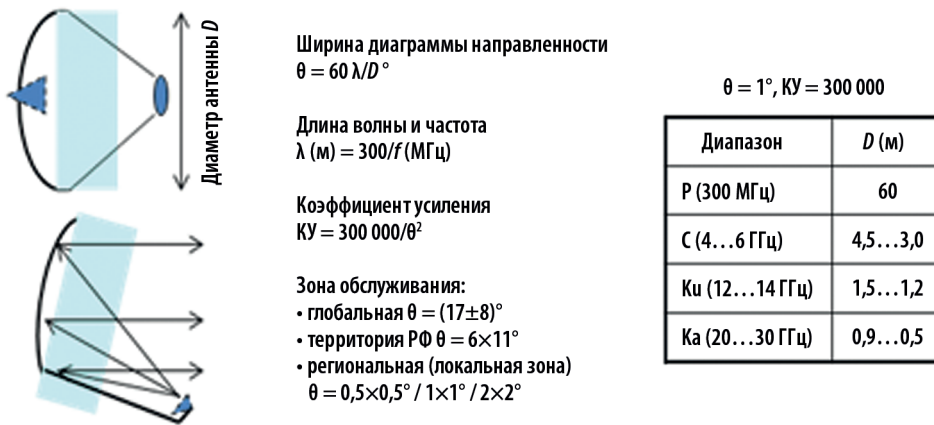


Рисунок 25. Характеристики диаграммы направленности антенны

Классификация космических систем связи по типу орбит приведена в таблице 3.

Таблица 3. Основные характеристики космических систем связи

<i>Низкоорбитальные</i>		
Iridium	Orbcom	Globalstar
680 км	35 КА	48 КА
<i>Среднеорбитальные</i>		
10...12 тыс. км, 2-3 группировки по 3 КА		
<i>Высокоэллиптические</i>		
42 тыс. км/1000 км («Молния»), 12 ч, 6 ч рабочий участок		
<i>Геостационарные</i>		
36 тыс. км, 24 ч		

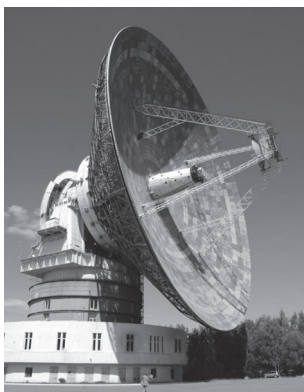
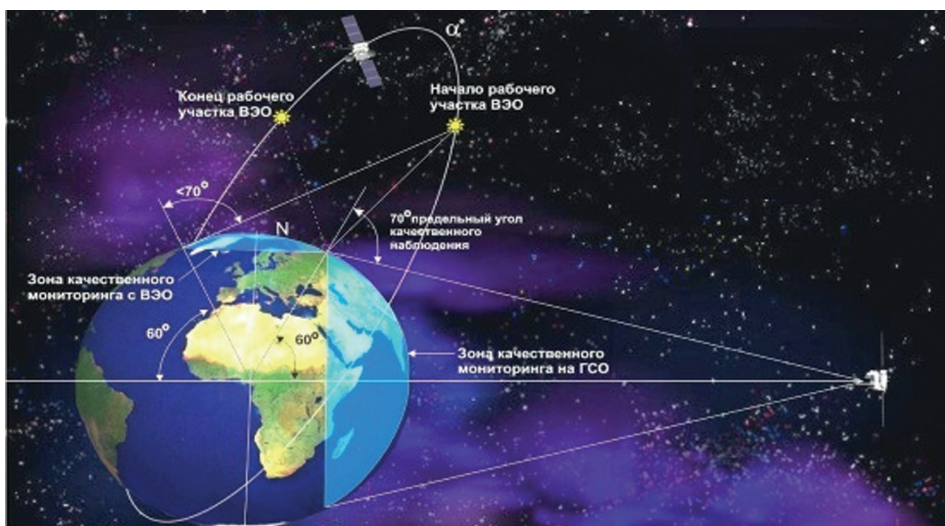


Рисунок 26. Антенна наземной приёмной станции ТНА-57

Для организации разных видов связи используются разные типы спутниковых орбит. Основное отличие используемых орбит для искусственных спутников Земли связи заключается в том, что для низких орбит время пролёта спутника над участком земной поверхности ограничено и связь с помощью таких ИСЗ осуществляется только в определённые временные интервалы (как правило, не более 10...15 мин). Практически непрерывный режим связи обеспечивается с геостационарных орбит, но их главный недостаток состоит в том, что из точек на геостационарной орбите не обеспечивается связь в полярных областях Земли.

Разница геостационарной и высокоэллиптической орбит иллюстрируются на рисунке 27 (см. с. 69).





**Рисунок 27.** Различия геостационарной и эллиптической орбит на примере гидрометеорологических систем «Электро» и «Арктика» [26]

Зоны радиовидимости с высокоэллиптических орбит типа «Тундра» и «Молния» над северным полушарием приведены на рисунке 28.



«Тундра» (3 КА, На – 47060 км, Нп – 24521 км, 63,3 град)



«Молния» (4 КА, На – 39980 км, Нп – 510 км, 63,5 град)

**Рисунок 28.** Пример зон радиовидимости КА с орбитами типа «Тундра» (слева) и «Молния» (справа)

По назначению спутниковые системы связи подразделяются:

- на коммерческие;
- специальные;
- передачи данных и управления космическими аппаратами.

По предоставляемым услугам:

- фиксированная спутниковая связь (магистральные линии и VSAT (Very Small Aperture Terminal) сети);

- фиксированная спутниковая связь (телевещание распределительное и непосредственное, мультимедиа);
- подвижная спутниковая связь (в том числе непосредственного радиовещания).

К достоинствам спутниковых систем связи следует отнести:

- более быстрое предоставление услуг с момента возникновения необходимости в связи, спутниковая сеть (антенна, модем и кабельная сеть) развёртывается быстрее, чем наземная оптоволоконная сеть (несколько недель против месяцев), а дополнительная пропускная способность в спутниковой сети может быть получена почти сразу же;
- лучшие характеристики сети: спутниковые соединения улучшают характеристики связи путём непосредственного подсоединения к телепорту интернета без использования перегруженных местных линий связи и многочисленных изменений маршрута при передаче данных;
- меньшую стоимость сети: спутники позволяют доставить данные в обширные географические районы без преодоления препятствий в виде наземной инфраструктуры или географических преград, что приводит к стоимости связи, которая не зависит от расстояния. Кроме того, пропускная способность спутниковых линий легко подстраивается под реальную скорость передачи данных абонента, что позволяет платить за предоставление только необходимых ресурсов.

Далее рассмотрим основные спутниковые системы связи. Сразу оговоримся, что системы спутникового телевидения выходят за рамки обсуждаемых проблем и отдельно нами обсуждаться не будут.

## 3.2 СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

Высота орбиты 35 875 км.

### ДОСТОИНСТВА СИСТЕМ СВЯЗИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

- трёхспутниковая система обеспечивает глобальный обзор;
- непрерывная круглосуточная связь без перехода с одного ИСЗ на другой;
- не требуют автоматического сопровождения антенн;
- относительно стабильное ослабление сигнала на трассе между КС и ЗС;
- отсутствует или минимален эффект Доплера.

### НЕДОСТАТКИ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

- затенение ИСЗ Землёй;
- необходимость больших диаметров приёмных антенн.

Затенение ИСЗ спутниковой связи Землёй создаёт проблемы с зарядкой солнечных батарей (рисунок 29, смс. с. 71), что приводит к необходимости создания отдельных специальных режимов управления космическими аппаратами.

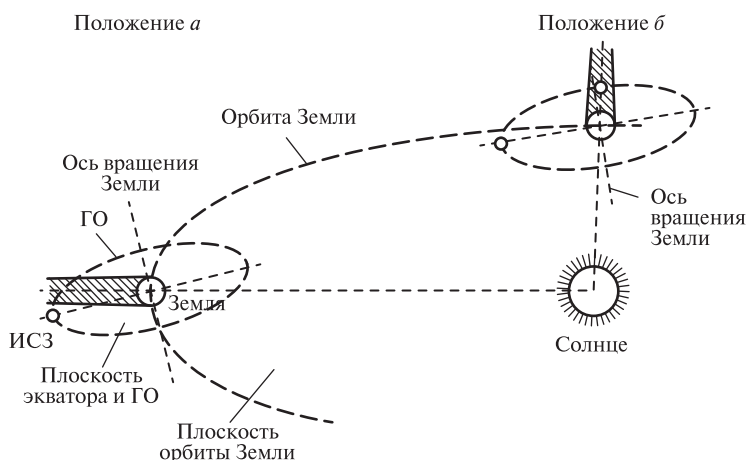


Рисунок 29. Затенение ИСЗ Землёй

### ПРИМЕРЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ОРБИТАХ

Одной из наиболее успешных систем связи, построенных на базе геостационарных/геосинхронных космических аппаратов, является система «Инмарсат» (Inmarsat).

В системе функционируют 13 КА (рисунок 30), которые обеспечивают непрерывное покрытие услугами над водными акваториями и сушей, формируют несколько специализированных сетей обмена информацией. Например, сеть Inmarsat-C используется Международной морской организацией в том числе для обеспечения мореплавания; Inmarsat-Mini-M предоставляет голосовые сервисы на скоростях до 4,8 кбит/с и т. д.

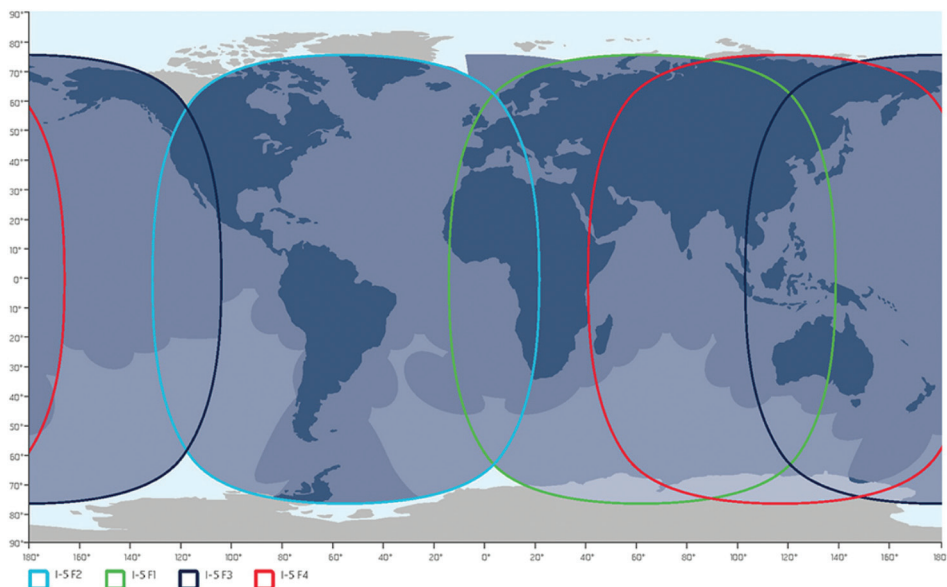


Рисунок 30. Зоны обслуживания КА Inmarsat-5 [27]

Для снижения трафика используются 11 наземных станций с общим центром управления в Лондоне (Англия).

В 2018 г. объём выручки компании составил 369,3 млн долл. США, EBITDA — 206,5 млн долл. США.

## 3.3 СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ВЫСОКИХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОРБИТАХ

Высота орбиты в апогее от 40 250 км. Высота орбиты в перигее 300...500 км.

### ДОСТОИНСТВА СИСТЕМ СВЯЗИ НА ВЫСОКИХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОРБИТАХ

- трёх орбитальных плоскостей достаточно для обеспечения глобального обзора;
- возможность предоставления услуг связи в полярных зонах Земли;
- эффект Доплера минимален.

### НЕДОСТАТКИ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ВЫСОКИХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОРБИТАХ

- необходимость постоянного сопровождения спутника, а также быстрой перенастройки положения антенн;
- большой диаметр приёмного антенного устройства;
- необходимость перехода с одного спутника на другой;
- наличие в одной орбитальной плоскости нескольких КА.

## АППАРАТУРА ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ ПРИЁМА

Станции VSAT (сегодня употребляется и термин USAT — Ultra Small Aperture Terminal):

- устанавливаются непосредственно у пользователей, плотность размещения на ограниченной территории может быть весьма высока;
- обычно применяются в выделенных сетях для передачи данных или телефонии как в симплексном, так и в дуплексном режимах;
- малые диаметры антенн (1,8...3,5 м), в отдельных случаях до 6 м;
- скорость передачи не превышает 2 Мбит/с;
- ограниченная мощность передатчика (1...20 Вт). Обычно работают в диапазонах частот приём/передача: 6/4 ГГц или 14/11...12 ГГц.

## 3.4 СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

Все системы на низких орбитах можно разбить на три группы.

**Группа 1.** Используются спутники, не имеющие технических средств для передачи голоса и предназначенные в основном для трансляции данных в режиме передачи и запоминания на спутнике со сбросом в момент пролёта абонента, т.е. спутник уподобляется гонцу. По-видимому, это и дало название российской системе низкоорбитальных спутников связи. Как правило, это небольшие аппараты весом до 50 кг. Сегодня известны примеры [28] создания

подобных систем на базе космических аппаратов нанокласса массой до 10 кг. Группировки из 10–16 аппаратов хватает, чтобы обеспечить глобальную связь с задержкой передачи сообщений, не превышающей одного часа.

В настоящее время эксплуатируется российская система связи «Гонец» на базе 12 КА «Гонец-М». Подобная структура системы обеспечивает возможность предоставления непрерывных услуг передачи информации в северных широтах, тогда как на экваторе время ожидания сеанса связи может составлять до 15 мин. С учётом планов по модернизации системы (запланировано доведение состава космической группировки системы до 24 КА за счёт перспективных КА «Гонец-М1»), будет обеспечена возможность передачи информации в режиме практически реального времени.

**Группа 2.** Вторую группу составляют спутники весом 350...500 кг, обеспечивающие весь спектр функций связи: от передачи голоса до широкополосной цифровой связи с обработкой сигналов на борту. Уже реализованы два поколения системы Globalstar, использующей низкоорбитальные космические аппараты. Кроме того, были развёрнуты космическая группировка системы Odyssey, а также один аппарат системы ICO, использующие орбиты высотой от 10 000 до 12 000 км, которые, к сожалению, в настоящее время уже не функционируют по целевому назначению.

**Группа 3.** К ней можно отнести глобальные системы, которые построены или разрабатываются с учётом использования сотен и даже тысяч космических аппаратов в составе орбитальных группировок. Они представляют собой широкополосные системы связи со всеми возможностями под реализацию протоколов интернета. Обычные телефонные каналы связи в этих системах реализуются по умолчанию как самая простая функция IP-телефонии. Сегодня самая известная система, которую можно отнести к этой группе — Iridium (Iridium Next).

Предлагается несколько проектов перспективных систем этой группы — проект Starlink (Илон Маск (Elon Musk)), будет использовать 1600 космических аппаратов, а также многоразовый корабль для их вывода на орбиту. Известны и прочие проекты подобных систем, например, проект Teledesic, заинтересованность в котором высказывал владелец корпорации Microsoft Билл Гейтс.

## ЗАРУБЕЖНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ORBCOMM, GLOBALSTAR, IRIDIUM

### Orbcomm

Реализация системы низкоорбитальной спутниковой связи Orbcomm [29] завершена ещё в 1998 г. Система представляет собой группировку из 36 малых спутников связи. Интересен девиз системы: “Countdown to Global Service”.

Первые два пробных спутника системы были запущены в 1995 г. Два новых спутника — 10 февраля 1998 г. ракетой «Таурус» с базы ВВС США Ванденберг в Калифорнии. В последующем запуски КА осуществлялись их ракетой «Пегас» по 8 шт. Частотный диапазон системы Orbcomm — 137...138 МГц для канала «спутник–Земля» и 148...149,9 МГц для канала «Земля–спутник». Использование УКВ-диапазона позволяет создавать относительно недорогую и простую аппаратуру потребителя.

Система предназначена для глобальной передачи коротких сообщений длиной 100...200 байт. Кроме того, каждый терминал имеет схему определения координат, что позволяет вести автоматический мониторинг его движения.

Основные характеристики спутников:

- масса — 36 кг;
- мощность солнечных батарей — 160 Вт.



Начиная с 2012 г. было осуществлено развёртывание орбитальной группировки Orbcomm-G2 следующего поколения из 18 космических аппаратов. Всего было осуществлено три пуска ракетносителя SpaceX Falcon-9 в 2012, 2014 и 2015 гг.

Основные характеристики спутников второго поколения:

- масса — 172 кг;
- мощность солнечных батарей — 400 Вт.
- скорость обмена данными между потребителем и КА составляет 2,4/4,8 кбит/с (вверх/вниз);
- скорость обмена между КА и станцией снижения трафика — 57,6 кбит/с.

На сегодняшний момент система обслуживает 2,3 миллиона абонентов по всему миру. Общий объём выручки компании составляет 254 млн долл. США, EBITDA — 45 млн долл. США.

## Globalstar

Запуски спутников начались с 14 февраля 1998 г. Ракетой-носителем «Дельта» были выведены первые четыре спутника. Ввод системы в эксплуатацию начался после выведения на орбиту группировки из 32 спутников (3-й квартал 1998 г.), на полную нагрузку система вышла в 1999 г. Спутники системы представляют собой линейные ретрансляторы ёмкостью 2800 дуплексных каналов. Аппаратура совместима с существующими сетями сотовой связи стандарта GSM (Global System for Mobile Communications) и может работать в технологии CDMA (Code-Division Multiple Access — множественный доступ с кодовым разделением каналов).

Система предназначена для реализации низкоскоростной сети передачи данных, телефонной связи, а также сервисов мониторинга и технологий «интернета вещей».

В период 2010–2013 гг. было запущено 24 КА системы второго поколения в целях восстановления и поддержания состава орбитальной группировки.

На сегодняшний день система Globalstar [30] обеспечивает передачу 1,3 млрд сообщений в год в тех местах, где отсутствует сотовая связь. В системе Globalstar функционируют 24 земные станции, объединённые в единую сеть через интернет, что позволяет обеспечивать связь в 120 странах мира.

В 2018 г. владелец системы Globalstar — Thermo Capital принял решение о слиянии космического оператора системы Globalstar и компании, обеспечивающей наземную проводную связь FiberLight. Сумма сделки оценивается в 1,65 млрд долл. США, она пойдёт на покрытие долгов оператора космической системы.

## Iridium

В 2000 г. была полностью развёрнута группировка из 66 спутников (всего 72). Спутники размещены в шести орбитальных плоскостях по 11 спутников и одному запасному. На полярных орбитах в 780 км КА обеспечивают глобальную телефонную связь. Кроме голосовых сообщений возможна передача цифровых данных со скоростью 2400 бит/с. Сотовый стандарт GSM является для системы основным. Спутниковый сегмент и наземные терминалы изготавливает фирма Моторола (Motorola Inc.). Данная система впервые обеспечит персональную спутниковую цифровую связь и подключение к интернету [31].



С 2015 по 2017 г. осуществлялось развёртывание системы следующего поколения — Iridium Next. Увеличилась пропускная способность пользовательских каналов (до 1,5 Мбит/с), каналов связи «КА — Земля» (до 8 Мбит/с), «КА — КА» (до 25 Мбит/с), а также предполагается увеличение общей ёмкости системы (до 3 млн пользователей).

Кроме того, одним из основных преимуществ предлагаемой системы над конкурентами, декларирующимся основными акционерами Iridium Next, является возможность размещения дополнительной «коммерческой» полезной нагрузки, разработанной с учётом стандартизованных требований к различным интерфейсам (физическому, электрическому, информационному, тепловому и пр.). С учётом указанных унифицированных требований был разработан ряд полезных нагрузок, которые были размещены на КА системы Iridium Next: приёмник АЗН-В 1090ES (управление воздушным движением — проект Aireon), GPS-приёмник для затменного зондирования ионосферы (профиль температуры/влажности и электронной концентрации ионосферы), широкоугольный радиометр радиационного баланса (уходящая длинноволновая радиация атмосферы), измеритель освещённости (измерение солнечной постоянной), измеритель малых газовых компонент (профиль озона), альтиметр (высота морской поверхности, значимая высота волн, скорость ветра, скорость и направления течений), сканер цвета океана (концентрация хлорофилла *a*, биопродуктивность). Кроме того, предполагается использовать инфраструктуру Iridium для передачи дифференциальных поправок системы GPS [31].

### 3.5 СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА БАЗЕ СРЕДНЕОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Система «Инмарсат» [27] была одной из первых, которая обеспечила глобальную связь с подвижными, в первую очередь морскими, абонентами ещё в 1982 г. К числу недостатков (отсутствие связи в полярных регионах) добавляется относительная дороговизна услуг системы — 1 мин телефонного разговора или 1 Мбайт трафика стоят около 1 долл. США в современных тарифах. При этом в начале развёртывания спутниковых систем связи услуги стоили в несколько раз дороже. Поэтому разработчики систем задумались об их совершенствовании задолго до появления обсуждаемых ниже проектов.

Одним из возможных вариантов удешевления проектов был переход к использованию среднеорбитальных спутниковых систем. В теории более низкие орбиты космических аппаратов предполагали существенное снижение временных задержек при передаче сигнала, кроме того, аппараты для работы на средних орбитах могли быть проще и легче, что, в конечном счёте, влияет и на стоимость оказываемых услуг.

В январе 1995 г. была создана компания ICO Global Communication, которую возглавил бывший президент консорциума «Инмарсат» О. Лундберг (O. Lundberg).

Компания предполагала использовать в группировке космические аппараты на средневысотной круговой орбите с периодом обращения 6 ч. Высота орбиты 10 335 км, наклонение 45°. Орбита с такими параметрами позволяет построить сеть глобальной связи имея всего 10–12 спутников. Каждый спутник должен был обеспечивать не менее 4500 дуплексных телефонных каналов, использующих режим доступа TDMA (Time-Division Multiple Access). Ожидаемое время жизни спутников должно было составлять порядка 12 лет.

Предполагалось разместить 10 спутников в двух орбитальных плоскостях по 5 спутников в каждой плюс по одному запасному на каждой орбите.

Запуски должны были начаться в конце 1998 г. Спутники будут взаимодействовать с 12 наземными станциями, аналогичными системе «Инмарсат», расположенными по всему миру и соединёнными между собой высокоскоростными кабелями.

К сожалению, этот проект так и не был реализован — в 1999 г. компания ICO Global Communication была признана банкротом. Однако, в конечном счёте, активы компании были выкуплены инвесторами и на её базе была создана компания Pendrel Corporation, которая всё же вышла на рынок с космической системой связи, построенной уже, однако, на геосинхронных космических аппаратах.

Более успешным коммерческим проектом оказалась система O3b network (other 3 billions) которая предполагала выйти на развивающиеся рынки предоставлением услуг передачи информации и широкополосного доступа в интернет мобильным операторам связи.

Космическая группировка состоит из 16 КА, функционирующих на орбитах высотой 8062 км. В 2019 г. количество аппаратов в системе будет доведено до 20. До 2021 г. предполагается развёртывание спутниковой группировки нового поколения, которая обеспечит пропускную способность до 10 Гбит/с на каждого абонента.

В 2016 г. выручка компании превысила 100 млн долл. США, причём к 2019 г. прогнозируется рост выручки до 680 млн долл. США [27].

## ГЛАВА 4

# СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Как уже отмечалось выше, для задания точного соответствия экспериментально получаемых данных о состоянии, в частности, морской поверхности конкретным координатам измерения, в ГИС используются принципы дистанционного определения местоположения объектов. В данном разделе рассмотрены различные спутниковые методы и средства определения координат объектов на земной и морской поверхности.

### 4.1 ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ПУНКТОВ

Традиционно для этого используется опорная наземная сеть геодезических пунктов. С помощью угломерных, светодальномерных, астрономических, радиотехнических и других измерительных средств вычисляются координаты взаимного расположения пунктов. За основу геодезической системы отсчёта принят эллипсоид вращения. Чтобы получить координаты всех пунктов в этой системе, координаты одного из пунктов сети принимают в качестве опорных, а затем производят пересчёт координат остальных пунктов в геодезическую систему координат.

За начало отсчёта высоты принята уровенная поверхность моря. Для России это уровень Балтийского моря у Кронштадта.

Получаемые координаты геодезических пунктов аппроксимируются поверхностью эллипсоида вращения. При этом эллипсоид ориентируется так, чтобы его ось вращения была параллельна оси вращения Земли. Тогда две другие оси располагаются параллельно плоскости экватора. Центр вращения эллипсоида не совпадает с центром Земли в силу неравномерной приподнятости материковых частей Земли над уровнем моря.

### 4.2 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрим основные методы измерения навигационных параметров. Существующее разнообразие методов подразделяется на две основные группы: *координатные* и *скоростные*. Первые обеспечивают получение информации о навигационных параметрах, фиксируемых в пространстве линейных координат, вторые — в пространстве скоростей. К первым относятся *дальномерные*, *разностно-дальномерные* и *угломерные* методы. Ко вторым — *радиально-скоростные*, *разностно-радиально-скоростные* и *угло-скоростные*. Соответствующая навигационная методика, основанная на измерении дальностей от объекта до нескольких опорных точек, является дальномерной. При этом подобная методика может быть реализована как активным, так и пассивным способом, что иллюстрируется на рисунке 31 (см. с. ).

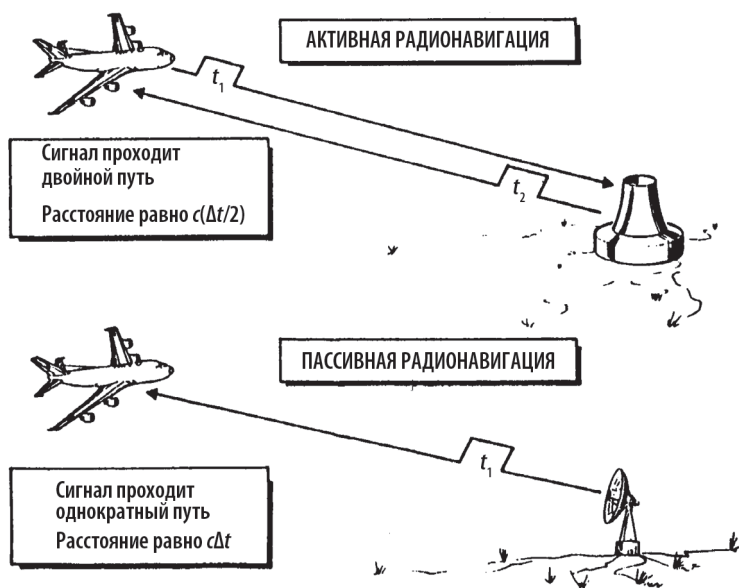


Рисунок 31. Активная и пассивная радионавигация

В активном методе для измерения используется собственный приёмо-передатчик, установленный на подвижном объекте, в пассивном используются опорные сигналы, излучаемые наземными передатчиками, расположенными в точках с известными координатами. Если измеряется скорость изменения дальности между объектом и навигационной точкой (так называемая радиальная скорость), соответствующая методика будет радиально-скоростной. Отметим, что в пространстве скоростей такому измерению отвечает просто интервал между двумя точками этого пространства.

## ДОПЛЕРОВСКИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ НАВИГАЦИОННЫЙ МЕТОД

Принцип измерения радиальной скорости  $\dot{R}(t)$  состоит в следующем.

Пусть объект — КА, находится на удалении  $R$  от точки приёма сигнала и излучает гармоническое колебание на частоте  $f_0$  с начальной фазой  $\varphi_0$ :

$$U_{\text{изл}}(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0). \quad (6)$$

Фаза принимаемого сигнала  $\varphi(t) = 2\pi f_0(t - \tau) + \varphi_0$  задержана относительно излучённого сигнала на интервал  $\tau = R/c$ , где  $c$  — скорость света. Таким образом:

$$f(t) = 2\pi f_0 \left( t - \frac{R}{c} \right) + \varphi_0. \quad (7)$$

Частота принимаемого сигнала определяется как производная от текущей фазы по времени, следовательно, из выражения (7):  $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = 2\pi f_0 \left( t - \frac{\dot{R}}{c} \right)$  или  $f = f_0 \left( 1 - \frac{\dot{R}}{c} \right)$  и отличается от частоты излучённого колебания на величину доплеровского сдвига  $F_{\text{Д}} = f - f_0 = -f_0 \cdot (\dot{R}/c) = -(\dot{R}/\lambda)$ , где  $\lambda = c/f_0$  — длина волны излучаемых колебаний.

Радиальная скорость:

$$\dot{R}(t) = \frac{v_x(t)(x(t) - x_{\text{рнс}}) + v_y(t)(y(t) - y_{\text{рнс}}) + v_z(t)(z(t) - z_{\text{рнс}})}{R(t)}, \quad (8)$$

где  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$ ,  $v_z(t)$  — составляющие вектора скорости объекта,  $x_{\text{рнс}}$ ,  $y_{\text{рнс}}$ ,  $z_{\text{рнс}}$  — составляющие координат местоположения радионавигационной системы.

Для определения местоположения объекта относительно спутника необходимо иметь три параметра их относительного положения. Они могут быть измерены одновременно или последовательно [32].

При одновременном измерении это должны быть три различных независимых параметра (например, дальность «объект — спутник» и два угла, характеризующие ориентацию линии визирования «объект — спутник» в пространстве); при последовательном — параметры могут быть и однотипные (например, дальность «объект — спутник»).

Определение параметров относительного движения спутников и наземных объектов основано на измерении:

- времени прохождения электромагнитного импульса между ними;
- разности фаз приходящего сигнала на наземные пункты, находящиеся на различных расстояниях;
- изменения частоты принимаемого сигнала при относительном движении спутника и объекта;
- направления электрической оси приёмной антенны;
- положения изображения спутника на фотоснимке относительно изображений объектов с известными координатами, например, звёзд.

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Для измерений временной задержки сигнала между двумя объектами на одном из них генерируется электромагнитный импульс и посылается в сторону другого, где он принимается приёмным устройством. С помощью системы единого времени фиксируется время посылки и приёма сигнала. Разница времени даёт возможность определить расстояние между объектами как произведение этой разницы на скорость света. Точность измерения тем выше, чем точнее измеряется временная задержка и чем точнее известна скорость света. Таким образом, точность измерения временной задержки определяется, прежде всего, точностью работы системы единого времени и точностью фиксации времени посылки и приёма сигнала. Например, для того, чтобы погрешность определения дальности не превышала 0,3 м расхождение показаний временных устройств не должно превышать  $10^{-9}$  с. Это означает, что при сверке часов один раз в сутки скорость ухода часов не должна превышать  $10^{-14}$  с/с.

Соответственно, при допустимой погрешности определения координат пункта в 1 м, время необходимо определять с точностью  $10^{-3}$  с, при погрешности  $10^{-3}$  м, как это желательно при измерении динамики земной коры, требуемая точность знания времени  $10^{-6}$  с. При этом дальность пункт — спутник определяется безотносительно к системе координат. Для последующих вычислений координат пунктов измерений используется геоцентрическая система координат, вращающаяся вместе с Землёй.

## ТОЧНАЯ ВРЕМЕННАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ

Основным элементом технических систем отсчёта времени является генератор частоты. Наибольшая стабильность частоты обеспечивается использованием

кристаллических и атомных резонаторов. Кристаллические (кварцевые) резонаторы позволяют получить величину относительной нестабильности частоты порядка  $10^{-6}$ , что за сутки ( $10^5$  с) обуславливает уход времени на  $10^{-1}$  с. Термостатирование позволяет довести уровень нестабильности до  $10^{-7}$ . Охлаждение и термостатирование позволяют существенно увеличить стабильность и довести её до  $10^{-10} \dots 10^{-14}$ . Естественно, это ещё не предел. Теоретические оценки показывают, что кристаллические резонаторы могут иметь стабильность не хуже  $10^{-20}$ .

Принцип действия атомных резонаторов, или атомных стандартов частоты основан на высокой стабильности частоты излучения возбуждённых атомов газа при переходе их в нормальное состояние. Поэтому такие резонаторы содержат источник газа, а также устройство для его возбуждения и селекции возбуждённых и невозбуждённых атомов.

Относительная стабильность частоты излучения атомных стандартов весьма высока и составляет  $10^{-12}$ . Теоретические оценки показывают, что достижима стабильность частоты атомных часов порядка  $10^{-17}$ .

Для повышения точности спутниковых часов используется периодическая коррекция их ухода с помощью более стабильных наземных эталонов времени. Схема орбитальной коррекции спутниковых часов приведена на рисунке 32. Из приведённой схемы видно, что один раз за орбитальный период осуществляется коррекция часов спутника, которая, в свою очередь, затем используется для коррекции региональных наземных эталонов времени.

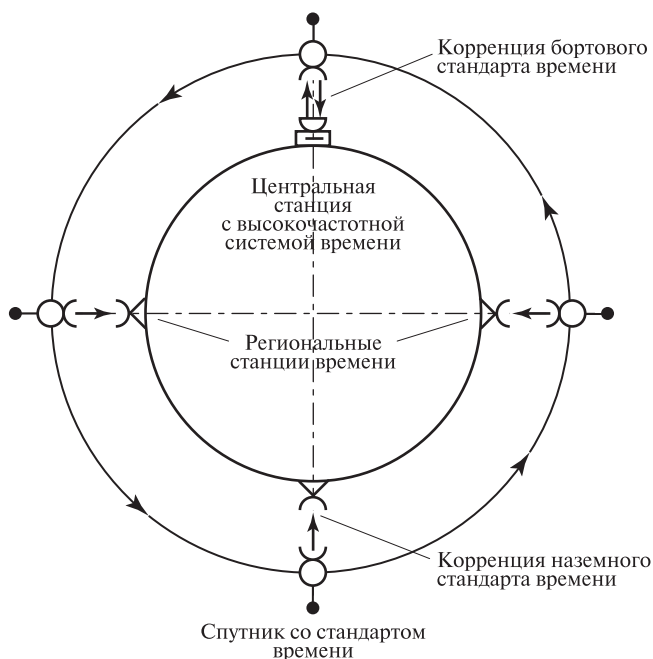


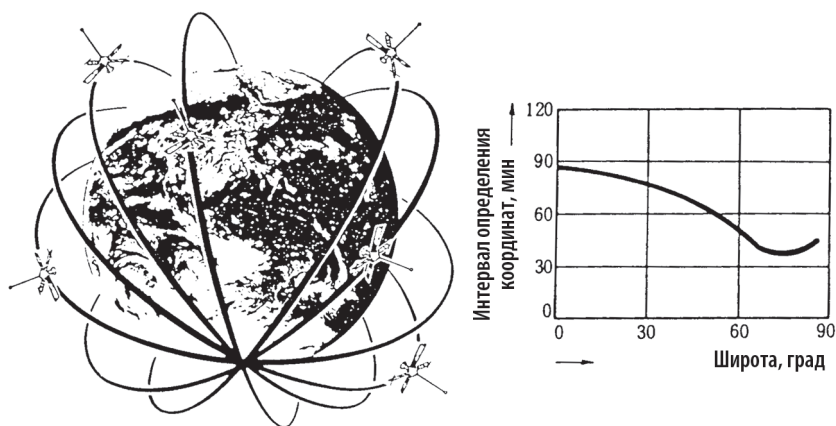
Рисунок 32. Коррекция времени спутниковых часов

Первые спутниковые навигационные системы известны, как семейство спутников «Транзит». Система разработана в США и открыта для использования невоенными судами с 1967 г. В 1977 г. в историческом рейсе атомохода «Арктика» к Северному полюсу наблюдения выполнялись по советским спутникам, система которых называлась «Цикада».



В систему «Транзит» входило шесть спутников на близких к круговым полярных орбитах с высотами 1000...1100 км и периодами обращения 106...107 мин, а также наземная сеть станций слежения и ввода данных.

На рисунке 33 приведено расположение орбит спутников системы «Транзит», а на правом графике рисунка приведена зависимость интервала между двумя последовательными наблюдениями от широты места измеряемых координат объекта. Видно, что наибольшая длительность соответствует экватору, а минимальная приполярным широтам. Это объясняется тем, что по мере приближения к полюсам орбиты спутников пересекаются и, следовательно, каждый спутник виден в приполярных областях практически на каждой своей орбите. В экваториальных же районах каждый спутник виден максимум 2–3 раза в сутки.



**Рисунок 33.** Орбиты спутников системы «Транзит» (слева); график зависимости интервала времени между двумя последовательными сеансами связи от широты места измеряемых координат объекта (справа)

Для определения места в системе «Транзит» применяется доплеровский интегральный метод. При этом измеряемое доплеровское смещение частоты пропорционально скорости спутника. Поэтому интегрирование угловой скорости в интервале времени  $t_1 - t_2$  даёт разность расстояний до спутника в моменты времени  $t_1, t_2$ . Получаемой таким образом разности расстояний соответствует в пространстве поверхность двуполостного гиперболоида, которая, пересекаясь с поверхностью Земли, образует навигационную изолинию гиперболического вида. Таким образом, за интервал времени  $t_1 - t_2$ , изменяемый дискретно как 4, 6, 24, 30, 60 и 120 с и за сеанс связи со спутником, длящийся до 16 мин, возможно получение от восьми до нескольких десятков изолиний, пересечение которых и даёт искомое местоположение. При этом очевидно, что, имея в качестве неизвестных три координаты, система уравнений для однозначного решения навигационной задачи должна иметь не менее трёх уравнений и, следовательно, система неразрешима, если количество интервалов интегрирования за сеанс меньше трёх. Выбор длительности интервала интегрирования также двояко влияет на точность решения. С одной стороны, чем дольше интервал, тем больше база и градиент, т.е. выше точность навигационной изолинии. С другой стороны, с увеличением длительности интервала уменьшается число изолиний за сеанс, а при коротких сеансах и под воздействием помех, когда изолиний меньше трёх, и вовсе возможность определения координат объекта теряется.

## 4.3 АМЕРИКАНСКАЯ СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА NAVSTAR

История создания глобальной навигационной спутниковой системы США NAVSTAR или, как более привычно сегодня сложилось — GPS, началась в 1973 г. после принятия решения Министерством обороны США о создании оборонительной спутниковой навигационной системы (Defense Navigation Satellite System — DNSS). В 1978 г. состоялся запуск первого космического аппарата новой системы [33].

Фактически историю развития GPS можно разделить на три основных этапа. На первом из них, или на этапе создания демонстрационной системы, использовались КА типа Block I, оценивались базовые характеристики применяемых технологий, а также вероятные риски реализации системы. Первоначально предполагалось, что орбитальная группировка GPS будет насчитывать 24 КА в трёх орбитальных плоскостях, с наклоном  $63^\circ$  и высотой 20 200 км. Однако в 1989 г. было принято решение об изменении баллистического построения орбитальной группировки, было увеличено количество орбитальных плоскостей до шести, а наклонение уменьшено до  $55^\circ$ . Изменение облика космической группировки совпало с началом серийного производства КА типа Block II [33].

В 1993 г. началась вторая фаза — начальной эксплуатационной готовности (Initial Operation Capability — IOC), когда в космической группировке насчитывалось 24 космических аппарата различных модификаций (Block I/II/IIA). В 1995 г. было принято решение о переходе к фазе полной эксплуатационной готовности после завершения всех необходимых испытаний.

**Таблица 4.** Характеристики космических аппаратов GPS [33]

Характеристики	GPS Block IIА	GPS Block IIR	GPS Block IIR-М	GPS Block IIF	GPS Block III
Головной подрядчик	Rockwell International	Lockheed Martin		Boeing	Lockheed Martin
Срок активного существования, лет	7,5	10		12	15
Масса на орбите, кг	985	1126,7		1465,1	2161
Габариты, м	—	—	1,58×1,96×2,21	2,49×2,03×2,24	2,46×1,78×3,40
Солнечные батареи	2 кремниевые панели мощностью 710 Вт	2 кремниевые панели мощностью 1040 Вт		3 трёхпериодные арсенид-галлиевые мощностью 1900 Вт	2 ультра трёхпериодные (UTJ) мощностью 4480 Вт
Аккумуляторные батареи	3 никель-кадмиевые	2 никель-водородные перезаряжаемые			
Сигналы	L1 C/A, L1/2 P(Y)		L1 C/A, L1/2 P(Y), L2C	L1 C/A, L1/2 P(Y), L5I, L5Q, L1M, L2M, L2C	L1 C/A, L1P(Y), L1C, L2C, L2M, L5, L1/2 M-Code
БСУ	2 Rb, 2 Cs		3 Rb	2 Rb, 1 Cs	3 Rb

Актуальным этапом модернизации системы GPS является использование космических аппаратов нового поколения типа Block III, которые наряду с модернизированными комплексами управления и аппаратурой потребителя призваны улучшить качество предоставляемых навигационных услуг. Планом модернизации системы предлагается передача сигналов в диапазонах L1, L2, L5 (таблица 4).

На сегодняшний момент полностью функционирующее созвездие спутников системы GPS состоит из 32 космических аппаратов, группировка насчитывает шесть орбитальных плоскостей, расстояние по долготе восходящего узла составляет  $60^\circ$ . Высота орбиты — 20 200 км, период обращения 11 ч 58 мин.

ИСЗ размещены в шести орбитальных плоскостях и расположены так, что в любой момент времени можно одновременно наблюдать не менее четырёх спутников. Во многих случаях в зоне видимости разом будет пять или шесть спутников, а на коротких промежутках времени можно будет сразу наблюдать до 8–10 ИСЗ.

Орбитальную группировку GPS обслуживает специализированный наземный комплекс управления второго поколения, развёрнутый на базе 2-й оперативной космической эскадрильи Космического командования ВВС США [33] (рисунок 34).



Рисунок 34. Наземный комплекс управления GPS [33]

В НКУ (наземный комплекс управления) системы GPS реализована схема беззапросного эфемеридно-временного обеспечения, закладка информации на борт навигационных аппаратов осуществляется с периодичностью 4–6 ч [33].

Система GPS предоставляет два уровня точности навигации: точный режим определения координат (precise positioning service — PPS) и стандартный режим определения координат (standard positioning service — SPS). Использование режима PPS (который обеспечивает точность 15...20 м) доступно только военным и специально допущенным потребителям. Менее точный режим SPS предоставлен для всеобщего использования.

Ещё до начала испытаний реальной системы GPS с использованием первых экспериментальных спутников предполагалось, что точность навигации, достигаемая при использовании SPS, будет значительно ниже, чем при использовании

PPS. Когда же было обнаружено, что точности оказались примерно одинаковыми, министерство обороны США ввело режим, названный режимом *ограниченного доступа* (Selective Access — SA). Это привело к снижению точности в режиме SPS до 100...400 м (СКО). В 200 г. режим ограниченного или селективного доступа был отменён.

Общие параметры сигналов системы GPS приведены в соответствующем интерфейсном контрольном документе [34].

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ В СИСТЕМЕ GPS NAVSTAR

Для определения трёхмерных координат объекта (широты, долготы и возвышения) приёмник сигналов системы, расположенный на суше, в море или в небе, собирает сигналы от четырёх или более спутников (одновременно или последовательно). На рисунке 35 представлена блок-схема алгоритма расчёта координат исследуемого объекта. Последовательность прецизионных временных импульсов поступает со спутника на приёмник, расположенный на поверхности Земли. Это занимает около одной одиннадцатой секунды. Приёмник системы оценивает время прохождения сигнала, вычитая время своего временного регистра из времени отправления сигнала со спутника. Затем время прохождения сигнала умножается на скорость света и таким образом оценивается расстояние  $R_1$  до первого спутника.

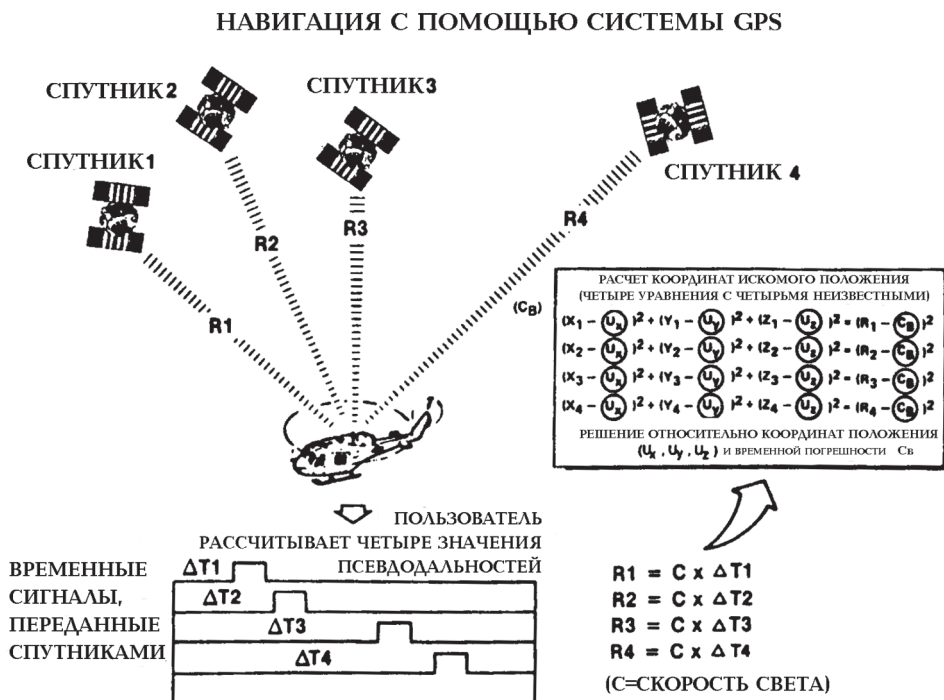


Рисунок 35. Принцип определения координат в системе GPS NAVSTAR

Если часы приёмника точно синхронизированы со спутниковыми часами, три измерения расстояния рассмотренным способом позволяют приёмнику определить три взаимно ортогональные координаты искомого положения. Однако в большинстве приёмников системы NAVSTAR для измерения

текущего времени используются недорогие кварцевые генераторы, которые не синхронизированы относительно существенно более стабильных атомных спутниковых часов. Следовательно, реально приёмник оценивает псевдорасстояние до каждого спутника. Таким образом, все измерения псевдорасстояния искажаются одинаковой временной погрешностью часов приёмника, а тогда погрешность смещения времени в часах приёмника  $C_B$  может быть математически учтена измерением псевдорасстояния до четвёртого спутника. Система из четырёх уравнений с четырьмя неизвестными, представленная в правой части на блок-схеме, содержит в качестве трёх неизвестных координаты  $U_x, U_y, U_z$ . Четвёртая неизвестная величина — погрешность временного смещения  $C_B$ . Три величины —  $X_1, Y_1, Z_1$  — в первом уравнении — текущие координаты положения спутника 1, которые рассчитываются приёмником по эфемеридам (орбитальным параметрам), передаваемым первым спутником. Аналогично рассчитываются координаты текущего положения остальных спутников в момент передачи временной посылки на приёмник.

Принципиальной отличительной чертой американской системы NAVSTAR от российской системы ГЛОНАСС, являлось то, что все КА системы излучают измерительные сигналы на одной и той же частоте, имея в сигнале закодированный идентификационный номер. Соответственно, упрощается приём сигналов на объектах измерения, поскольку в радиотехническом смысле гораздо легче обеспечить высокостабильный приём сигналов одной единственной частоты. При этом, правда, следует помнить, что в такой системе должна быть обеспечена эффективная помехозащищённость, поскольку в необходимых случаях также легко организовать подавление передаваемых сигналов соответствующим мощным наземным передатчиком.

Однако современные тенденции развития навигационных систем состоят в том, что характеристики систем разных стран сближаются: например, в рамках ГЛОНАСС рассматривается возможность внедрения сигналов в кодовым разделением и т. д.

## 4.4 РОССИЙСКАЯ СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГЛОНАСС

Первый навигационный КА системы ГЛОНАСС был запущен 12 октября 1982 г., что и положило начало лётным испытаниям системы ГЛОНАСС. В 1993 г. ГЛОНАСС была принята в опытную эксплуатацию, ещё через два года, в 1995 г., был развёрнут полный состав орбитальной группировки системы, и она была передана в штатную эксплуатацию.

В современном и расширенном виде система ГЛОНАСС включает в себя пять основных частей: космический комплекс (орбитальная группировка, средства выведения, НКУ), функциональные дополнения (система дифференциальных коррекций и мониторинга, региональные и локальные системы мониторинга и дифференциальной навигации), систему высокоточной апостериорной эфемеридно-временной информации, средства фундаментального обеспечения ГЛОНАСС и навигационную аппаратура потребителя [35].

Штатная орбитальная группировка системы ГЛОНАСС состоит из 24 навигационных космических аппаратов в трёх орбитальных плоскостях по восемь аппаратов в каждой. Долготы восходящих узлов орбитальных плоскостей различаются на  $120^\circ$ . Номинальное расстояние между соседними навигационными КА в плоскости по аргументу широты составляет  $45^\circ$ . Интервал повторяемости трасс движения навигационных КА и зон радиовидимости наземными средствами составляет 17 витков (7 сут 23 ч 27 мин 28 с).

Номинальные параметры орбит:

- период обращения 11 ч 15 мин 44 с;
- высота орбиты 19 100 км;
- наклонение орбиты 64,8°.

Типы КА, применяемых в системе ГЛОНАСС и их основные характеристики приведены в таблице 5.

**Таблица 5.** Характеристики космических аппаратов ГЛОНАСС [35]

Характеристики	КА «Глонасс»	КА «Глонасс-М»	КА «Глонасс-К»	КА «Глонасс-К2»
Годы развёртывания	1982–2005	2003–2016	2011–2018	после 2018
Срок активного существования, лет	3,5	7	10	
Масса на орбите, кг	1500	1415	935	1600
Габариты, м	–	2,71×3,05×2,71	2,53×3,01×1,43	2,53×6,01×1,43
Энергопотребление, Вт	–	1400	1270	4370
Тип сигналов	FDMA	В основном FDMA (CDMA на КА 755-761)	FDMA и CDMA	
Сигналы с открытым доступом (для сигналов FDMA приведено значение центральной частоты)	L1OF (1602 МГц)	L1OF (1602 МГц), L2OF (1246 МГц), начиная с № 755: L3OC (1202 МГц)	L1OF (1602 МГц), L2OF (1246 МГц), L3OC (1202 МГц), начиная с № 17Л: L2OC (1248 МГц)	L1OF (1602 МГц), L2OF (1246 МГц), L1OC (1600 МГц), L2OC (1248 МГц), L3OC (1202 МГц)
Наличие ретранслятора системы поиска и спасания	–	–	+	+

За почти четыре десятилетия российская навигационная система прошла различные стадии в своём развитии. С 2003 г. начаты запуски космических аппаратов системы второго поколения «Глонасс-М», которые сегодня и составляют основу орбитальной группировки системы. В 2008 г. начат массовый выпуск навигационной аппаратуры потребителей (НАП). 26 февраля 2011 г. в рамках проводимых лётно-конструкторских испытаний успешно осуществлён запуск первого космического аппарата третьего поколения с улучшенными характеристиками «Глонасс-К».

Одним из наиболее важных направлений развития системы ГЛОНАСС является расширение излучаемых ею навигационных сигналов. Такое расширение будет происходить путём добавления сигналов с кодовым разделением в частотных диапазонах L1, L2, L3. Излучение прежних сигналов с частотным разделением будет продолжаться наряду с излучением новых сигналов.

Начиная с 2019 г. планируется запуск КА «Глонасс-К2» с последующим переходом к семейству аппаратов «Глонасс-К2-М» с преимущественным использованием отечественной электронной компонентной базы.



Точность взаимной синхронизации бортовых шкал времени спутников составляет 20 нс (среднеквадратическое отклонение). Основой для формирования шкалы системного времени ГЛОНАСС является водородный стандарт частоты центрального синхронизатора системы, суточная нестабильность которого составляет  $5 \cdot 10^{-14}$ .

Каждый спутник *излучает* измерительный сигнал, в том числе, на своей собственной частоте, поэтому приёмные устройства наземных терминалов системы ГЛОНАСС устроены несколько сложнее, чем приёмные устройства системы NAVSTAR. Основные параметры системы, формат спутниковых сигналов и регламент работы представлены в интерфейсном контрольном документе ГЛОНАСС [36]. Алгоритм определения координат аналогичен описанному выше для американской системы.

Основные направления развития системы ГЛОНАСС реализуются с учётом мировых тенденций создания и развития спутниковых навигационных систем. К таким тенденциям в настоящее время, прежде всего, следует отнести стремление синергетического объединения всех элементов глобальных и региональных спутниковых систем, их функциональных дополнений, а также ассистирующих систем с целью гарантированного предоставления высококачественных навигационных услуг.

## 4.5 СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА «ГАЛИЛЕО» ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА

По сравнению с российской и американской навигационными системами «Галилео» относительно молодая система. Решение о её создании в ЕС было принято минимум на 10 лет позже, чем в России и США. Тем не менее, в 2005 и 2008 гг. были запущены первые технологические спутники для отработки полезной нагрузки и использующихся технологий, а в 2011 г. были запущены два первых навигационных космических аппарата системы.

**Таблица 6.** Характеристики космических аппаратов «Галилео» [37]

Характеристики	GIOVE-A	GIOVE-B	«Галилео» IOV	«Галилео» FOC
Головной подрядчик	SSTL	EADS Astrium GmbH		OHV AG
Срок активного существования, лет	2		12	>12
Масса на орбите, кг	600	630	700	730
Габариты, м	1,3×1,8×1,65	0,95×0,95×2,4	3,02×1,58×1,59	2,74×1,58×1,59
Энергопотребление, Вт	667	1100	1420	
Сигналы	Только на двух частотах (L1+E5 или L1+E6)	L1, E5, E6		
БСУ (бортовое синхронизирующее устройство)	2 Rb (стабильность 10 нс)	2 Rb (стабильность 10 нс), 2 PNM (стабильность 1 нс)	2 Rb (стабильность 10 нс), 2 PNM (стабильность 1 нс)	2 Rb (стабильность 10 нс), 2 PNM (стабильность 1 нс)

Общая структура «Галилео», в сущности, ничем *не отличается* от ГЛОНАСС и GPS. Но в отличие от вышеперечисленных систем орбитальное построение группировки «Галилео» предполагает использование 27 КА (по 8 космических аппаратов и 1 резервному в каждой плоскости) на трёх круговых орбитах высотой 23 229 км и периодом обращения 14 ч 4 мин 45 с. Наклонение орбиты составляет 56°.

К концу 2018 г. в орбитальной группировке «Галилео» насчитывалось 24 КА, шесть из которых находилась на испытаниях перед вводом в эксплуатацию [37].

Космические аппараты «Галилео», практически в два раза легче аппаратов, применяемых в системах ГЛОНАСС и GPS, по всей видимости за счёт более простой аппаратуры формирования навигационного сигнала (таблица 6).

Наземный комплекс управления «Галилео» содержит два независимых контура: управления космическими аппаратами и эфемеридно-временного обеспечения (рисунок 36).



Рисунок 36. Схема наземного комплекса управления «Галилео» [37]

Принципы определения координат «Галилео» абсолютно аналогичны прочим навигационным системам. Описание характеристик и структуры навигационных сигналов представлены в соответствующем интерфейсном контрольном документе [38].

## 4.6 СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА BEIDOU

Развёртывание орбитальной группировки первого этапа системы BEIDOU (Северный Ковш, китайское название созвездия Большой Медведицы) началось в Китае в 2000 г., когда на геостационарную орбиту было выведено два геостационарных аппарата. В 2003 г. был запущен третий космический аппарат, и система была сдана в эксплуатацию [39].

С 2004 г. начался второй этап построения орбитальной группировки системы. К концу 2012 г. были запущены ещё 14 КА (5 геостационарных, 5 геосинхронных и 4 среднеорбитальных), что фактически завершило формирование системы BEIDOU-2. Система строилась по принципу *обратной совместимости* с предыдущим поколением навигационной системы, следовательно, с учётом применения схемы пассивного позиционирования навигационные услуги могли предоставляться в странах азиатско-тихоокеанского региона [39].

В 2009 г. начато создание системы BEIDOU-3. Предполагается завершить развёртывание орбитальной группировки из 35 КА к 2020 г. [39].

На сегодняшний момент BEIDOU использует космические аппараты на орбитах трёх типов, к 2020 г. в состав группировки будут входить: 5 геостационарных КА (точками стояния 58,75° в.д., 80° в.д., 110,5° в.д., 140° в.д. и 160° в.д.), 27 КА на средней орбите (высота 21 500...21 528 км, период обращения 12 ч 53 мин, наклонение 55°) и 3 КА на геосинхронных наклонных высоких орбитах (три плоскости с пересечением подспутниковой точки трёх орбит на широте 118° в.д., высотой орбиты 35 786 км, наклонением 55°) (таблица 7).

Обозначение сигналов B1, B2, B3 на самом деле не подразумевает использование иного частотного диапазона. Сигналы навигационной системы BEIDOU излучаются в L-диапазоне, более того, современные космические аппараты предполагают полное взаимное дополнение системы с «Галилео» и GPS.

**Таблица 7.** Характеристики космических аппаратов BEIDOU [39]

Характеристики	КА BEIDOU на геостационарной и геосинхронной наклонной орбите	КА BEIDOU на средней круговой орбите
Срок активного существования, лет	~15	~12
Масса на орбите, кг	828	1615
Сигналы	B1 (с открытым и санкционированным доступом), B2 (с открытым доступом), B3 (с санкционированным доступом)	B1 (с открытым и санкционированным доступом), B2 (с открытым доступом), B3 (с санкционированным доступом)
БСУ	2 Rb (китайского производства)	2 Rb (европейского производства)

Наземный комплекс управления BEIDOU построен по стандартной схеме и использует сеть беззапросных измерительных станций, которые расположены на территории КНР [39].

Параметры и характеристики сигналов BEIDOU изложены в соответствующем интерфейсном контрольном документе [40].

## 4.7 РЕГИОНАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА QZSS

В Японии в 2003 г. началась разработка *концепции региональной навигационной спутниковой системы*, которая бы обеспечивала навигационными услугами потребителей в азиатско-тихоокеанском регионе.

Первый космический аппарат Michibiki был запущен уже в 2010 г., а с учётом успешно проведённых лётных испытаний в 2011 г. система была введена в эксплуатацию, предоставляя потребителям навигационные сигналы L1C/A и L2C GPS, а затем L1C и L5 [41].

На сегодняшний день орбитальная группировка QZSS состоит из четырёх космических аппаратов, в ближайшей перспективе предполагается расширение состава до 7 КА (таблица 8): 5 КА на квазизенитной орбите и 2 геостационарных КА.



Рисунок 37. Схема наземного комплекса управления QZSS [41]

Таблица 8. Характеристики космических аппаратов QZSS [41]

Характеристики	QZS-1	QZS-2	QZS-3	QZS-4
Головной подрядчик	Mitsubishi Electric Corporation			
Дата запуска	11.09.2010	01.06.2017	19.08.2017	09.10.2017
Срок активного существования, лет	12	15		
Масса на орбите, кг	4100 кг (стартовая), 1800 кг (сухая)	4000 кг (стартовая), 1550 кг (сухая)	4700 кг (стартовая), 1685 кг (сухая)	4000 кг (стартовая), 1550 кг (сухая)
Габариты, м	2,35×2,35×5,70	2,40×2,85×6,20	2,40×2,40×5,41	2,40×2,85×6,20
Энергопотребление, Вт	667	1100	1420	
Сигналы	L1, L2, L5, L6			

Квазизенитная орбита космических аппаратов QZS1-5 (Quasi-Zenith Satellite System) имеет следующие основные характеристики: высота перигея ~32 000 км, высота апогея ~40 000 км, наклонение 40...47°. Космические аппараты размещаются в трёх орбитальных плоскостях [41].

Наземный комплекс управления (рисунок 37, см. с. 90) включает в себя главную станцию управления на территории Японии (Окинава), командно-измерительные станции и станции закладки информации. Кроме того в комплекс входит сеть станций мониторинга (четыре на территории Японии и пять за её пределами), пункт лазерной дальнометрии и станция управления временем [41].

Также как и для прочих навигационных систем, все характеристики и структура навигационных сигналов изложены в интерфейсном контрольном документе [42].

## 4.8 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Для многих гражданских потребителей низкая точность режима SPS неприемлема. Это привело к разработке метода, названного *дифференциальным* методом определения координат (differential global positioning system — DGPS). Он заключается в установке контрольной станции GPS в точке с точно известными координатами. Станция вычисляет поправки к измерениям по ИСЗ. Эта информация передаётся объектам (потребителям DGPS), в том числе подвижным, которые автоматически вносят поправки в результаты измерений, что приводит к определению места с точностью выше, чем в режиме PPS.

Эффективность дифференциальной GPS весьма высока, поскольку она не только устраняет влияние режима ограниченного доступа, но также исключает или уменьшает воздействие других систематических погрешностей, например:

- немоделируемый уход атомных часов ИСЗ;
- погрешности эфемерид спутников;
- влияние, оказываемое тропосферой и ионосферой.

Система DGPS также позволяет использовать измерения по спутнику, признанному ненадёжным за счёт непрерывного расчёта поправок к псевдодальностям и непрерывного контроля состояния ИСЗ. При существующем построении наземной сети слежения неисправный ИСЗ может излучать сигналы в течение от 2 до 6 ч, прежде чем он будет выявлен и затем исправлен главной станцией управления или прежде чем потребитель будет предупреждён о невозможности его использования. Но при непрерывной выработке поправок в реальном времени неисправный спутник всё ещё может быть использован, или потребитель будет извещён о невозможности работы с конкретным ИСЗ. Таким образом, может быть устранена опасность использования потребителем ошибочных сигналов.

Дифференциальный режим позволяет решать важные задачи:

- обеспечения безопасности плавания в акватории портов и на подходах к ним;
- объединения точной навигационной информации DGPS с радиолокационным изображением и электронными картами, что коренным образом повысит безопасность плавания на море и его эффективность;
- координирования средств навигационного оборудования, что в 10 раз быстрее, чем при ручных методах;



- более быстрого и точного гидрографического промера, выполняемого службой береговой и геодезической съёмки;
- независимого слежения и управления движением в портах, используя DGPS совместно с маяками-ответчиками;
- повышения эффективности и безопасности работы средств минных постановок за счёт точного определения и возвращения к месту постановки;
- направления спасательными центрами средств спасания к терпящим бедствие.

Кроме перечисленных морских существует и множество других областей применения DGPS, включая работы на суше при съёмке, картографировании, наблюдении за лесными пожарами, прокладке дорог и трубопроводов, создании географических информационных систем, обеспечении воздушного, наземного и железнодорожного транспорта и тому подобную высокую точность, которую обеспечивает дифференциальный режим, может проявиться и в других отраслях промышленности, обслуживания и прочей человеческой деятельности.

В последние годы значительно возрос интерес к совместному использованию систем GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), а также прочих навигационных систем, что может привести к разработкам по повышению точности, надёжности, более полному контролю работоспособности системы и другим преимуществам.

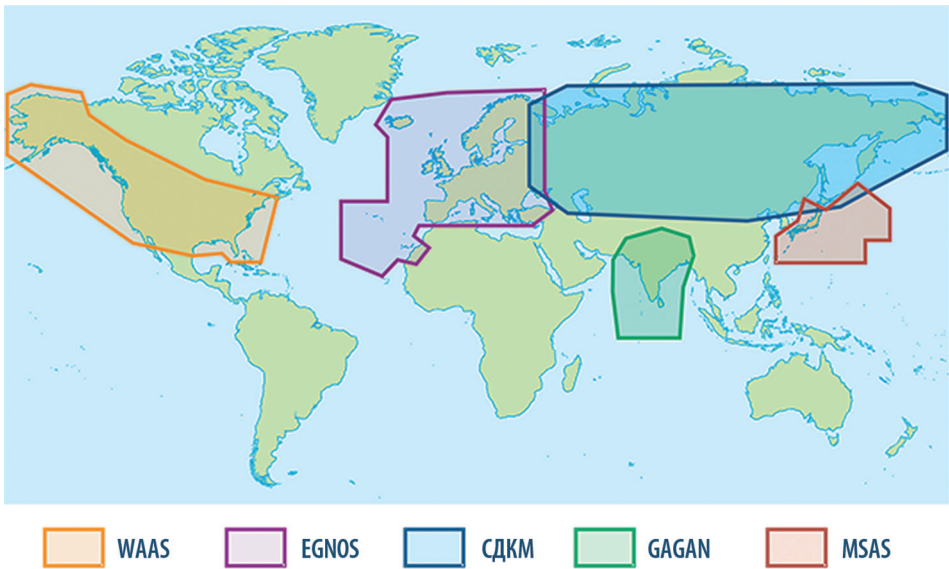
Работы по созданию дифференциальных подсистем активно проводятся в США, Канаде, Великобритании, Франции, Швеции, Норвегии, Финляндии и других странах. Большой вклад в дело развития дифференциальных подсистем, в разработку технической политики в этой области, в подготовку международных стандартов и развёртывание наземных станций дифференциальной подсистемы во многих странах мира вносит *Международная ассоциация маячных служб* (МАМС, International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities — IALA), её исполнительный совет и радионавигационный комитет. Исходя из списка, который составлен радионавигационным комитетом МАМС и охватывает все действующие и планируемые станции, в 1997 г. в мире было развёрнуто более 80 станций. Базой для них стали существующие радиомаяки, зона действия которых охватывает почти все прибрежные воды Северной Америки и Европы.

Одним из основных элементов ГЛОНАСС, определяющим точность и надёжность навигации, является *российская широкозонная система дифференциальной коррекции и мониторинга радионавигационных полей* (СДКМ). Эта система является функциональным дополнением к спутниковым навигационным системам ГЛОНАСС и GPS. Зоны обслуживания СДКМ и широкозонных дифференциальных подсистем Евросоюза EGNOS, а также WAAS (Wide Area Augmentation System) (США), MSAS (Япония), GAGAN (Индия) приведены на рисунке 38 (см. с. 93).

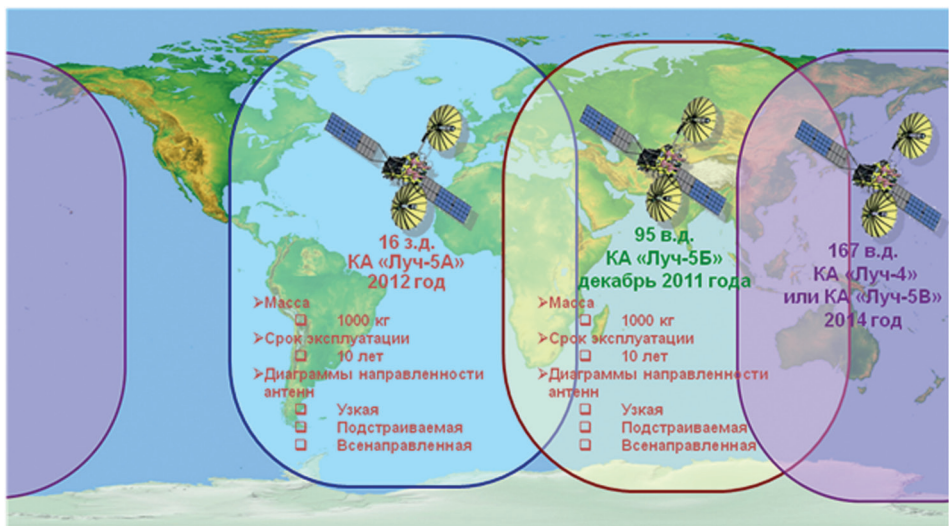
СДКМ разрабатывается в Российской Федерации с начала 2000-х гг. К настоящему времени завершены разработки основных элементов системы — комплекса сбора измерений, включающего станции сбора измерений на территории Российской Федерации и за рубежом, центра СДКМ и комплекса доставки информации потребителям.

В 2014 г. развёрнут космический сегмент СДКМ на базе геостационарных космических аппаратов МКСР «Луч» (рисунок 39, см. с. 93). Каждый из геостационарных аппаратов ретранслирует дифференциальные поправки к навигационному сигналу тематическим потребителям.





**Рисунок 38.** Системы функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем [43]



**Рисунок 39.** Зоны покрытия КА космического сегмента СДКМ на базе МКСП «Луч»

Сеть станций сбора измерений СДКМ в настоящее время включает 18 станций на территории России и четыре за рубежом (одна станция в Бразилии (Бразилиа), три станции в Антарктиде). Планируется дальнейшее расширение сети станций СДКМ как на территории России, так и за рубежом (Никарагуа, Индонезия, Австралия и другие).

# ГЛАВА 5 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ

## 5.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Человечество ощущает окружающий мир через пять органов чувств, определённых ему природой. Некоторые чувства (тактильные и вкусовые) требуют контакта наших органов ощущения с объектами. Однако мы приобретаем много информации относительно нашего окружения посредством особых чувств — зрения и слуха, которые не требуют непосредственного контакта между органами ощущения и внешними объектами наблюдения. Другими словами, в повседневной жизни мы постоянно выполняем *дистанционное зондирование*.

В общем смысле, ДЗ — это процесс обнаружения, наблюдения или ощущения (*зондирование*) объектов или явлений в удалённых (*дистанционное*) местах. При этом измерительные *датчики* или сенсоры не имеют непосредственного контакта с наблюдаемыми объектами или явлениями. Человеческий глаз — пример системы дистанционного зондирования в самом общем смысле (рисунок 40).

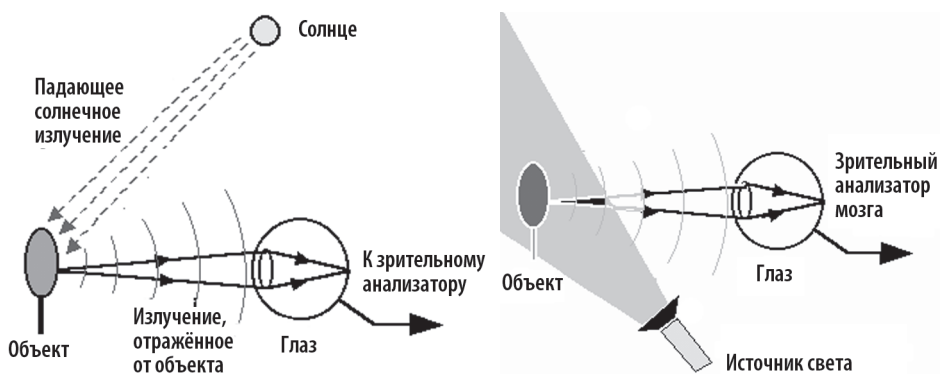


Рисунок 40. Зрительное восприятие окружающего мира.  
Пример ДЗ пассивного (слева) и активного (справа)

В ситуации освещения объектов на Земле солнечным светом глаз осуществляет пассивное ДЗ отражённого объектом солнечного света. Если, например, в ночное время человек использует для подсветки электрический карманный фонарь, глаз становится примером активной системы ДЗ.

В частности, ДЗ обычно относят к технологии сбора информации о *земной поверхности* (суше и океане) и об *атмосфере*, использующей различные изме-

рительные приборы на борту *воздушной* (самолёт, воздушные шары) или *космической* (спутники, космические челноки) платформы. Таким образом, ДЗ само по себе является одной из геоинформационных технологий.

Для доставки информации от исследуемых объектов и явлений к измерительным датчикам через промежуточную среду необходимо иметь соответствующий физический *носитель*. В ДЗ в качестве такого носителя используется *электромагнитное излучение*. Выходным информационным продуктом измерительной системы дистанционного зондирования обычно является *изображение*, адекватно представляющее наблюдаемую сцену. Чтобы извлечь полезную информацию из изображения, на следующем этапе требуется его *анализ и интерпретация*.

*Электромагнитные волны* — энергия, перемещаемая через пространство в форме периодических колебаний электрического и магнитного полей. Все электромагнитные волны распространяются в пространстве с одинаковой скоростью  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  м/с, обычно известной как *скорость света*. Электромагнитная волна (рисунок 41) характеризуется *частотой и длиной волны*.

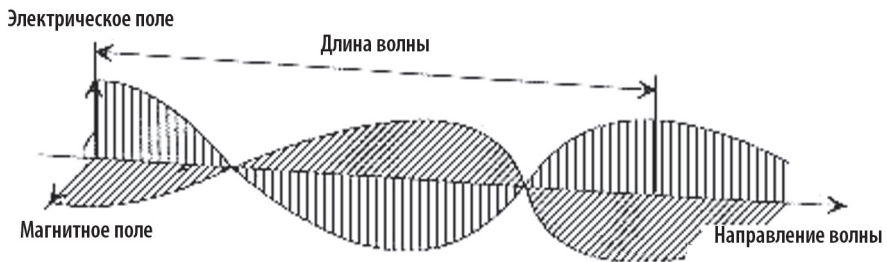


Рисунок 41. Электромагнитная волна

Две эти величины связаны со скоростью света уравнением:

$$\text{скорость света} = \text{частота} \times \text{длина волны.}$$

Частота (длина волны) электромагнитной волны зависит от источника излучения. Диапазон частот электромагнитного излучения, с которым сталкиваются люди в реальном физическом мире, необычайно широк и изменяется от очень низкой частоты электрических волн, произведённых линиями передачи электроэнергии, до самой высокой частоты гамма излучения, возникающего при взаимодействии атомных ядер. Этот широкий диапазон частот электромагнитных волн и составляет *электромагнитный спектр* (рисунок 42).



Рисунок 42. Электромагнитный спектр

Электромагнитный спектр может быть условно разделён на несколько диапазонов длин волн, среди которых только узкая полоса приблизительно от 400 до 700 нм является видимой человеческим глазом. Обратим внимание, что не имеется никакой резкой границы между этими диапазонами. Границы, показанные на рисунке 42, приближительны и перекрываются между двумя смежными диапазонами.

*Единицы длины волны:* 1 мм = 1000 мкм; 1 мкм = 1000 нм.

*Единицы частоты:* 1 ГГц =  $10^9$  Гц.

Диапазон *радиоволн* лежит в пределах от 10 см до 10 км, микроволновый — от 1 мм до 1 м.

*Микроволновый* диапазон в свою очередь разделён на несколько частотных поддиапазонов:

<i>P:</i>	0,3...1 ГГц (30...100 см)
<i>L:</i>	1...2 ГГц (15...30 см)
<i>S:</i>	2...4 ГГц (7,5...15 см)
<i>C:</i>	4...8 ГГц (3,8...7,5 см)
<i>X:</i>	8...12,5 ГГц (2,4...3,8 см)
<i>Ku:</i>	12,5...18 ГГц (1,7...2,4 см)
<i>K:</i>	18...26,5 ГГц (1,1...1,7 см)
<i>Ka:</i>	26,5...40 ГГц (0,75...1,1 см)

*Инфракрасный* диапазон находится от 0,7 до 300 мкм и включает следующие поддиапазоны:

<i>Ближний инфракрасный ИК (NIR):</i>	0,7...1,5 мкм
<i>Коротковолновый инфракрасный ИК-В (SWIR):</i>	1,5...3 мкм
<i>Средневолновый инфракрасный ИК-С (MWIR):</i>	3...8 мкм
<i>Длинноволновый инфракрасный ДВИК (LWIR):</i>	8...15 мкм
<i>Дальний инфракрасный (FIR):</i>	длиннее, чем 15 мкм

NIR и SWIR также известны как инфракрасные диапазоны преобладающего отражённого излучения. MWIR и LWIR — это тепловые инфракрасные диапазоны, в которых преобладает собственное излучение подстилающей поверхности.

*Видимый* диапазон представляет собой узкую полосу спектра электромагнитных волн, которая простирается от 400 нм (фиолетовый цвет) до приблизительно 700 нм (красный цвет). Различные цветовые компоненты видимого спектра составляют следующие поддиапазоны:

<i>Красный:</i>	610...700 нм
<i>Оранжевый:</i>	590...610 нм
<i>Жёлтый:</i>	570...590 нм
<i>Зелёный:</i>	500...570 нм
<i>Голубой:</i>	450...500 нм
<i>Синий:</i>	430...450 нм
<i>Фиолетовый:</i>	400...430 нм
<i>Ультрафиолетовый:</i>	3...400 нм

## 5.2

### ЗАДАЧИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ И ПРИБОРНЫЙ РЯД

Восстановление характеристик водной среды по ДДЗ является следствием процесса проведения косвенных измерений различных параметров, поскольку в строгой математической постановке это есть решение многопараметрических

обратных задач. Комплекс таких характеристик определяется при измерениях физических, океанологических, гидрометеорологических, биологических, химических и других параметров как на поверхности, так и в толще водной среды. Требования по точности измерений перечисленных показателей определяют методологию сбора и обработки информации об океане.

Существующие технические средства, обеспечивающие требуемую точность при традиционных контактных измерениях, размещаются на сети постов наблюдения, включающих как стационарные, так и подвижные (на дрейфующих буях и специализированных научно-исследовательских судах). Однако большие размеры исследуемых акваторий делают задачу сбора данных контактных измерений чрезвычайно дорогой при использовании уже нескольких одновременно работающих судов. Кроме того, несинхронность собранной информации по времени и пространству не позволяет однозначно интерпретировать полученные результаты при последующей обработке.

**Таблица 9.** Общие требования к океанографическим параметрам

Параметр	Погрешность	Разрешение		Задержка получения
		пространственное, км	временное	
Ветер				
Скорость	1 м/с	25	12 ч	3 ч
Направление	10 град	25	12 ч	3 ч
Температура поверхности океана (ТПО)				
Глобальная	0,5 град	25	3 сут	12 ч
Локальная	0,1 град	10	1 сут	12 ч
Волнение				
Значимая высота волн	0,3 м	25	12 ч	3 ч
Направление	10 град	25	12 ч	3 ч
Ледяной покров				
Протяжённость кромки льда	15 %	20	3 сут	12 ч
Толщина	2 м	50	3 сут	12 ч
Возраст	Новый, одно- и многолетний	20	3 сут	12 ч
Водные массы				
Содержание хлорофилла	40 %	0,4	2 сут	8 ч
Мутность	3 градации	0,4	2 сут	10 ч
Приповерхностные течения				
Скорость	5 см/с	20	1 сут	1 сут
Направление	10 град	20	1 сут	1 сут

Использование методов ДЗ океана позволяет избежать большинства рассмотренных проблем, однако наряду с очевидными преимуществами космические данные обладают и специфическими особенностями. Это связано с тем, что из космоса всегда измеряются только энергетические характеристики либо собственного излучения морской поверхности (ИК-радиометрия) — либо

отражённого солнечного излучения (спектрометрические оптические измерения). В тоже время интересующий пользователя набор параметров может иметь очень слабые проявления в зарегистрированном со спутника сигнале.

Известно, что класс обратных задач, к которому относятся рассматриваемые проблемы, некорректен в постановке, и поэтому не имеет однозначных решений. В связи с этим напрямую использовать космические данные для восстановления абсолютных значений параметров морской среды довольно трудно. Вместе с тем, системный подход к использованию разнородных данных о Мировом океане, полученных как контактными, так и дистанционными методами с использованием математических моделей океана, позволяет резко улучшить качество информационного обеспечения практических задач, решаемых пользователями.

Ещё одна проблема связана с тем, что объём данных, получаемых из космоса, на несколько порядков величины превышает количество данных, получаемых традиционно, что делает их совместную обработку весьма затруднительной. Создание надёжных технических средств автоматизации сбора и обработки разнородных данных, особенно в условиях научно-исследовательских судов, находящихся в автономном плавании в Мировом океане, также как и самолётов-лабораторий, является актуальной и важной научно-технической проблемой. Соответственно и разработка упрощённых методов, алгоритмов и комплексного программного обеспечения является чрезвычайно актуальной задачей. В рассмотренном контексте роль ГИС переоценить нельзя.

Общие требования к океанографическим параметрам, точности их определения, пространственному разрешению и временному режиму сбора приведены в таблице 9.

Определим теперь набор спутниковой измерительной аппаратуры, предназначенной для дистанционного определения указанных океанографических параметров.

*Альтиметр* — микроволновый радар, который измеряет вертикальное расстояние между космическим аппаратом и поверхностью океана. Измерения позволяют оценить топографию и взволнованность морской поверхности, по отношению к которой рассчитываются океанский геоид, поверхностные течения и средняя высота волн. Сегодня альтиметры работают на спутниках Sentinel-3A/B (ЕКА) и Jason-2/3 (США/ЕКА). Кроме того, в 2021 г. предполагается запуск принципиально нового альтиметра KaRIn на борту КА SWOT (Surface Water and Ocean Topography). Подробные характеристики приборов приведены в статье [44].

*Сканер цвета* — радиометр, измеряющий интенсивность излучения, отражённого океаном в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения в широкой полосе сканирования по ходу полёта спутника. Измерения представляют собой изображения распределений цвета океана, из которых оцениваются концентрации хлорофилла и взвесей. По крайней мере до 2020 г. будут эксплуатироваться приборы MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленные на американских спутниках Terra и Aqua, в 2017 г. был запущен JPSS-1 (Joint Polar Satellite System) (NOAA-20, National Oceanic and Atmospheric Administration, США) со сканером VIIRS (Visible/Infrared Imager Radiometer Suite), а также Sentinel-3A/B (запущены в 2016 и 2018 гг.) с прибором OLCI (Ocean and Land Color Instrument).

*Инфракрасный сканер* — радиометр, измеряющий интенсивность излучения, испускаемого морем в инфракрасном диапазоне в полосе сканирования по направлению полёта спутника. Измерения представляют собой изображения распределений температуры на морской поверхности. Сегодня наиболее известными являются приборы AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) спутника NOAA и MODIS на Terra/Aqua. Начиная с 2016 г. на орби-



те начали функционировать радиометры нового поколения — SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) (фактически построен на заделе AATSR — Advanced Along-Track Scanning Radiometer [45]) спутников Sentinel-3A(B), а также прибор VIIRS космического аппарата США JPSS-1 (NOAA-20).

*Микроволновый сканер* — радиометр, измеряющий интенсивность излучения, испускаемого морем в микроволновом диапазоне. Измерения представляют собой микроволновую яркостную температуру, по которой могут быть оценены: скорость ветра, водяной пар, ТПО (температура поверхности океана), СПО (солёность поверхности океана), сплочённость льда. Сегодня эксплуатируются и предполагаются к дальнейшему использованию на перспективных ИСЗ следующие типы микроволновых радиометров: SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) спутника DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) (США), AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) на спутнике NOAA, AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) спутника Aqua, ATMS — JPSS-1 (Advanced Technology Microwave Sounder) (NOAA-20) и MWR (Microwave Sounder) спутника Sentinel-3A/B. Сканер ATMS (JPSS-1) представляет собой последнее поколение сканеров, фактически интегрируя функционал приборов AMSU-A, AMSU-B и AMSU-B/MHS КА серии NOAA.

*Скаттерометр* — микроволновый радар, измеряющий взволнованность морской поверхности и скорость приводного ветра в сканирующем режиме в любом направлении от спутника. Измерения дают амплитуду коротких поверхностных волн, которые находятся в равновесии с местным ветром и по которым может быть оценена скорость приводного ветра. Примеры: скаттерометры SeaWinds на спутниках QuickScat, ASCAT (Advanced Scatterometer) (EUMETSAT — European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites), OSCAT (Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio) (OceanSat-2), а также RapidScat на одноимённом КА [46].

*Радар с синтезированной апертурой (РСА)* — микроволновый радар с электронным синтезом размера антенны для достижения высокого пространственного разрешения. Измерения представляют информацию по таким океанографическим свойствам как завихрения, внутренние волны (ВВ), дождь, границы течений и т. д. Дополнительно может быть получена информация по положению и характеру морского льда, а также скорости его дрейфа. РСА эффективно используются на эксплуатируемых ИСЗ Radarsat-2 (Канада) и Sentinel-1A/B.

В ближайшей перспективе планируется запуск КА Radarsat Constellation Mission (RCM) с SAR (Synthetic Aperture Radars) нового поколения на борту. От своего предшественника RCM будет отличаться улучшенным пространственным и временным разрешением.

При создании алгоритмов восстановления океанографических параметров по ДДЗ приходится уделять особое внимание корректному учёту искажающего влияния слоя атмосферы между дистанционным датчиком и морской поверхностью, а также характеру взаимодействия излучения с взволнованной морской поверхностью [47].

### 5.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ИНФРАКРАСНЫХ И МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В таблице 10 приведены основные обозначения и определения энергетических величин. При измерении энергетических физических величин важно иметь в виду различия между точечными и протяжёнными источниками излучения.

Таблица 10. Энергетические величины

Обозначение	Наименование	Определение	Единица измерения
$U$	Энергия излучения	Энергия, переносимая электромагнитными волнами	Дж
$S$	Плотность энергии излучения	Энергия излучения на единицу объёма	Дж·см <sup>-3</sup>
$P$	Лучистый поток	Скорость передачи энергии излучения	Вт
$W$	Плотность излучения	Лучистый поток, излучаемый с единицы площади источника	Вт·см <sup>-2</sup>
$Q$	Плотность излучения фотонов	Число фотонов, испускаемых в секунду с единицы площади	фотон·с <sup>-1</sup> ·см <sup>-2</sup>
$J$	Сила излучения	Лучистый поток в единичном телесном угле	Вт·ср <sup>-1</sup>
$N$	Лучистость (яркость)	Лучистый поток в единичном телесном угле с единицы площади	Вт·см <sup>-2</sup> ·ср <sup>-1</sup>
$H$	Облучённость (освещённость)	Лучистый поток, падающий на единицу площади	Вт·см <sup>-2</sup>
$\epsilon$	Коэффициент излучения (излучательная способность)	Отношение плотности излучения источника к плотности излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре	—
$\alpha$	Коэффициент поглощения (поглощательная способность)	Отношение поглощённого лучистого потока к падающему лучистому потоку	—
$\rho$	Коэффициент отражения	Отношение отражённого лучистого потока к падающему лучистому потоку	—
$\tau$	Коэффициент пропускания	Отношение пропущенного лучистого потока к падающему лучистому потоку	—

Конечно, физически источник не может быть точечным, однако на практике можно полагать точечными звёзды и небольшие (в смысле пространственных размеров) источники, удалённые на значительное расстояние. Один и тот же источник в зависимости от расстояния, с которого производится наблюдение, может быть и точечным, и протяжённым. Например, факел двигателя реактивного самолёта на расстоянии 10...15 км может рассматриваться как точечный источник, этот же факел с расстояния 3 м будет представляться наблюдателю протяжённым источником. При использовании приёмника излучения без оптики принято считать точечным источник, удалённый от приёмника на расстояние, более чем в 5–10 раз превышающее максимальный размер источника [48]. При наличии оптики точечным считается источник, изображение которого меньше приёмника. Иными словами, точечный источник не заполняет всего поля зрения оптического прибора, протяжённый же источник заполняет.

Точечный источник характеризуют силой излучения  $J$ , а протяжённый — лучистостью (энергетической яркостью)  $N$ . Облучённость от точечного источника на расстоянии от него вычисляется по известной формуле

$$H = \frac{J}{d^2}. \quad (9)$$

Если расстояние  $d$  не менее чем в 5 раз превышает наибольший размер источника, ошибка при использовании формулы не превышает 1%. Облучённость от протяжённого источника может быть вычислена интегрированием.

При измерении коэффициента отражения от поверхности нужно учитывать свойства поверхности. Если поверхность зеркальная, не составляет особого труда собрать и измерить весь отражённый поток. Для рассеивающей поверхности эта задача может оказаться довольно сложной. Рассеивающую поверхность называют полностью диффузной или подчиняющейся закону Ламберта, когда отражённый в данном направлении поток, отнесённый к единице телесного угла, пропорционален косинусу угла между рассматриваемым направлением и нормалью к поверхности. Аналогично можно говорить о полностью диффузном источнике. Лучистость диффузного источника одинакова по всем направлениям.

Многие реальные поверхности достаточно точно следуют закону Ламберта. Идеальным ламбертовским излучателем является *абсолютно чёрное тело* (АЧТ). Для ламбертовского излучателя справедливы соотношения

$$W = \pi N = \frac{\pi J}{A}, \quad (10)$$

$$J = \frac{WA}{\pi} = NAD = \int_{p_0}^p \alpha dp, \quad (11)$$

$$N = \frac{W}{\pi A} = \frac{J}{A}, \quad (12)$$

где  $A$  — площадь излучателя.

Для характеристики распределения по спектру величин  $P$ ,  $J$ ,  $N$ ,  $H$  вводится понятие *спектральной плотности* этих величин. Так, например, спектральная плотность лучистого потока  $P_\lambda = \partial P / \partial \lambda$  имеет единицу измерения Вт·мкм<sup>-1</sup>. Лучистый поток, заключённый в интервале  $\lambda_1 - \lambda_2$ , находят по формуле:

$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda d\lambda. \quad (13)$$

Если интегрирование проводить от 0 до  $\infty$ , то получим *полный* лучистый поток. Рассматривая кривые распределения спектральной плотности излучения источников по длинам волн, можно заметить, что имеется два существенно различных типа источников. Нагретые твёрдые и жидкие тела характеризуются непрерывным распределением излучения с единственным максимумом, положение которого зависит от температуры источника. Такие источники называются *тепловыми*. Излучение пламени или электрического разряда в газах не непрерывно по спектру, а сконцентрировано в узких спектральных интервалах — линиях и полосах. Такие источники называются *селективными*. Положение линий и полос в спектре однозначно характеризуют излучающие атомы и молекулы, поэтому изучение спектров является одним из наиболее мощных методов аналитической химии.

Далее кратко рассмотрим законы теплового излучения.

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Фундаментальным понятием при рассмотрении теплового излучения твёрдых тел является понятие об абсолютно чёрном теле. Абсолютно чёрным

называется тело, поглощающее всё падающее на него излучение любых длин волн. Спектральное распределение излучения абсолютно чёрного тела описывается законом Планка:

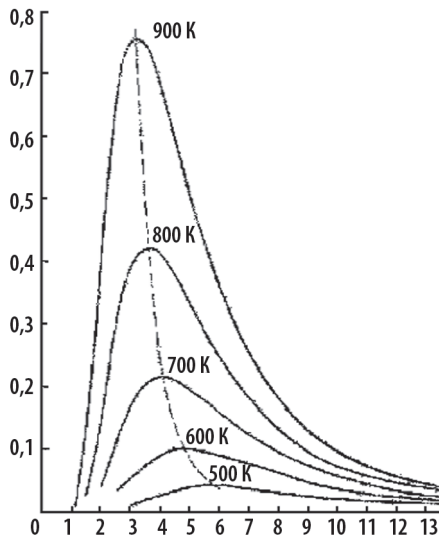
$$W_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1}. \quad (14)$$

Данную формулу обычно записывают в виде

$$W_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (15)$$

здесь  $W_{\lambda}$  — спектральная плотность излучения,  $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}$ ;  $\lambda$  — длина волны, мкм;  $h$  — постоянная Планка  $(6,6256 \pm 0,0005) \cdot 10^{-34} \text{ Вт}\cdot\text{с}^2$ ;  $T$  — абсолютная температура, К;  $c$  — скорость света  $(2,997925 \pm 0,000003) \cdot 10^{10} \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $c_1 = 2\pi hc^2 = (3,7415 \pm 0,0003) \cdot 10^4 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{мкм}^4$ ;  $c_2 = ch/k = (1,43879 \pm 0,00019) \cdot 10^4 \text{ мкм}\cdot\text{К}$ ;  $k$  — постоянная Больцмана,  $k = (1,38054 \pm 0,00018) \cdot 10^{-23} \text{ Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{К}^{-1}$ .

Спектральная плотность излучения АЧТ в диапазоне температуры от 500 до 900 К показана на рисунке 43, из которого видно, что полный лучистый поток, излучаемый АЧТ и пропорциональный площади, ограниченной осью абсцисс и соответствующей кривой, быстро возрастает с ростом температуры.



**Рисунок 43.** Спектральная плотность излучения абсолютно чёрного тела при некоторых температурах

Закон этого возрастания можно получить, проинтегрировав уравнение Планка (14):

$$W = \int_0^{\infty} W_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4. \quad (16)$$

Полученное соотношение называется законом Стефана — Больцмана, а величина — постоянной Стефана — Больцмана. Она равна

$$\sigma = (5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-12} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}.$$

Таким образом, полное излучение абсолютно чёрного тела увеличивается пропорционально четвёртой степени температуры.

Продифференцировав уравнение Планка (14), получим закон смещения Вина

$$\lambda_{\text{макс}} T = a, \quad (17)$$

где  $\lambda_{\text{макс}}$  — длина волны, на которой наблюдается максимум распределения спектральной плотности излучения по длинам волн;  $a = (2897,8 \pm 0,4)$  мкм·К.

Пунктирная кривая на рисунке 43 является геометрическим местом максимумов, смещающихся с ростом температуры в сторону коротких длин волн. В другой форме закон смещения Вина даёт значения максимума спектральной плотности излучения в зависимости от температуры

$$W_{\lambda_{\text{макс}}} = bT, \quad (18)$$

где  $b = 1,2862 \cdot 10^{-15}$  Вт·см<sup>-2</sup>·мкм<sup>-1</sup>·К<sup>-5</sup>.

Плотность излучения  $W'$  реальных тел всегда меньше плотности излучения  $W$  абсолютно чёрного тела при той же температуре. Отношение

$$\varepsilon = \frac{W'}{W} \quad (19)$$

называется *коэффициентом излучения* тела. Данное уравнение является одной из форм закона Кирхгофа. Коэффициент излучения зависит от вида материала, обработки его поверхности и может меняться с изменением длины волны излучения и температуры. Поэтому для коэффициента излучения более общим является соотношение:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) W_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} W_{\lambda} d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) W_{\lambda} d\lambda. \quad (20)$$

По характеру изменения спектрального коэффициента излучения все источники могут быть разделены на три типа:

- 1) абсолютно чёрное тело (полный излучатель),  $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon = 1$ ;
- 2) серые тела,  $\varepsilon(\lambda) < 1$ ;
- 3) селективные излучатели, для которых  $\varepsilon(\lambda)$  меняется с длиной волны.

В ограниченном спектральном интервале селективные излучатели могут иногда рассматриваться как серые. Когда энергия излучения падает на поверхность, часть энергии ( $\alpha$ ) может поглощаться, часть ( $\rho$ ) — отражаться и часть ( $\tau$ ) — пропускаться. Сумма  $\alpha + \rho + \tau$  равна единице. *Коэффициент поглощения  $\alpha$  АЧТ* по определению равен единице. Из закона Кирхгофа следует, что при заданной температуре коэффициент излучения тела равен его коэффициенту поглощения, т. е.

$$\varepsilon = \alpha. \quad (21)$$

Для непрозрачных тел ( $\tau = 0$ )

$$\alpha = \varepsilon = 1 - \rho. \quad (22)$$

Измерить *коэффициент отражения* тела часто бывает легче, чем коэффициент излучения, поэтому полученное выражение используют для вычисления величины  $\varepsilon$  по измеренной величине  $\rho$ .

Коэффициент излучения зависит от направления измерения, и соответственно можно ввести понятие о полусферическом коэффициенте излучения  $\varepsilon_h$

и коэффициенте излучения  $\varepsilon_\theta$  в направлении  $\theta$ . Если угол  $\theta$  между направлением измерения и нормалью к поверхности равен нулю, коэффициент излучения  $\varepsilon_n = \varepsilon_{\theta=0}$  называют нормальным. Каждый тип коэффициента излучения может быть как полным (оценённым во всём диапазоне длин волн), так и спектральным. Большинство инфракрасных систем работает в небольших телесных углах, а наибольший интерес представляют коэффициенты излучения  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_n$ . Различия между  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_n$ , и  $\varepsilon_h$  обычно невелики, и ими можно пренебречь. Наиболее велики эти различия для полированных металлов: для них  $\varepsilon_h$  примерно на 20 % больше, чем  $\varepsilon_n$ . Для диффузных ламбертовских излучателей  $\varepsilon_n = \varepsilon_\theta = \varepsilon_h$ . Для диэлектриков отношение  $\varepsilon_h/\varepsilon_n$  меняется в пределах 0,95...1,05, а для проводящих материалов — в пределах 1,05...1,33.

## ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТПО ПО ДАННЫМ ИК-ИЗМЕРЕНИЙ

Основу метода дистанционного восстановления ТПО составляет измерение собственного теплового излучения системы «океан – атмосфера» в окнах прозрачности атмосферы 3...5 и 8...12 мкм.

Измерения в инфракрасных тепловых каналах позволяют определить эквивалентную температуру излучения подстилающей поверхности, которое характеризуется комбинацией собственного излучения поверхности и отражением части падающей на неё излучения. Понимание этого обстоятельства чрезвычайно важно при изучении энергии, излучаемой, в частности, океанской поверхностью. Так, инфракрасное излучение поверхности океана формируется собственным излучением приповерхностного молекулярного слоя воды, а также отражением части падающей на поверхность электромагнитной энергии от атмосферных источников, таких как облака, водяной пар, углекислый газ и аэрозоль. Сумма этих двух излучающих компонент и определяется как эффективная спектральная плотность излучения океанской поверхности  $W_{\varepsilon\lambda}$

$$W_{\varepsilon\lambda} = \varepsilon_\lambda W_{B\lambda} + \rho_\lambda W_{a\lambda}, \quad (23)$$

где первый член соответствует компоненте собственного излучения, а второй — доле излучения, отражённого поверхностью. Дополнительно должно быть также учтено влияние инфракрасного поглощения и излучения различных составляющих атмосферы (главным образом газовых молекул водяного пара, углекислого газа, азота и озона). Для спутникового прибора интенсивность излучения на верхней границе атмосферы при заданном *зенитном угле* и длине волны задаётся уравнением:

$$I_\lambda^\uparrow(\theta) = W_{\varepsilon\lambda}(T_S)\tau_{\lambda\alpha(\theta)} + \int W_{\alpha\lambda}(T_\alpha) d\tau_\lambda(\theta), \quad (24)$$

где  $W_{\varepsilon\lambda}$  — эффективная спектральная плотность излучения при температуре  $T_S$ ;  $\tau_{\lambda\alpha(\theta)}$  — спектральное пропускание всей атмосферы;  $\tau_\lambda$  — спектральное пропускание атмосферы, толщина слоя которой определяется от заданного уровня до верхней границы,  $W_{\alpha\lambda}$  — спектральная плотность излучения атмосферы при температуре  $T_\alpha$ .

В приведённом уравнении первый член в правой части — энергия, излучаемая в космос океанской поверхностью, а второй — излучение безоблачной атмосферы, проинтегрированное от поверхности океана до верхней границы атмосферы. Как было сказано выше, в спектральных каналах, где сильно молекулярное поглощение атмосферных газов, атмосфера непрозрачна для какого-либо практического применения. Вместе с тем, имеются «окна прозрачности атмосферы», в которых эффект молекулярного поглощения незначителен, что иллюстрируется на рисунке 44 (см. с. ).



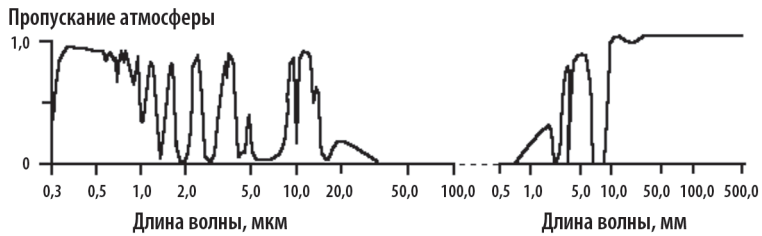


Рисунок 44. Спектральное пропускание атмосферы

Точное определение границ окон прозрачности затруднено, поскольку пропускание атмосферы сильно зависит от концентрации активно поглощающих газовых компонент в каждый конкретный момент времени. Кроме того, расстояние, которое излучение проходит в поглощающем слое, также является влияющим фактором, поскольку при наклонном зондировании океана слой атмосферы становится толще и, следовательно, концентрация поглощающих газов увеличивается.

Известно, что максимум функции Планка при температуре 300 К находится примерно на длине волны 10 мкм. Отсюда следует, что окна прозрачности 8...12 и 3...5 мкм обеспечивают максимальное пропускание атмосферы в инфракрасном диапазоне. Отличие двух этих каналов заключается в том, что в окне 3...5 мкм соотношение отражённого океанской поверхностью солнечного излучения и доли собственного излучения поверхности почти равны. Таким образом, в дневное время данные, получаемые в этом окне, будут искажены отражённым солнечным светом. Фактически, только диапазон 8...12 мкм является наиболее эффективным как для дневных, так и для ночных измерений. Именно по этой причине данный канал используется для пассивного дистанционного зондирования океана в инфракрасном диапазоне.

Из уравнения, связывающего интенсивность излучения на верхней границе атмосферы с температурой океанской поверхности, видно, что измерения в одном спектральном канале недостаточно для восстановления ТПО, так как в правую часть уравнения, даже в пренебрежении вкладом атмосферного рассеяния, входят две неизвестных величины: собственно ТПО и коэффициент пропускания атмосферы.

На практике для выхода из данного положения используют различные методические приёмы. *Первый* — использование модельного коэффициента пропускания атмосферы, когда его значение берётся из таблиц. *Второй* приём использует измерение в двух соседних спектральных каналах, предполагая, что коэффициент пропускания в выбранных каналах практически одинаков. *Третий* приём применяет измерение в нескольких спектральных каналах при нескольких углах визирования. В случае измерения излучения от выбранного участка поверхности под двумя разными углами определяется прямое влияние атмосферы за счёт того, что излучение от одного и того же участка проходит через разную оптическую атмосферную толщу в одном и том же спектральном канале.

В настоящее время реально достижима абсолютная точность восстановления ТПО 0,35 К за счёт комбинирования измерений в нескольких окнах прозрачности: измерения в окне 8...12 мкм и комбинируются с измерениями в окне 3,7...4 мкм [49]. Современные, а также планируемые к запуску в ближайшем будущем ИК-радиометры обеспечивают повышение абсолютной точности измерений ТПО до 0,2 К. Реализация такой точности позволяет напрямую использовать данные дистанционных измерений ТПО в моделях прогноза состояния верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) океана [50].

Следует отметить, что спутниковые радиометры измеряют температуру поверхностного слоя толщиной около 0,1 мм, которая, вообще говоря, отличается на несколько десятых долей градуса от температуры слоя воды всего на несколько сантиметров глубже [51]. Температура этого слоя и принимается за ТПО при традиционных контактных измерениях обычными термометрами, устанавливаемыми на судах и буях.

Учёт данного обстоятельства важен ещё и потому, что по мере возрастания точности измерений ТПО дистанционными датчиками спутниковые данные всё более эффективно используются в моделях динамики океана в дополнение, а часто и вместо данных контактных измерений. Отметим, что на сегодня технология дистанционного измерения ТПО наиболее отработана и имеет ряд конкретных практических применений в различных отраслях народного хозяйства [52].

Окно 8...12 мкм является наиболее широким во всей ИК-области спектра участком относительно высокой прозрачности атмосферы. Границы длинноволнового окна прозрачности определяется линиями поглощения воды (6,3 мкм) и углекислого газа (15 мкм). На ослабление ИК-излучения во всём этом окне прозрачности наибольшее влияние оказывают пары воды. Помимо водяного пара в определённых случаях необходимо принимать во внимание поглощение озонем (9,6 мкм) и углекислым газом (9,4 и 10,4 мкм) [53].

Поглощение в ИК-диапазоне обусловлено, главным образом, вращательными и колебательными переходами молекул. Основные атмосферные компоненты, ответственные за инфракрасное поглощение — молекулы водяного пара ( $H_2O$ ) и углекислого газа ( $CO_2$ ), имеющие полосы поглощения, сосредоточенные на длинах волн от 0,7 до 15 мкм.

В дальней инфракрасной области большая часть излучения поглощена атмосферой.

Приборы, используемые для измерения ТПО в инфракрасном и микроволновом диапазонах, называются радиометрами. Наиболее известны: 5-канальный радиометр AVHRR, устанавливаемый на американских метеорологических спутниках NOAA, VIIRS (NOAA-20), SLSTR (Sentinel-3A/B), а также многоканальное сканирующее устройство метеорологического назначения МСУ-МР, используемый на российских метеорологических спутниках серии «Метеор-М».

Начиная с 2001 г. на новых спутниках Aqua и Terra (США) ТПО восстанавливается по данным инфракрасных каналов EOS/MODIS (Earth Observing System) на длинах волн 3,7...4, 10...12 мкм, и возможно 8,6 мкм (каналы 20, 22, 23, 29, 31 и 32). Более коротковолновые каналы (видимый и ближний инфракрасный) будут использоваться для идентификации облачности и аэрозольного загрязнения в дневное время суток. Эквивалентная шуму разность температуры при этом не превышает 0,05 К.

Для просмотра значительных площадей в ИК-радиометрах, как правило, используется механическое сканирование. В радиометре AVHRR применяется линейное сканирование (рисунок 45, см. с. 107). Схема и геометрия измерения ТПО датчиком ATSR, установленным на спутниках ERS, приведена на рисунке 46 (см. с. 107).

Далее приведём основные технические характеристики датчика ATSR (Along-Track Scanning Radiometer), поскольку он обеспечивает наилучшие метрологические характеристики из всех упомянутых ИК-радиометров. Датчик состоит из двух приборов: инфракрасного радиометра (Infra-Red Radiometer — IRR) и микроволнового радиометра MWR.

Радиометр IRR разработан и создан консорциумом из нескольких лабораторий: Резерфордской лабораторией прикладной физики, Оксфордским университетом, Метеорологической службой Великобритании, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) из Австралии.

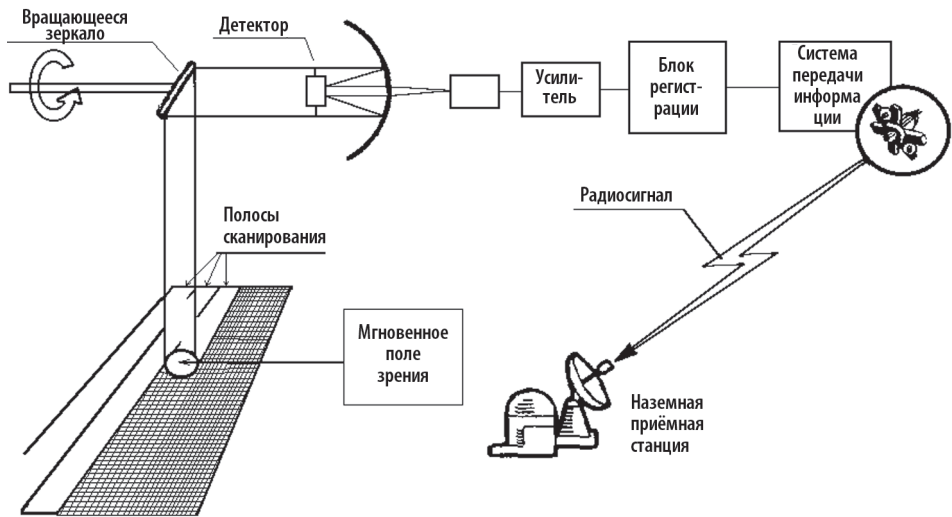


Рисунок 45. Сканирующий ИК-радиометр с линейной механической развёрткой

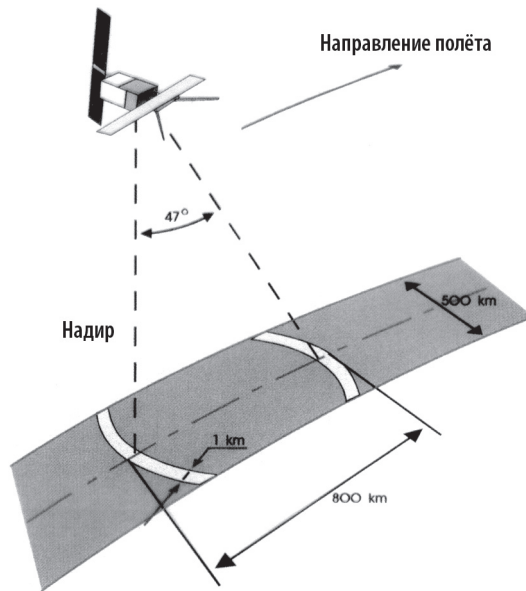


Рисунок 46. Схема сканирования ИК-радиометра ATSR

Главной целью создания IRR является прецизионное измерение глобальной температуры морской поверхности. Абсолютная точность измерения температуры составляет 0,5 К при усреднении по пространству в  $50 \times 50$  км и при условии, что хотя бы 20 % наблюдаемой территории свободны от облаков. Для свободных от облачности участков относительная точность составляет 0,1 К при элементе разрешения  $1 \times 1$  км.

Для достижения таких показателей IRR был сконструирован как радиометр получения изображений с четырьмя параллельными спектральными каналами, имеющими длины волн 1,6; 3,7; 10,8 и 12 мкм, и формируемыми раздельными лучами и многослойными интерференционными фильтрами.

Мгновенное поле зрения прибора при обзоре в надир имеет размеры  $1 \times 1$  км и формируется как изображение на детекторах после параболического зеркала с фокусом  $F/2.3$ . Для уменьшения собственных шумов детекторы, размещённые в фокальной плоскости, охлаждены до 80 К охладителем Стирлинга.

Область одновременного обзора перемещается по поверхности Земли через поворот плоскости зеркала таким образом, что это даёт два направления обзора: надирное с углом падения  $0^\circ$  и переднее с углом падения  $55^\circ$ . Такой угол выбран не случайно, поскольку при нём расстояние визирования в надир и вперёд по полёту отличается ровно в два раза.

Сканирующее зеркало отклоняется на максимальный угол  $23,45^\circ$  от вертикали. Номинальная ширина полосы обзора составляет 500 км, при этом передний и надирный сканы разнесены на 900 км вдоль трассы. Схематичное расположение сканов показано на рисунке 46. Подобная геометрия обеспечивает просмотр одного и того же элемента на подстилающей поверхности под двумя различными углами, что позволяет одновременно использовать и многоканальную и многоугловую методики восстановления ТПО. Период сканирования составляет 150 мс, а каждый скан состоит из 2000 пикселей. Для калибровки каналов в течение каждого периода сканирования в IRR формируются сигналы, соответствующие температурам двух бортовых чёрных тел (одного холодного и одного горячего). После сжатия данных на борту пакет из 960 пикселей (555 в надирном обзоре, 371 в переднем обзоре, 16 от горячего чёрного тела и 16 от холодного) передаётся на Землю вместе со служебными данными.

Только три канала из четырёх могут работать одновременно (каналы 12 и 10,8 мкм работают постоянно). Переключение между каналами 1,6 и 3,7 мкм происходит автоматически по уровню отражённого ИК-излучения.

Основной задачей микроволнового датчика MWR является измерение влажностного содержания в атмосфере для использования в расчётах наиболее неизученной части задержки сигналов спутникового альтиметра.

Прибор MWR имеет два канала, работающих на частотах 23,8 и 36,5 ГГц, каждый с шириной полосы 400 МГц.

Датчик смотрит в надир, имея внешнюю антенну, размещённую возле конструкции, отделяющий КА от носителя. Бортовая калибровка проводится направлением датчика на холодный участок космического пространства и с помощью внутренней горячей нагрузки. Цикл получения информации MWR синхронизирован с периодом сканирования ATSR, а данные включены в пакет IRR, описанный выше.

Размер пятна, покрываемого радиометром, составляет  $22,4 \times 17,6$  км ( $36,5$  ГГц) и  $21,2 \times 21,2$  км ( $23,8$  ГГц) с разделением на 60 км вдоль трассы.

Радиометр использует 60-сантиметровую параболическую антенну, реализующую схему Кассегрена.

Основные характеристики MWR

Частота, ГГц	23,8	36,5
Угол визирования, град	-1,93	2,50
Коэффициент усиления, дБ	40,62	42,0
Уровень боковых лепестков, дБ	-24	-35
Апертура по уровню 3 дБ, град:		
вдоль трассы	1,52	1,61
поперёк трассы	1,51	1,37

В ИК-радиометре датчика AATSR, который был установлен на борту спутника ERS-2 (European Remote Sensing Satellite), дополнительно были добавлены три канала видимого диапазона с длинами волн 0,555; 0,669 и 0,865 мкм. Эти каналы калибруются с использованием новой системы по рассеянному солнечному свету один раз за виток. Точность радиометрической калибровки видимых каналов составляет 2 % и отношение сигнал/шум равно 20 для 20%-го альbedo.

Прибор SLSTR, который построен как «наследник» технологических решений сенсора AATSR, функционирует по аналогичному принципу. Однако технические характеристики SLSTR были значительно улучшены: пространственное разрешение 0,5 км, относительная точность 0,1 К, абсолютная точность 0,3 К, полоса обзора 740 км [54].

Рассмотрим основные составляющие погрешностей, возникающих при дистанционном измерении ТПО и их источники. К ним относятся: частичное или полное перекрытие мгновенного поля зрения радиометра облачностью; искажающее влияние толщи атмосферы между радиометром и морской поверхностью; изменчивость излучательной способности морской поверхности и, наконец, инструментальная погрешность, обусловленная собственными шумами измерительного тракта аппаратуры. Естественно, что в связи с наличием перечисленных источников погрешности не существует единых универсальных методик и алгоритмов, обеспечивающих одинаковую точность восстановления ТПО во всех районах Мирового океана и всесезонно.

Приведём теперь основные источники возникновения перечисленных погрешностей, а затем рассмотрим способы уменьшения некоторых из них для повышения итоговой точности дистанционного измерения ТПО. В настоящее время наиболее массово для целей дистанционного восстановления ТПО используется информация от радиометра AVHRR или МСУ-МР, который абсолютно не уступает американскому аналогу по техническим характеристикам.

Рассмотрим инструментальную погрешность радиометра. Известно, что в приборе AVHRR имеется три ИК-канала: 3,55...3,93 мкм (канал 3); 10,3...11,3 мкм (канал 4) и 11,5...12,5 мкм (канал 5) [55]. Для типичных значений ТПО между 270 и 300 К, радиометрическое разрешение составляет 0,1...0,13 К для каналов 4 и 5 и 0,05...0,17 К для канала 3. Внутренние шумы радиометра зависят также от собственной температуры датчика и времени интегрирования одного измерения. Поскольку в радиометре AVHRR применён охлаждаемый детектор, его шумы за время сканирования для каналов 3–5 составляют около 0,05 К. Суммарный шум датчика и погрешность квантования выражаются величиной шумовой эквивалентной разности температур и составляют 0,12 К для каналов 4 и 5. Аналогичный шумовой уровень приписывают и каналу 3. При этом общая температурная неопределённость в оценках ТПО, обусловленная радиометром, возрастает за счёт погрешности полётной калибровки и достигает 0,31 К [56, 57].

Значимость в проявлении таких погрешностей обусловлена областью применения спутниковых данных. Так, при исследовании пространственной температурной структуры требуется достижение высокой относительной погрешности измерений, в то время как абсолютная калибровка менее важна. Следовательно, в этом случае главным лимитирующим параметром будет эквивалентная шумовая разность температур. С другой стороны, измерение ТПО, усреднённое по пространству, например, для климатических баз данных, усредняет, а следовательно, уменьшает и НЕДТ (Noise Equivalent Change in Temperature, минимальная температурная разница, которая может быть детектирована отдельно взятым сенсором), но в таком случае сравнение с данными, полученными на других орбитах, разными спутниками и разными методами измерения ТПО, требует максимально точной абсолютной калибровки радиометра.



Как уже было отмечено выше, наиболее сложную проблему при восстановлении ТПО, измеренной дистанционно, представляет корректный учёт влияния атмосферы. Так, в работах [58, 59] показано, что использование двухканальных спутниковых радиометров позволяет при благоприятных условиях уменьшить среднеквадратичную погрешность восстановления ТПО в пять раз, а при высоком инструментальном шуме — только в два раза.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТПО ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Микроволновый диапазон (участок спектра от 1 мм до 1 м) обладает весьма высокой информативностью при дистанционном зондировании океана из космоса. Пассивные методы микроволновой радиометрии основываются на регистрации интенсивности собственного теплового (радиотеплового) излучения системы «океан — атмосфера». Из всего СВЧ-диапазона к настоящему времени в ДЗ из космоса используется участок спектра с длиной волны от 0,8 до 8,5 см.

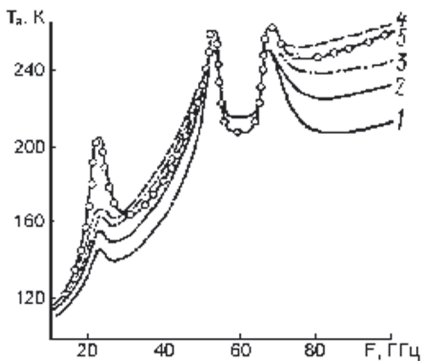
Основное достоинство СВЧ-диапазона при космическом ДЗ океана — сравнительно слабое влияние атмосферы на результаты измерений из космоса. Излучение в СВЧ-диапазоне принято характеризовать радиояркой температурой ( $T_{я}$ ), равной температуре чёрного тела, излучение которого имеет данную яркость. На рисунке 47 представлены примеры спектров радиояркой температуры системы «океан — атмосфера» при разных состояниях атмосферы. Спектры приведены для излучения с длиной волны ( $\lambda < 3$  см), т. е. при частоте ( $f > 10$  ГГц), по расчётным данным [60].

Принято считать, что при умеренной облачности и отсутствии осадков для  $\lambda > 5$  см атмосфера оказывает пренебрежимо малое влияние на радиотепловое излучение. В области вблизи  $\lambda = 1,35$  см ( $f = 22,2$  ГГц) расположена резонансная линия поглощения водяным паром. На длине волны вблизи  $\lambda = 0,5$  и  $\lambda = 0,25$  см расположены линии поглощения кислородом.

Для  $\lambda < 2$  см сильное влияние на радиояркую температуру оказывает облачность. Таким образом, основная информация об океане содержится в измерениях на длинах волн более 2 см. Измерения излучения более коротких волн могут привлекаться для внесения коррекции на влияние атмосферы в результате измерений в длинноволновой области.

На рисунке 48 приведены примеры зависимости радиояркой температуры от температуры поверхности океана, полученные расчётным путём. Из этих данных видно, что для определения температуры океана пригодны измерения излучения  $\lambda = 3...10$  см. Однако кроме температуры существенное влияние на излучение оказывают изменения скорости ветра.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в области  $\lambda > 3$  см влияние скорости ветра и температуры поверхности воды на радиояркую температуру примерно одинаково. При скорости ветра больше 7 м/с радиояркая температура примерно линейно увеличивается с ростом скорости ветра.



**Рисунок 47.** Спектры радиояркой температуры для разных состояний атмосферы: 1 — стандартная безоблачная атмосфера; 2 — облачность с  $W = 0,29$  кг·м<sup>-2</sup>,  $T_{обл} = 10$  °С; 3 — облачность с  $W = 0,64$  кг·м<sup>-2</sup>;  $T_{обл} = 10$  °С; 4 — облачность с  $W = 0,39$  кг·м<sup>-2</sup>,  $T_{обл} = -10$  °С; 5 — тропическая безоблачная атмосфера



**Рисунок 48.** Модельные расчёты ТПО для разных длин волн СВЧ-диапазона: 1 —  $\lambda = 8,5$  см; 2 —  $\lambda = 3,4$  см; 3 —  $\lambda = 1,35$  см; 4 —  $\lambda = 0,8$  см

Поэтому изменения состояния поверхности, вызываемые изменением скорости ветра, оказываются весьма существенной помехой при определении температуры, делая невозможным применение не только простых одноканальных способов измерений, но и внесение поправок по данным дополнительных измерений в области спектра, где не проявляется мешающее влияние атмосферы.

Таким образом, оказывается необходимым комплексное использование измерений излучения одновременно по нескольким каналам с тем, чтобы обеспечить учёт мешающего влияния изменчивости состояний океанской поверхности и атмосферы.

Данный подход, в первую очередь, необходим при определении температуры поверхности океана. Задача определения скорости ветра является более простой, так как относительная чувствительность излучения к изменениям скорости ветра более значительна, чем к изменениям температуры.

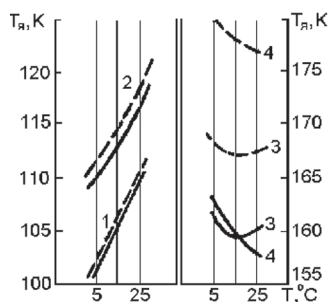
Точность расчёта скорости ветра по одноканальным измерениям зависит от того, насколько точно известна температура воды. При погрешности в определении температуры в  $1^\circ\text{C}$ , ошибка в определении скорости ветра будет около 1 м/с. Учитывая относительную стабильность температуры поверхности воды в открытом океане, можно заключить, что даже при использовании среднеклиматических данных о температуре воды скорость ветра может быть определена с приемлемой точностью.

К сильному увеличению радиояркостной температуры приводят дождевые осадки, поэтому зоны осадков легко выделяются по резким контрастам излучения. Точное модельное описание влияния осадков на радиояркостную температуру представляет определённые трудности, поэтому задача определения температуры поверхности океана в зонах осадков требует дополнительных исследований.

На участке  $\lambda > 10$  см в радиоизлучении водной поверхности начинает проявляться и зависимость от солёности воды. При значительных перепадах солёности (например, между пресными и океанскими водами) эта зависимость должна учитываться и на более коротких волнах. Однако в открытом океане вариации солёности слишком малы, чтобы оказывать заметное влияние на температуру в участке спектра с длиной волны от 0,8 до 8,5 см.

Загрязнения поверхности океана, в первую очередь нефтяные, могут проявляться косвенным образом (по влиянию на связь волнения и пены с ветром). Этот вопрос пока изучен слабо. Непосредственное влияние через изменение диэлектрических свойств поверхности загрязнения оказывают только при очень большой толщине слоя — порядка 1 мм.

Толщина слоя воды, в котором формируется микроволновое излучение океана, составляет около 1 мм и зависит от длины волны излучения, сокращаясь до десятых долей миллиметра при уменьшении длины волны до 1 см. Поскольку в таком слое может существовать перепад температуры воды, возникает дополнительный источник помех при определении температуры воды с необходимой точностью. На достигнутом уровне точности учёта других помех этот фактор может считаться слабым и его эффект рассматривается как систематический сдвиг.



Кроме вышеперечисленных особенностей микроволнового зондирования морской поверхности существует ряд технических трудностей и в СВЧ-зондировании из космоса.

При автоматическом длительном функционировании измерительной системы на ИСЗ серьёзную трудность представляет обеспечение стабильности режимов её работы, определяющих такие важные показатели, как чувствительность и калибровка.

При измерениях излучения с больших высот достижение высокой пространственной разрешающей способности ограничивается размерами приёмных антенн, используемых в микроволновом диапазоне.

Требование высокой чувствительности представляет определённые трудности при создании сканирующих СВЧ-радиометров, в которых время просмотра каждого элемента изображения является очень малым.

## 5.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ БИОПРОДУКТИВНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Дистанционные методы определения оптического состояния вод океана, а также концентрации хлорофилла и других примесей, содержащихся в морской воде, не обладают такой степенью проработанности, как методы восстановления ТПО.

Основными причинами являются: сильная изменчивость оптических свойств атмосферы; сложность описания переноса видимого излучения в системе «океан – атмосфера»; низкий уровень полезного сигнала, несущего информацию об оптических характеристиках водной толщи.

Напомним коротко основные соотношения оптического ДЗ. Получение изображений в видимом диапазоне, в первую очередь, зависит от излучения Солнца, как единственного источника освещения. Спектр солнечной освещённости на верхней границе атмосферы может быть смоделирован спектром радиации АЧТ, имеющего исходную температуру 5900 К, с пиком освещённости, расположенным приблизительно на длине волны 500 нм.

После прохождения через атмосферу, спектр солнечной освещённости на уровне земли (рисунок 49) модулируется атмосферными окнами прозрачности. Существенная энергия остаётся только в пределах диапазона длины волны приблизительно от 0,25 до 3 мкм.



Рисунок 49. Спектр солнечной освещённости

Цвет океана задаётся солнечным светом, рассеянным водной поверхностью и внутри водной толщи. При падении солнечной радиации на поверхность океана, она частично проникает в водную толщу, частично *поглощается* и *рассеивается* молекулами воды, а частично *отражается*. Дистанционные пассивные оптические измерительные приборы регистрируют, прежде всего, отражённое солнечное излучение.

## СПЕКТРАЛЬНАЯ ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Различные материалы по-разному отражают и поглощают на разной длине волны. Спектр отражения материала — это графическая зависимость от длины волны падающего излучения доли отражённой объектом радиации, которая является уникальной для каждого материала. В принципе, материал наблюдаемой цели может быть идентифицирован по спектральной отражающей способности, если система наблюдения имеет *спектральное разрешение*, достаточное для того, чтобы различить спектры и от других материалов. Именно эта предпосылка и создаёт основу для мультиспектрального оптического ДЗ.

Следующий график (рисунок 50) показывает типичные спектры отражения различных природных материалов: чистой воды, мутной воды, голой почвы и растительности.

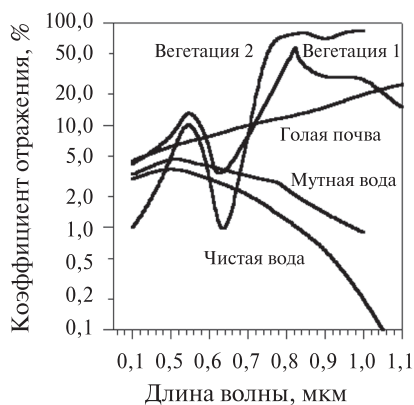


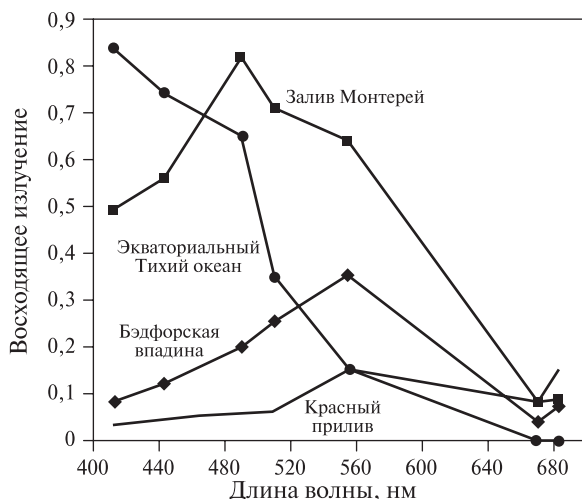
Рисунок 50. Спектральные характеристики разных типов подстилающей поверхности

Отражательная способность *чистой воды* очень низка. Однако она максимальна в синей части спектра и уменьшается по мере увеличения длины волны. Следовательно, чистая вода кажется тёмно-синей. Чистый насыщенный синий цвет характерен для открытых олиготрофных вод океана. На шельфе возрастает содержание питательных организмов в воде, а следовательно, и концентрация фитопланктона, что также изменяет цвет вод от синего к зелёному.

*Мутная вода* имеет некоторую растворённую взвесь, которая увеличивает отражательную способность в красной части спектра, приводящей к появлению коричневатого оттенка. По мере приближения к берегу оптические свойства воды становятся всё более подвержены влиянию не только концентрации хлорофилла, но и взвесей грунтовой природы. Цвет воды часто приближается к желтовато-красному, а в некоторых обстоятельствах просто становится красным.

Восприятие цвета океана человеческим глазом количественно может быть охарактеризовано измерением спектрального распределения яркости,

выходящей из толщи вод. На рисунке 51 представлены четыре типа спектрального распределения яркости, измеренной с дрейфующего буя для оптически очень различающихся вод. Хотя данные этого рисунка отображают измерения в верхнем слое водной толщи, их характер позволяет имитировать подобные измерения с помощью оптического спектрорадиометра, установленного на борту космического носителя.



**Рисунок 51.** Спектральное распределение восходящего излучения на уровне поверхности моря по данным оптических измерений с буя

В задачах оптического дистанционного зондирования водной поверхности отмечается, что в средних условиях освещённости полезный сигнал составляет 5...10 % от суммарной яркости [61]. Поскольку проведение оптических измерений с точностью в 1 % представляет собой определённую метрологическую проблему, для грамотной интерпретации спутниковых наблюдений цвета океана необходимо рассматривать не только океанографические, но и атмосферные процессы. Всё это делает задачу оценки концентрации хлорофилла по данным косвенных измерений достаточно сложной.

Одним из путей решения данной проблемы является использование малопараметрических моделей, с приемлемой для практики точностью описывающих перенос излучения в системе «океан – атмосфера» и допускающих обращение. Другой путь — установка спектрометрической аппаратуры на борту низколетящих носителей (самолётов и вертолётов), а также использование погружных спектрометрических приборов непосредственно на борту судна.

Содержание и пространственное распределение в океанской воде хлорофилла, как показателя биомассы фитопланктона, представляет



**Рисунок 52.** Спектры поглощения различных компонент морской воды

одну из важнейших промыслово-океанографических характеристик, так как отражает первичную продуктивность районов Мирового океана и, одновременно, характеризует непосредственную кормовую базу значительной части промысловых рыб. На рисунке 52 (см. с. 114) показаны относительные спектральные зависимости коэффициентов поглощения хлорофилла (кривая 1), жёлтого вещества (кривая 2) и чистой морской воды (кривая 3) [61].

Связь между концентрацией хлорофилла, содержанием фитопланктона и уровнем продуктивности приведена в таблице 11. Известны различные методы оценки оптико-физических параметров вод по данным дистанционного аэрокосмического зондирования [62–66].

Один из подходов основывается на использовании экспериментально найденных регрессионных соотношений между концентрацией хлорофилла и спектральными яркостными характеристиками водной толщи. Наличие устойчивых регрессионных зависимостей в открытом океане обусловлено преимущественно биологическим происхождением всех растворённых и взвешенных веществ, являющихся продуктами жизнедеятельности фитопланктона.

**Таблица 11.** Эмпирическая зависимость между концентрацией хлорофилла и уровнем продуктивности

Концентрация хлорофилла, мг·м <sup>-3</sup>	Уровень продуктивности
0,2	Низкий
0,2...0,5	Средний
0,5...1,0	Повышенный
1,0 и более	Высокий

Для определения концентрации хлорофилла в морской воде пассивными методами широкое распространение получили процедуры, базирующиеся на регрессионном соотношении между концентрацией хлорофилла и так называемым *индексом цвета*  $I_{ц}$  [67]. Под индексом цвета понимают отношение яркостей толщи моря, измеренных на двух различных длинах волн. Уравнение такой связи имеет вид:

$$\log C_{хл} = a + b \log I_{ц}, \quad (25)$$

где  $C_{хл}$  — поверхностная концентрация хлорофилла. Параметры  $a$ ,  $b$  регрессионного соотношения определяются по данным натурных измерений и зависят от видового состава фитопланктона, близости акватории к шельфовым зонам и местам выноса рек, а также от ряда других океанографических условий.

Начиная ещё с пионерской работы [68] известно, что вариации содержания в морской воде пигментов фитопланктона приводят к изменениям в её цвете, т. е. в спектральном составе диффузно рассеянного солнечного излучения. Следовательно, по спектрорадиометрическим измерениям яркости излучения, выходящего из толщи моря  $B_W(\lambda)$ , потенциально возможно определение концентрации пигментов фитопланктона  $C_{хл}$  и его первичной продукции  $P_B$ . Однако задача определения  $C_{хл}$  и  $P_B$  по дистанционным измерениям восходящего излучения, как и всякая обратная задача, имеет ряд трудностей в её решении.

Первая трудность связана с тем, что цвет морской воды определяется не только содержанием в ней фитопланктона  $C_{хл}$ , но и содержанием растворённого органического вещества (РОВ), количественно измеряемого обычно его поглощением на фиксированной длине волны  $\lambda_0$ , и содержанием взвешенного

вещества  $C_p$  иного, чем фитопланктон (детрит, минеральная взвесь терригенного происхождения). Помимо концентрации взвеси  $C_p$  определённую роль в формировании цвета воды, т. е. спектра  $B_w(\lambda)$ , играет и качественный состав взвеси, определяющий индикатрису рассеяния морской воды  $\chi(\gamma)$ , ( $\gamma$  — угол рассеяния). В реальной ситуации три основных параметра  $C_{\text{хл}}$ ,  $C_p$ ,  $\lambda_0$  в той или иной степени коррелированы между собой. По признаку коррелированности этих параметров океанские воды можно разделить на два типа [69]. К водам первого типа (Case 1) относятся те воды, в которых оптические свойства определяются фитопланктоном и его производными: детритом и РОВ. К водам второго типа (Case 2) относятся воды, в которых РОВ и взвешенное вещество в основном террического происхождения и их содержание не связано с содержанием пигментов фитопланктона.

Если идеализировать ситуацию, то можно сказать, что воды первого типа характеризуются полной коррелированностью между основными параметрами, а воды второго типа — отсутствием коррелированности. Иными словами, воды первого типа являются однопараметрическими в том смысле, что их оптические свойства, а значит и цвет, определяются лишь заданием  $C_{\text{хл}}$ , а воды второго типа — многопараметрические.

Разумеется, в реальности имеют место ситуации, промежуточные между этими предельными случаями. Уже из этих соображений ясна трудность восстановления концентрации пигментов (и первичной продукции) фитопланктона по цвету воды — отсутствие однозначной, детерминированной связи между  $C_{\text{хл}}$  и спектром  $B_w(\lambda)$ .

Отсюда же следует важный вывод, что в силу разнообразия вод океана трудно ожидать, что некоторый универсальный алгоритм обращения  $B_w(\lambda)$  с целью определения  $C_{\text{хл}}$  будет давать приемлемую точность для всех вод океана.

Вторая трудность решения рассматриваемой обратной задачи при проведении измерений с космического носителя заключается в том, что регистрируемое на спутнике излучение в значительной степени формируется атмосферой и в меньшей степени излучением, вышедшим из толщи воды, т. е. для определения  $B_w(\lambda)$  из полного излучения  $B_1(\lambda)$ , регистрируемого прибором, нужно вычесть излучение атмосферной дымки и излучение, отражённое поверхностью воды, составляющие, как правило, 90 % суммарного излучения  $B_1(\lambda)$ . Поскольку вклад  $B_w(\lambda)$  в суммарное излучение мал, требуется высокая точность знания атмосферного вклада, что представляет собой определённую трудность в силу значительной пространственно-временной изменчивости аэрозоля. Следовательно, атмосферная коррекция данных спектрорадиометрических измерений должна включать в себя и определение характеристик аэрозоля. Кроме этого, при вычитании из  $B_1(\lambda)$  расчётных величин атмосферного вклада необходимо знание  $B_1(\lambda)$  в абсолютных величинах с достаточно высокой точностью. Иными словами, с высокой точностью на орбите должна поддерживаться абсолютная калибровка данных измерений, что представляет собой непростую техническую задачу.

Рассмотрим теперь существующие подходы к решению проблемы дистанционного определения биопродуктивности океанских вод, как использовавшиеся для прибора CZCS (Coastal Zone Color Scanner), работавшего на спутнике Nimbus-7 с 1978 по 1983 г., так и применяемые сегодня для прибора SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) спутника SeaStar.

## БИООПТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ

Существующие методы определения содержания в воде оптически активных компонент по спектру восходящего излучения можно разделить на две



группы: эмпирические и аналитические [70]. В эмпирических методах отношение или разность коэффициента яркости  $\rho = \pi B_W / E$ , где  $E$  — освещённость поверхности моря, на двух длинах волн статистически связывается с концентрацией той или иной компонентой с помощью регрессионного соотношения. Аналитические методы используют для связи между всем спектром  $r(\lambda)$  и концентрациями компонент  $C_{\text{хл}}$ ,  $C_p$ ,  $\lambda_0$  соотношения теории переноса излучения и модели оптических свойств морской воды. В настоящее время предложено значительное количество биооптических алгоритмов. Их обзор на конец 1980-х гг. дан в работах [66, 67]. Здесь мы рассмотрим эмпирический алгоритм, использовавшийся при обработке данных CZCS для получения конечного продукта — среднемесячных карт концентрации хлорофилла и показателя вертикального ослабления  $K_d(490)$ , ныне доступных для научного сообщества. Концентрация хлорофилла определялась по регрессионным соотношениям [71].

$$\log C_{\text{хл}} = \begin{cases} 0,053 - 1,71 \log B_W(443) / B_W(550), & \text{если } C_{\text{хл}} \leq 1,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}, \\ 0,522 - 2,44 \log B_W(520) / B_W(550), & \text{если } C_{\text{хл}} \geq 1,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}. \end{cases} \quad (26)$$

Стандартная ошибка оценки  $\log C_{\text{хл}}$  составляет 0,130, если  $C_{\text{хл}} < 1,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  и 0,098, если  $C_{\text{хл}} > 1,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Сопоставление значений концентрации фитопланктона, восстановленных по спутниковым измерениям, с данными подспутниковых измерений показало, что алгоритм обеспечивает относительную точность примерно 40 % в диапазоне  $0,08 < C_{\text{хл}} < 1,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  [68]. Причём указанная точность включает в себя и ошибки атмосферной коррекции.

Анализ данных CZCS, сопоставление их с независимыми измерениями  $C_{\text{хл}}$ , показал, что алгоритм (26) даёт недостаточную точность определения  $C_{\text{хл}}$  в случае вод второго типа, характерных для наиболее интересных прибрежных зон океана. Физическая причина этого заключается в том, что относительные спектральные зависимости поглощения РОВ и пигментов фитопланктона в области  $\lambda > 440 \text{ нм}$  близки, поэтому, проводя измерения в этой области, невозможно разделить РОВ и пигменты. В связи с этим в приборе SeaWiFS введён спектральный канал 412 нм, чтобы повысить точность определения  $C_{\text{хл}}$  для вод второго типа.

Кроме того, в настоящее время стало ясно, что повысить принципиально точность биооптических алгоритмов можно за счёт разработки региональных алгоритмов, учитывая особенности биооптического состояния вод данной акватории. Этот подход требует проведения обоснованного районирования Мирового океана по параметрам биооптического состояния вод, определяющим решение проблемы дистанционного определения биопродуктивности.

Для прибора SeaWiFS первоначально планируется использование алгоритма типа (1) с модификацией, учитывающей спектральные каналы SeaWiFS. Этот алгоритм будет использоваться до тех пор, пока не будет сертифицирован основной продукт прибора. Эта сертификация должна проводиться после запуска спутника в подспутниковом эксперименте. Основным продуктом SeaWiFS включает данные по концентрации хлорофилла  $a$  (с коррекцией на поглощение нехлорофильными субстанциями и на избыточное рассеяние в водах второго типа) и по значениям показателя вертикального ослабления на длине волны 490 нм —  $K_d(490)$ . Кроме этого предусматривается создание исследовательского продукта прибора, в котором будут содержаться дополнительные данные:

- первичная продуктивность;
- концентрация детрита;
- концентрация вспомогательных пигментов;
- концентрация взвеси;
- концентрация аэрозоля и его тип.

## АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ

Впервые практический алгоритм атмосферной коррекции для ДЗ океана предложен в работе [72]. Впоследствии, когда была исправлена ошибка, алгоритм совершенствовался [66, 67], но основа его осталась прежней и поныне. Главное его достоинство заключается в простоте вычислений при приемлемой точности. Отметим, что простота вычислений является одним из важнейших факторов, поскольку они проводятся для каждого пикселя океана. Алгоритм атмосферной коррекции для SeaWiFS используется тот же самый, что и для CZCS. Рассмотрим далее основные его положения.

Коэффициент яркости системы «атмосфера—океан» можно записать в виде:

$$\rho_T(\lambda) = \rho_R(\lambda) + \rho_A(\lambda) + \rho_{AR}(\lambda) + \rho_G(\lambda) + t\rho_W(\lambda), \quad (27)$$

где  $\rho(\lambda)$  — коэффициент рэлеевской атмосферы;  $\rho_A(\lambda)$  — коэффициент аэрозольной атмосферы,  $\rho_{AR}(\lambda)$  — вклад, возникающий в результате взаимодействия между молекулярным и аэрозольным рассеянием;  $\rho_G(\lambda)$  — отражение прямого солнечного излучения от взволнованной морской поверхности;  $\rho_W(\lambda)$  — коэффициент яркости толщи воды;  $t$  — пропускание атмосферы. Обычно членом  $\rho_W(\lambda)$  пренебрегают, поскольку специальное устройство в приборе позволяет устанавливать плоскость сканирования поверхности океана вне зоны солнечной дорожки. В алгоритм атмосферной коррекции для CZCS членом  $\rho_{AR}(\lambda)$  также пренебрегалось, а аэрозольное рассеяние принималось в приближении однократного рассеяния (точнее, в виде первого члена его разложения по аэрозольной оптической толщине  $\tau_A$ .

$$\rho_A(\lambda) = \frac{\Lambda_A(\lambda)\tau_A(\lambda)P_A(\theta, \theta_0, \lambda)}{4\cos\theta \cdot \cos\theta_0}, \quad (28)$$

где  $\Lambda_A$  — вероятность выживания фотона;  $\theta$  — зенитный угол визирования;  $\theta_0$  — зенитный угол Солнца;

$$P_A(\theta, \theta_0, \lambda) = \chi_A(\theta_-, \lambda) + [r(\theta) + r(\theta_0)]\chi_A(\theta_+, \lambda), \quad (29)$$

где  $\chi_A$  — аэрозольная индикатриса рассеяния;  $r$  — френелевский коэффициент отражения;  $\theta_-$ ,  $\theta_+$  — углы рассеяния.

Идея атмосферной коррекции состоит в определении величины вклада аэрозоля по спектральному каналу 670 нм, для которого предполагается, что вклад излучения, выходящего из толщи воды, пренебрежимо мал.

Определяя отношение:

$$\varepsilon(\lambda, \lambda_0) = \frac{\rho_A(\lambda)}{\rho_A(\lambda_0)} = \frac{\Lambda_A(\lambda)\tau_A P_A(\lambda)}{\Lambda_A(\lambda_0)\tau_A P_A(\lambda_0)}, \quad (30)$$

где  $\rho_A(\lambda_0)$  — измеренный коэффициент яркости при  $\lambda_0 = 670$  нм, задача атмосферной коррекции сводится к экстраполяции  $\varepsilon(\lambda, \lambda_0)$  в синие-зелёную область спектра.

Предложен ряд подходов к экстраполяции  $\varepsilon(\lambda, \lambda_0)$ : аппроксимация  $\tau_A(\lambda)$  в виде закона Ангстрема [69]; использование метода «чистой воды» [68], в котором для пикселей, соответствующих чистой океанской воде, считается известным коэффициент яркости  $\rho_W(\lambda)$ , рассчитывается  $\rho_A(\lambda)$  и эти значения распространяются на всё изображение, содержащее этот пиксель; экстраполяция  $\tau_A(\lambda)$  с использованием разложения по первому собственному вектору ковариационной матрицы, описывающей статистику измеренных  $\tau_A(\lambda)$  [73]. Дополнительно во всех этих подходах использовалось предположение неселективности произведения  $\Lambda_A(\lambda)P_A(\lambda)$ .

В практической реализации атмосферной коррекции для обработки данных CZCS был использован простейший подход, а именно, использовалось предположение о неселективности  $\varepsilon(\lambda, \lambda_0) \approx 1$ . Такой подход заведомо гарантирует от получения физически бессмысленных значений восстанавливаемых величин. Кроме этого, согласно экспериментальным данным [74] в открытом океане спектральная зависимость  $\tau_A(\lambda)$  действительно близка к неселективной. Однако для наиболее интересных, с практической точки зрения, прибрежных вод наблюдается довольно сильная неселективность  $\tau_A(\lambda) \approx \lambda^{-N}$ , где  $N$  близко к единице.

Основные положения атмосферной коррекции, использовавшейся для CZCS, сохранены и в атмосферной коррекции SeaWiFS, однако возможности прибора SeaWiFS позволили отказаться от некоторых ограничивающих предположений атмосферной коррекции. Во-первых, опорный канал атмосферной коррекции  $\lambda_0 = 865$  нм более соответствует предположению об отсутствии на этой длине волны излучения, выходящего из толщи воды, чем опорный канал CZCS  $\lambda_0 = 670$  нм. Во-вторых, наличие дополнительного канала в ближней ИК-области  $\lambda = 765$  нм, предназначенного для атмосферной коррекции, позволяет определить отношение  $\varepsilon(765, 865)$  и экстраполировать его в синие-зелёную область [75], не используя предположения о неселективности  $\tau_A(\lambda)$ . Такая экстраполяция предложена в виде:

$$\varepsilon(\lambda_i, \lambda_j) = \exp[c(\lambda_i, \lambda_j)], \quad (31)$$

где параметр  $c$  зависит от геометрии наблюдения.

Кроме того, в алгоритме атмосферной коррекции SeaWiFS предложен также простой подход для учёта вклада многократного рассеяния [72]. Достоинство подхода в том, что он сохраняет вид формул для атмосферной коррекции, выражая  $\rho_A + \rho_{AR}$  в уравнении (27) линейно через выражение  $\rho_A$  в однократном приближении (28). Необходимость учёта поправки на многократное рассеяние вызвана появлением в SeaWiFS фиолетового канала 412 нм, для которого оптическая толщина атмосферы из-за релеевского рассеяния уже недостаточно мала для использования однократного приближения.

Для измерения спектральных характеристик излучения, вышедшего из водной толщи и прошедшего слой атмосферы, используются сканеры видимого диапазона или *видеоспектрометры*.

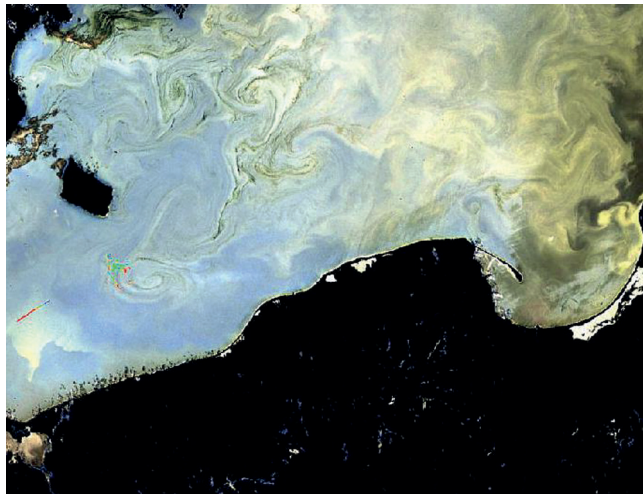


Рисунок 53. Цветение водорослей в балтийском море. OLCI KA Sentinel-3 [76]

На рисунке 53 (см. с. 119) приведён пример изображения видеоспектрометра OLCI, демонстрирующий вихревые образования в Балтийском море, различимые за счёт процесса цветения водорослей.

Сравнительные характеристики видеоспектрометров SeaWiFS спутника SeaStar и MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) спутника Envisat, а также OLCI KA Sentinel-3A/B приведены в таблице 12. Из таблицы видно, что по сравнению с использовавшимися ранее цветовыми сканерами современные приборы претерпели значительные усовершенствования. Во-первых, количество спектральных каналов увеличено до 21 с 8 у SeaWiFS и 15 у видеоспектрометра MERIS. Повышение чувствительности измерительных детекторов позволило сузить ширину отдельного спектрального канала, а также улучшить пространственное разрешение видеоспектрометров. Оптимизированный подбор спектральных каналов позволяет реализовать усовершенствованные алгоритмы восстановления параметров первичной биопродуктивности и атмосферной коррекции.

## 5.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРОВ

### ОСНОВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ И СИЛЫ В ОКЕАНЕ

Многие явления в динамике океана, как например, внутренние волны, мёртвая вода, жидкий грунт и т. п., связаны с неравномерным распределением плотности морской воды в вертикальном и горизонтальном направлениях. Наконек, и это самое главное, неравномерное распределение плотности создаёт медленные, но очень устойчивые течения, стремящиеся выровнять эту неравномерность. Плотность морской воды определяется её солёностью, температурой и сжатием под давлением вышележащих слоёв воды.

Зависимость плотности от температуры и солёности определяется весьма сложными эмпирическими формулами Кнудсена. Поэтому на практике плотность или удельные объёмы вычисляются по специальным таблицам или же снимаются со специальных графиков — TS-диаграмм. Слои воды испытывают также давление вышележащих слоёв, в соответствии с этим несколько сжимаются и их плотность повышается. Так как сжимаемость морской воды в зависимости от давления, температуры и солёности определяется по весьма сложной эмпирической формуле Экмана, то обычно сжатие также вычисляется по специальным таблицам.

Отметим, что коэффициент сжимаемости морской воды весьма невелик и не превышает  $5,107 \cdot 10^{-10}$  единиц в системе «метр — тонна — секунда», так что во многих вопросах динамики океана воду можно считать абсолютно несжимаемой жидкостью. Всё же надо помнить, что у морской воды, солёность которой равна 35 ‰ и температура 0 °С, плотность, равная на поверхности моря 1,02813, на глубине 10 км вследствие сжатия становится равной 1,07104. Если бы вода действительно была несжимаемой жидкостью, уровень океана был бы на 30 м выше настоящего.

Приступая к изучению всякого рода движения в Мировом океане, прежде всего условимся об основных поверхностях, относительное положение которых характеризует динамическое состояние водных масс, и о единицах измерения расстояния между этими поверхностями. К таким поверхностям относятся: изопотенциальные — поверхности равного потенциала силы тяжести, изобарические — поверхности равного давления, изостерические — поверхности равного удельного объёма и изопикнические — поверхности равной плотности.

Таблица 12. Основные характеристики видеоспектрометров [45, 76]

	SeaWiFS	MERIS	OLCI
Положение спектральных каналов, нм	412, 443, 490, 510, 555, 670, 765, 865	412,5; 442,5; 490; 510; 560; 620; 665; 681,25; 705, 753, 75; 760; 775; 865; 890; 900	400, 412,5, 442,5, 490, 510, 560, 620, 665, 673,75, 681,25, 708,25, 753,75, 865,885, 900, 940, 1020
Ширина спектральных каналов, нм	20 в каналах 1–6; 40 для остальных	10 в каналах 1–7, 9, 14, 15; 7,5 в каналах 8, 9; 8,5 в канале 11; 15 в канале 12; 20 в канале 13	10 в каналах 1–8, 11, 18, 19; 7,5 в каналах 9, 10, 12; 2,5 в каналах 13, 15; 3,75 в каналах 14; 15 в канале 16; 20, в каналах 17, 20; 40 в канале 21
Яркость насыщения, $\text{мВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$	13,6; 13,3; 10,5; 9,1; 7,4; 4,2; 3,0; 2,1		
Отношение сигнал/шум	500; 610; 670; 640; 600; 440; 455; 410		2188, 2061, 1811, 1541, 1488, 1280, 997, 883, 707, 745, 785, 605, 232, 305, 330, 812, 666, 395, 308, 203, 151
Радиометрическая точность	<5 %	<3 %	<2 %
Число радиометрических уровней квантования	1024	4096	4096
Калибровка на орбите	по Солнцу, ежемесячно по Луне	по Солнцу	по Солнцу
Пространственное разрешение, км	1,1	0,3 и 1,2	0,3
Ширина полосы сканирования, км	2800	1150	1270

Поскольку удельный объём и плотность — это обратные величины, то изостерические и изопикнические поверхности совпадают друг с другом и использование тех или иных поверхностей является лишь вопросом удобства.

Положение изобарических и изостерических поверхностей изменяется в связи с изменениями в тепловом, солевом и динамическом состоянии водных масс. Положение же изопотенциальных поверхностей в каждой данной точке моря остаётся неизменным, и поэтому в динамической океанологии положение остальных поверхностей определяется именно по отношению к этой поверхности. Для нас важно постоянно помнить, что положение изопотенциальной поверхности, направление линии отвеса и направление силы тяжести в любой точке моря можно считать постоянными.

Наконец, надо помнить, что поверхность воды, как и всякой жидкости, при равновесии располагается перпендикулярно равнодействующей всех сил, действующих на её частицы.

Понятно, что можно провести сколько угодно изопотенциальных поверхностей на каком угодно расстоянии одна от другой.

Работа, затрачиваемая на передвижение единицы массы на расстояние  $h$  вдоль линии отвеса, равна  $gh$ . Таким образом, поверхности геопотенциала характеризуются различными значениями  $gh$  и очевидно, что не только  $h$ , но и  $g$  входит в значение гравитационного потенциала. Геометрическое расстояние между двумя эквипотенциальными поверхностями не может быть постоянным по всей поверхности земного шара. На полюсах расстояние  $h$  меньше, нежели на экваторе, поскольку на экваторе ускорение свободного падения меньше, чем на полюсах. Значение геопотенциала определяет динамическую глубину как  $gh = 10D$ . Единицей геопотенциала или динамической глубины является 1 динамический метр, который соответствует глубине около 1,02 м при  $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ .

Если давление воды  $p$  измеряется в децибарах, а динамическая глубина в динамических метрах, то

$$P \text{ (дбар)} = \bar{\rho} \cdot D, \quad (32)$$

где  $\bar{\rho}$  — средняя плотность столба воды. Следовательно, 1 дбар приблизительно соответствует давлению столба воды высотой 1 м.

Понятие динамической глубины тесно связано с основным уравнением гидростатики, поскольку если океан находится в покое, единственными силами, которые должны быть приняты во внимание, являются сила тяжести и сила внутреннего давления. Рассмотрим действие указанных сил на объём  $dx \, dy \, dz$  единичной массы. Вес такого объёма есть  $G = vg = \rho \, dz \, dy \, dx$ . Сумма веса и силы давления на верхнюю грань объёма должна уравновешиваться силой давления на нижнюю грань объёма. Переписав уравнение равновесия, получим:

$$\rho g \, dx \, dy \, dz + p \, dx \, dy - \left( p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) dx \, dy = 0 \quad (33)$$

и, следовательно,

$$\partial p = \rho g \, dz \quad (34)$$

или, в пределе,  $dp = \rho g \, dz$ . Но по определению динамической глубины уравнение гидростатики можно переписать в виде:

$$dD = \frac{1}{\rho} dp = \alpha dp. \quad (35)$$

Данное выражение показывает, что при статическом равновесии изобарические поверхности и поверхности равного удельного объёма должны совпадать с поверхностью уровня. Поле массы, в котором изостерические и изо-



барические поверхности совпадают, называют баротропным. Поле, в котором эти поверхности пересекаются, называют бароклинным полем. Бароклинное поле, в отличие от баротропного, не может оставаться неподвижным.

Отметим, что гидростатическое равновесие выполняется с достаточной точностью для любого вертикального столба воды в океане, однако от столба к столбу оно изменяется скачкообразно. Следует помнить, что океан на самом деле бароклинный, и его водные массы находятся в квазистатическом равновесии.

Поле давления в океанах может быть представлено либо изобарическими картами, либо картами, изображающими топографию изобарических поверхностей. Изобарические карты показывают распределение давления на фиксированных уровнях поверхностей ниже поверхности моря. Топографические карты изображают линии равной динамической глубины — динамические изобаты изобарических поверхностей. Их называют картами относительной динамической топографии, если динамические глубины отсчитываются от поверхности моря, которая совпадает с поверхностью уровня. Карта динамической топографии для различных поверхностей давления даёт довольно полную картину квазистатического относительного распределения давления.

Динамическая глубина между двумя изобарическими поверхностями с давлениями соответственно  $p_0$  и  $p$  определяется формулой

$$D = \int_{p_0}^p \alpha dp. \quad (36)$$

Если  $p_0$  отнести к поверхности моря, то  $p_0 = 0$  и  $D$  представляет динамическую глубину изобарической поверхности с давлением  $p$ . Конечно,  $D$  может измеряться только относительно поверхности, на которой  $p_0 = 0$ . Если поверхность моря наклонена относительно поверхности уровня, динамическая глубина, вычисляемая из уравнения, может представлять лишь относительную динамическую глубину. Известно, что уровень моря благодаря течениям и сгонно-нагонным явлениям, имеющим место как вблизи берега, так и в открытом море, всегда, так или иначе, искривлён. Известно также, что течения обычно уменьшаются с глубиной. Так как наклон изобарической поверхности определяется скоростью течения, естественно, что с глубиной искривление изобар уменьшается и изобарическая поверхность, на которой течения практически отсутствуют, является практически горизонтальной. Такую изобарическую поверхность принято называть нулевой.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ

Предположим, что некоторая глубинная изобарическая поверхность по тем или иным соображениям считается горизонтальной.

Вычислим для конкретного полигона по температуре и солёности на отдельных станциях, равномерно покрывающих выбранный полигон, динамическую глубину этой нулевой изобарической поверхности от поверхности моря.

Пусть эти динамические глубины будут:  $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$  и предположим, что из всех вычисленных значений глубина  $D_1$  является наименьшей. Вычислим далее разность динамических глубин (обычно эти разности вычисляются в динамических миллиметрах)  $D_2 - D_1, D_3 - D_1, \dots, D_n - D_1$ .

Очевидно, что разности динамических глубин нулевой изобарической поверхности, исчисленные от поверхности моря, будут в то же время разностями динамических высот, считая от нулевой поверхности.

Нанесём теперь на карте в координатах океанологических станций эти разности. Проведём на той же карте плавные кривые, соединяющие точки с равными разностями динамических высот, совершенно так же, как на обычной топографической карте проводятся горизонтали для обозначения рельефа местности. Эти кривые называются динамическими горизонталями, а сама карта, построенная таким образом, динамической картой течений. Понятно, что динамические горизонталы, так же как топографические горизонталы, удобно проводить через равные интервалы, величина которых определяется наблюдаемыми разностями динамических высот. Понятно также, что в отдельных случаях динамические горизонталы могут не только замыкаться сами на себя, но и упираться в берег.

Динамическая карта, построенная для поверхности моря, является прежде всего картой рельефа этой поверхности. Действительно, от разности высот, выраженной в динамических метрах, нетрудно перейти к разности высот, выраженной в обычных метрах по формуле:

$$\Delta h = \frac{10}{g} \Delta d, \quad (37)$$

где  $\Delta h$  — разность высот в линейных мерах;  $\Delta d$  — разность высот в динамических мерах, равная разности динамических глубин;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Их этой формулы следует, что разность динамических высот, выраженная в динамических миллиметрах, является приблизительно разностью высот уровня, выраженная в обыкновенных миллиметрах.

Интересно выяснить, насколько динамическая карта действительно представляет рельеф поверхности моря. Если наблюдения проведены достаточно тщательно, подробно и более-менее одновременно, а также если выбранная за нулевую глубинная изобарическая поверхность действительно горизонтальна, то динамическая карта отражает рельеф поверхности моря. Если же нулевая поверхность не горизонтальна, то, как следствие, динамическая карта будет искажена.

Известно также, что при установившемся движении трение поперёк течения невелико, и поэтому в первом приближении, особенно для поверхностных течений, мы можем считать, что динамические горизонталы являются приблизительно линиями токов, а сама динамическая карта — картой течений на данной изобарической поверхности. Из этого следует, что чем ближе на такой карте в какой-нибудь точке сходятся горизонталы, тем больше скорость поверхностного течения, пропорциональная наклону уровня.

В этом заключается значение карт динамической топографии. Действительно, по разности динамических высот двух станций вычисляются лишь проекции скорости течения на направление, перпендикулярное линии станций. По наклону изобар и изостер можно судить только об общем направлении движения: движутся ли воды в ту или другую сторону относительно линии разреза. Течения, направленные вдоль разреза, естественно ускользают из внимания. Динамические горизонталы дают направление течений, а их густота характеризует их скорость.

Форма поверхности океана определяется суммарным эффектом сил земного притяжения, вращения Земли, воздействия ветра (сгонно-нагонные эффекты), атмосферного давления и приливно-отливных сил. Характерные уклоны морской поверхности, обусловленные совокупностью указанных причин, имеют порядок  $10^{-5}$  ...  $10^{-7}$ .

Ниже будут даны оценки амплитуд основных особенностей топографии поверхности океана, определяющие наши требования к разрешающей способности орбитального спутникового альтиметра [77], используемого для измерения высоты спутника над морем.

## ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРОВ

Радарный альтиметр (РА) — это, как правило, смотрящий в надир активный микроволновый сенсор, излучающий в диапазоне 13...14 ГГц. Излучаемый вертикально вниз импульсный сигнал взаимодействует с земной или морской поверхностью и отражается назад к антенне альтиметра. Время полного цикла прохождения импульса от РА до поверхности и назад измеряется с высокой точностью, а затем умножением его на скорость распространения электромагнитного излучения рассчитывается высота приёмной антенны спутника над отражающей поверхностью.

Если из орбитальных расчётов известно точное положение РА по отношению к опорной поверхности, например, опорному эллипсоиду, то вычитанием из этого значения высоты спутника над поверхностью может быть легко рассчитана мгновенная высота морской поверхности над опорным эллипсоидом. Повторные альтиметрические наблюдения над одним и тем же районом в океане дают возможность получить как стационарную, так и переменную компоненту океанской топографии. Чтобы разрешить типичные масштабы существующих океанографических явлений (таблица 13) для многих геофизических компонент, составляющих сигнал высоты морской поверхности, например, океанических циркуляций, требуется субдециметровая точность.

**Таблица 13.** Масштабы океанографических явлений

Составляющие высоты	Вертикальный диапазон	Пространственный масштаб
Океаническая динамическая топография. Мезомасштабные вихри	Десятки сантиметров	От десятков до сотен километров
Континентальные границы	Восточные: ~20 см	~500 км
Течения	Западные: ~100 см	~100 км
Океанские круговороты	~100 см	>1000 км
Экваториальные течения	~20 см	>500 км
Эффект состояния моря	~10 см	>20 км
Океанские приливы	До нескольких метров	Десятки километров
Инверсный барометрический эффект	До 50 см	Десятки километров
Геоид	От –100 до +80 м	Пространственная изменчивость всех масштабов

Это требование определяет исходные данные к свойствам РА и точности дополнительных внешних данных, используемых для коррекции альтиметрических измерений.

Чтобы измерить возвышение уровня моря над геоидом со спутника ERS, имевшего высоту орбиты примерно 780 км, с точностью в 10 см, время и скорость импульсного сигнала должны быть определены с точностью в  $10^{-7}$ . Это, в свою очередь, определяет точность спутникового таймера лучше, чем 0,5 нс. Такая высокая временная точность требует использования широкой полосы частот (из радиотехники известно, что чем короче импульс, тем шире полоса частот, которой он может быть передан). Альтернативой является использование относительно узкополосного импульса, а затем его аппроксимация кривой, по форме которой может быть определено время прихода импульса.

Современная техника требует, чтобы принятый на спутнике импульс имел высокое отношение сигнал/шум, что достигается использованием соответствующей частотной модуляции и сжатием сигнала. Чтобы значительно увеличить длительность импульса и энергетический уровень, производится усреднение 1000 последовательных импульсов.

Для измерений высот над океаном обычно используются альтиметры с ограниченной длительностью импульса, проекция размера антенного луча которого в подспутниковой точке больше, чем эффективная поверхность проекции волнового фронта импульса на поверхность. Радиус проекции импульса зависит от высоты спутника, длительности импульса и значимой высоты волн.

В случае спутника Geosat типичный разброс размера пятна находился в диапазоне от 1,7 км для спокойного моря до 9,8 км при высоте волн 20 м. Для КА Торех/Poseidon размер пятна составлял 15...18 км. В принципе, для решения задачи определения высоты морской поверхности подобного «пространственного разрешения» было бы вполне достаточно. Однако с учётом относительно высокой точности альтиметра Торех/Poseidon возникло очень много практических приложений, использующих альтиметрическую информацию, одним из которых являлась задача определения уровня внутренних рек и водоёмов [78].

Размер отклика альтиметра в десятки километров существенно снижал возможности проведения исследований гидрологического режима рек с относительно узким руслом, следовательно, размер пятна следовало уменьшить.

В 2010 г. был запущен альтиметр SIRAL-2 (Synthetic Aperture Radars/Interferometric Radar Altimeter) (КА Cryosat-2), который впервые реализовал технологию DDA (Delay Dopler Access): принцип синтеза апертуры при построении спутниковых альтиметров (Synthetic Aperture Resolution Mode — SARM) [44]. Указанные технические решения позволили существенно увеличить пространственное разрешение альтиметра в направлении вдоль движения КА (рисунок 54).

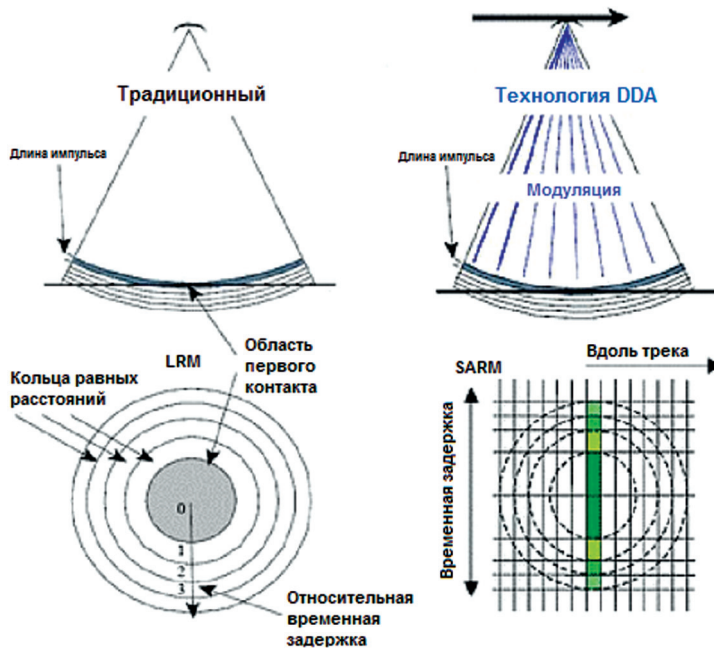


Рисунок 54. Физический смысл формирования отражённого сигнала спутникового альтиметра [44]

Альтиметр SRAL (Synthetic Aperture Radar Altimeter) КА Sentinel-3 уже осуществляет синтез апертуры на постоянной основе. Для обеспечения обратной совместимости SRAL может функционировать в режиме низкого разрешения (low resolution mode — LRM), реализуя импульсный режим [44]. Перспективный РА Poseidon-4 (КА Sentinel-6/Jason-CS) будет в целом реализован с использованием технологического задела альтиметра SRAL, единственное отличие состоит в том, что этот альтиметр будет способен одновременно работать в режиме синтеза апертуры и LRM. Фактически Poseidon-4 обеспечит технологический переход к принципиально новой альтиметрической системе KaRIn КА SWOT.

Основной технологией получения информации в приборе KaRIn будет принцип интерферометрии. KaRIn впервые позволит получать измерения высоты морской поверхности не только в подспутниковой точке, но и в полосе обзора (рисунок 55).

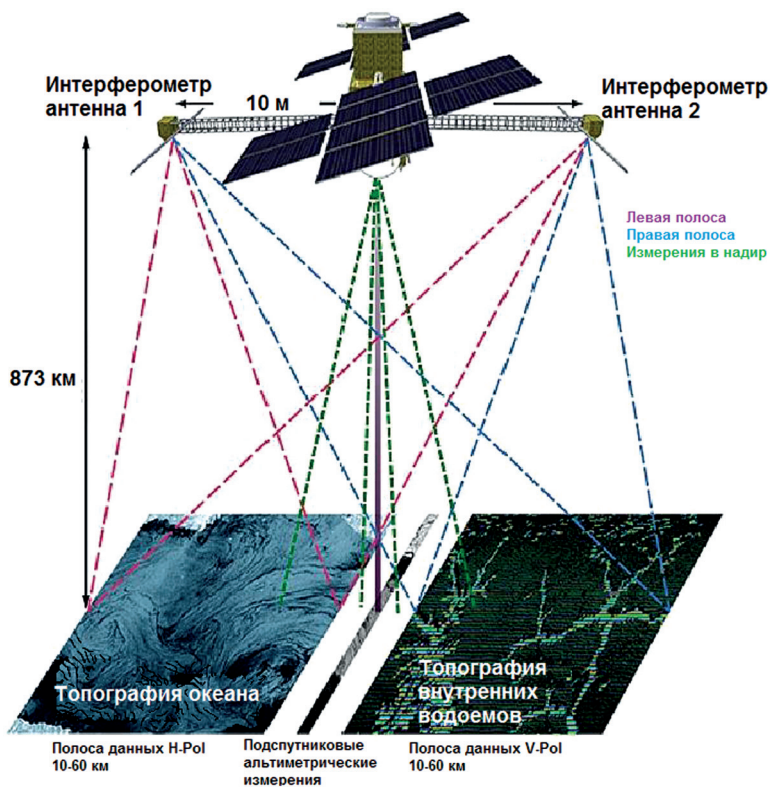


Рисунок 55. Принцип работы KaRIn КА SWOT [44, 79]

Предполагается, что размер полосы составит около 100 км, а пространственное разрешение от 2 до 70 м. При этом основное излучение будет осуществляться на частоте 35,75 ГГц [44].

Возвращаясь к «традиционным» альтиметрам, рассмотрим возможность определения скорости ветра. Скорость приводного ветра оценивается по изменению формы амплитуды отражённого морской поверхностью импульса. По мере нарастания ветра поверхность моря становится всё более взволнованной, так что количество зеркально отражающих элементов уменьшается и больше энергии рассеивается в направлениях от надира. Это приводит



к уменьшению амплитуды средней рассеянной назад мощности, которая может быть соотнесена со скоростью ветра. На практике коэффициент обратного рассеяния PA вычисляется по величине управляющего сигнала в цепи автоматической регулировки усиления (APU), используемой для нормализации средних значений зарегистрированных отражённых импульсов.

Чтобы повысить точность восстановления геофизических параметров, получаемых из альтиметрических данных, отражённые импульсы, принятые в режиме LRM, обычно усредняются для определения одной измерительной точки в секунду вдоль подспутникового трека. Такие односекундные усреднения являются основой для восстановления геофизических параметров, получаемых от различных спутников.

Альтиметрические измерения (LRM и/или SARM), совместно со значениями поправок, включаются в соответствующую базу измерений альтиметра (Geophysical Data Records — GDR) и распространяются для использования научному сообществу. Требуется обеспечивать высокий уровень точности всех поправок, составляющих бюджет при альтиметрических измерениях возвышений.

В таблице 14 представлен бюджет погрешностей PA, используемых в основных спутниковых системах, куда включены поправки и погрешности, обусловленные альтиметрической аппаратурой, атмосферными факторами, неопределённостью орбиты спутника, а также различными составляющими мгновенного уровня моря. На рисунке 56 представлена графическая интерпретация бюджета ошибок.

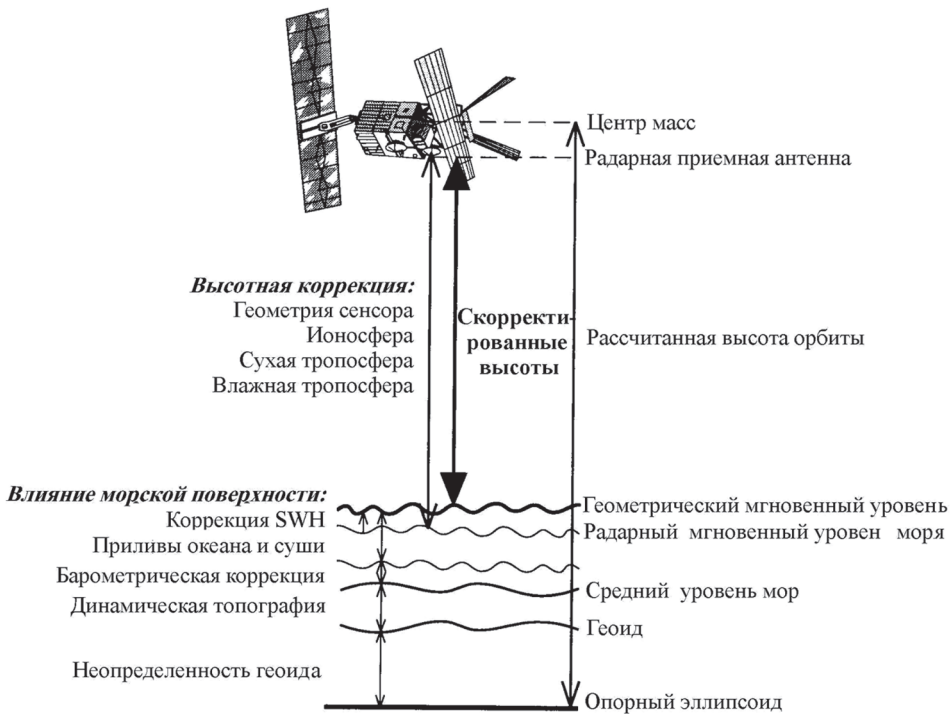


Рисунок 56. Бюджет ошибок спутниковых альтиметрических измерений

Для уменьшения аппаратурных погрешностей прежде всего необходимо знать точное положение антенны по отношению к центру масс спутника.



Таблица 14. Бюджет ошибок радарных альтиметров [44, 80]

Источники	GEOS-3	Seasat	Geosat	ERS-1	Topex/Poseidon	Envisat	Sentinel-3
Альтиметр	13,9 ГГц	13,5 ГГц	13,5 ГГц	13,8 ГГц	5,3/13,6 ГГц (13,65) ГГц	13,575/3,2 ГГц	13,575/5,41 ГГц
Инструментальный шум	50 см	19 см	5 см	3 см	<2 см	1,8 см	1,4 см (LRM) <1 см (SAR)
Смещение неопределённости	—	7 см	5 см	3-5 см	3 см	—	—
Временное смещение	—	5 мс	3...5 мс	1...2 мс	<1 мс	—	—
ЕМ-смещение	10 см	5 см	2 см	2 см	<2 см	2 см	2 см
Асимметричность	2 см	1 см	1 см	1 см	1 см	—	—
Сухая тропосфера	2 см	2 см	1 см	1 см	1 см	0,7 см	0,7 см
Влажная тропосфера	15 см	3 см	4 см	1,2 см	1,2 см	1,4 см	1,4 см
Ионосфера	2...3 см	2...3 см	2...3 см	2...3 см	1,3(2) см	0,5 см	0,5 см
Орбита	30...50 см	30 см	20 см	18 см	3,5 см	1,9 см	1,9 см
Суммарная среднеквадратичная ошибка	67 см	33 см	22 см	19 см	< 5 см	3,6 см	3,4 см

Поскольку каждый отражённый импульс является усреднением большого количества одиночных импульсов с разной формой, это вносит неопределённость, ухудшающую возможности альтиметра по определению точного времени прихода отражённого импульса, называемую трековым смещением (Tracker bias). Современные технологии, используемые в спутниковых альтиметрах, позволяют снизить имеющуюся инструментальную погрешность до величины порядка 2 см.

Из-за того, что впадины морских волн создают больше зеркально отражающих элементов, чем гребни, возникает дополнительная погрешность, приводящая при осреднении к смещению в сторону впадин, занижая реальный уровень. Такое так называемое электромагнитное (EM) смещение возрастает с увеличением *значимой высоты волн* (SWH — significant wave height) и обычно корректируется эмпирической функцией, отнесённой к измеренной альтиметром SWH.

Хотя для микроволнового излучения атмосфера достаточно прозрачна, скорость распространения сигнала РА подвержена влиянию свободных электронов в ионосфере, а также молекул воздуха и водяного пара в тропосфере.

Поправка из-за влияния ионосферы на сигнал РА зависит от *общего содержания электронов* (total electron content — TEC). Во время повышенной солнечной активности динамический диапазон погрешности из-за влияния ионосферы на оценки высоты может достигать 30 см. Чтобы вписаться в диапазон точности измерения расстояния в 1...2 см, необходимо определять общее содержание электронов с точностью не хуже 5 %. Для старых альтиметров получение ионосферной поправки основывалось на непрямом наблюдении вращения Фарадея (наблюдение за магнитным полем) с наземных станций, ионозондов, а также рассчитывалось по глобальным моделям TEC. В альтиметре спутника Торех/Poseidon использовался факт, что задержка радиосигнала, обусловленная TEC, зависит от частоты. Данная поправка оценивается численно проведением измерения сдвига фаз на двух частотах: 13,6 и 5,3 ГГц. Аналогичная двухчастотная методика применяется при оценках TEC по радиосигналам, принимаемым наземными станциями систем слежения и сопровождения спутников при их орбитальном перемещении.

Система слежения за спутниками Торех/Poseidon, использовавшая доплеровскую орбитографию и радиопозиционирование (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite — DORIS), измеряла разностную величину TEC вдоль траассы между спутником и различными наземными маячками. При существующей современной глобальной наземной сети из 40–50 станций пространственное разрешение оценок TEC оказывается достаточным, и система обеспечивает СКО на уровне 2 см.

Концентрация сухих молекул воздуха в атмосфере вызывает задержку сигнала, называемую *эффектом сухой тропосферы*. Этот эффект прямо пропорционален давлению на уровне моря со средней величиной порядка 2,3 м. Чтобы выполнить коррекцию с точностью 1 см необходимо определять давление с точностью 4 мбар. Для большинства океанов такой уровень точности обеспечивается существующими метеорологическими наблюдениями и численными моделями. Обобщённо, эта поправка рассчитана по глобальным моделям, аналогичным тем, что используются FNOС (Fleet Numerical Oceanographic Center) или европейским центром среднесрочного прогноза погоды ECMRWF (European Center of Medium Range Weather Forecasting).

*Поправка влажной тропосферы* или задержка распространения электромагнитного излучения за счёт водяного пара в атмосфере значительно варьирует как по времени, так и по пространству. Обычный диапазон изменений такой поправки находится между 5 и 30 см. Вариации коррелированы с атмосферными фронтальными системами на пространственных масштабах от десятков

до сотен километров и временными масштабами до нескольких часов. Поэтому для оценки содержания водяного пара необходимы дополнительные источники информации.

На спутниках ERS для таких оценок использовался радиометр ATSR, а на спутниках Topex/Poseidon — информация микроволнового радиометра (Topex Microwave Radiometer — TMR), осуществлявшего зондирование в надир. Предварительные результаты сравнения таких оценок по данным TMR и по модели ECMRWF дают смещение порядка 1,5 см.

Что касается точности определения параметров *орбиты*, то эфемериды спутника могут быть оценены по модели глобального гравитационного поля и из знания различных сил, действующих на спутник. Наибольшая неопределённость в расчётах орбиты связана с ошибками в модели поля гравитации и зависит от реального наклона плоскости орбиты. Немоделируемые изменения в количестве атмосферной пыли, давлении солнечной радиации и других силах, приложенных к спутнику, дополняют эту неопределённость. Соответственно, точность орбитального определения зависит от априорного знания перечисленных факторов, а также от регулярности, с которой спутник может отслеживаться наземными станциями.

Для альтиметрических спутников были специально разработаны наземные системы слежения и сопровождения. Так, например, на всех на них установлены лазерные отражательные устройства (Laser Reflector Array — LRA). На спутниках ERS была установлена система сопровождения PRARE, а на спутнике Topex/Poseidon — интегрированная система DORIS и GPS.

Наиболее важной для данных РА становится ошибка в знании радиальной компоненты орбиты. Она может быть разделена на две части: географически некоррелированную и географически коррелированную. Первая изменяется во времени и отличается для восходящих и нисходящих орбит над заданной точкой. Вторая зависит только от географического положения и, следовательно, идентична для всех восходящих и нисходящих орбит, проходящих через заданную географическую точку. Такие погрешности могут быть уменьшены только улучшениями в гравитационных моделях или в возможности более точного отслеживания положения спутника на орбите, и обычно предполагаются малыми и однородными на региональном масштабе. Радиальные орбитальные ошибки всё ещё остаются важнейшим препятствием для достижения максимальной точности альтиметрических измерений и использования всего потенциала данных РА.

Существуют несколько геофизических составляющих, дающих вклад в уровень моря. В зависимости от реального использования при определении топографии морской поверхности различные геофизические сигналы — океанские приливы; инверсный барометрический эффект вследствие флуктуаций атмосферного давления; динамическая топография, обусловленная океаническими течениями; и геоид, связанный с гравитационными полями — могут быть как полезными сигналами, так и источниками погрешностей.

Обычно независимые модели глобальных океанских приливов являются источником поправки на *приливное возвышение* и включаются в GDR. Такие глобальные модели могут существенно отличаться от региональных моделей приливов. Так, для данных Seasat в Северном море были обнаружены расхождения до 25 см со средним смещением до 8 см. Подобные расхождения могут приводить к невозможности правильной интерпретации сигналов, определяющих уровень моря.

Вклад в сигнал альтиметра, вызванный изменением уровня моря вследствие флуктуаций атмосферного давления, называется *инверсным барометрическим эффектом*. Мгновенное значение этого сигнала может быть косвенно рассчитано из поправки на сухую тропосферу. Однако временная шкала отклика

океана на флуктуации давления пока не очень хорошо изучена и этот эффект может быть значительным источником погрешности в РА данных. Сравнение инверсных барометрических поправок, рассчитанных по региональным моделям над Северным морем и использованных FNOС поправок сухой тропосферы на данных Seasat, показали хорошее совпадение в среднем, но отмечались расхождения до 13 см.

*Динамической топографией* является вклад в сигнал альтиметра, обусловленный океаническими циркуляциями. В первом приближении, если установится режим, при котором наклоны поверхности будут пропорциональны скорости течений, может быть достигнут геострофический баланс. Наклоны поверхности, обусловленные циркуляционными явлениями, имеют диапазон: от  $10^{-5}$  (1 м/100 км) для интенсивных западных пограничных течений, до менее чем  $10^{-7}$  (50 см/5000 км) для экваториальных течений. Такие сигналы также имеют широкий диапазон временной и пространственной изменчивости, от десятков до тысяч километров и от нескольких дней до многих лет, соответственно.

*Геоид* — это уровень поверхности земного гравитационного потенциала, который может быть соотнесён как временной инвариант для типовых применений РА. Его высота относительно опорного эллипсоида имеет пиковую амплитуду около 200 м с региональным наклоном изменчивости до 20 см/км. Средний уровень поверхности, определяемый по данным РА, в основном обусловлен вкладом геоида, но также включает усреднённый высотный вклад от геострофических океанических течений. Следовательно, чтобы точно вычислить высоту геоида только по альтиметрическим данным, необходимо оценить вклад этих течений. Для определения реальных вариаций геоида также могут быть использованы независимые гравитационные оценки. Региональная высота геоида может быть получена по измерениям поля гравитации с судов, но для точных глобальных оценок необходимо использовать специализированный спутник, измеряющий гравитационные поля, например, специализированные геодезические миссии CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload), GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) и т. д.

## МЕТОД РАСЧЁТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

Принципиальная схема метода спутниковой альтиметрии представлена на рисунке 57 (см. 133), на котором показаны различного рода поверхности, определяющие суть данного метода дистанционного зондирования поверхности океана из космоса. На основании данных спутниковой альтиметрии для изучения состояния океана определяют следующие поверхности:

- *отсчётный эллипсоид* — представляет собой поверхность второго порядка, относительно которой производится расчёт высоты орбиты спутника и высота геоида;
- *высота геоида  $H_g$*  или эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли, которая рассчитывается по различным моделям;
- *высота орбиты спутника  $H_{orb}$* , определяемая на основании навигационных данных и различных моделей (гравитационная модель, модель торможения и др.);
- *высота спутника над поверхностью моря  $H_{alt}$*  — рассчитывается непосредственно по времени возврата зондирующего радиопульса альтиметра на борт спутника. Она служит для определения высоты морской поверхности относительно отсчётного эллипсоида с учётом ряда поправок  $\Delta H_i$ , связанных с прохождением радиосигнала через атмосферу, приливами и инструментальными ошибками  $H_{ssh} = H_{orb} - H_{alt} - \sum_i \Delta H_i$ ;

- среднюю высоту морской поверхности  $H_{mss}$ , получаемую в результате осреднения данных спутниковой альтиметрии за некоторый временной интервал;
- аномалию высоты морской поверхности  $\Delta H_{ssh}$ , определяемую как отклонение от средней высоты  $\Delta H_{ssh} = H_{ssh} - H_{mss}$ ;
- динамическую топографию поверхности океана  $H_d$  или высоту отклонения морской поверхности относительно геоида  $H_d = H_{ssh} - H_g$ , которая, по сути, является уровневой поверхностью, как она понимается в задаче моделирования динамики бароклинного океана.

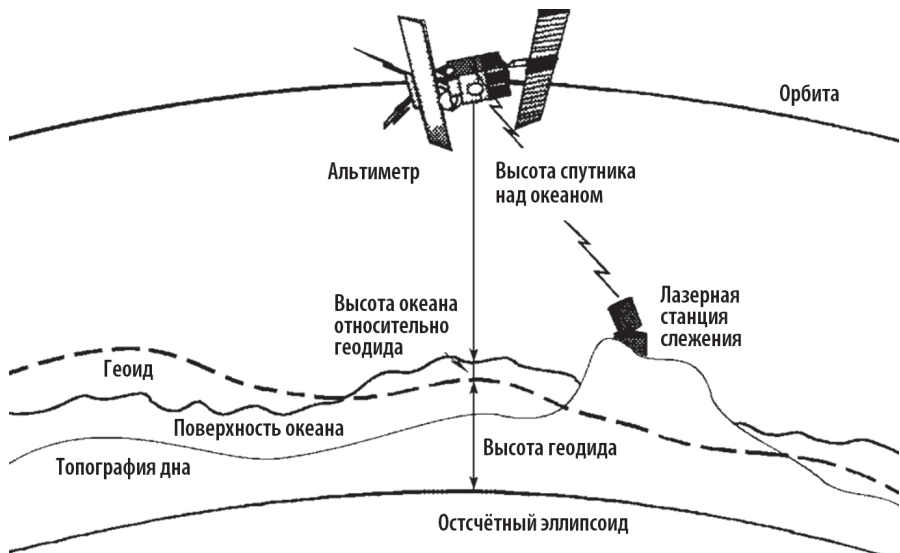


Рисунок 57. Принципиальная схема метода спутниковой альтиметрии

Необходимо отметить, что значения динамической топографии или аномалий высоты морской поверхности при условии использования информации современных РА рассчитываются только в подспутниковых точках. Таким образом, для получения пространственного распределения указанных величин необходимо осуществлять преобразование информации в соответствии со специализированными методиками [81], так или иначе реализующее принципы пространственной интерполяции информации.

Пространственное распределение динамической топографии или аномалий высоты морской поверхности даёт уникальную возможность исследования изменения динамики океана от синоптических масштабов до глобальных.

На рисунках 58 и 59 (см. с. 134) представлены карты динамической топографии, полученные традиционными контактными средствами, и аномалии высоты морской поверхности по данным альтиметра Тореx/Poseidon.

Представленные карты достаточно трудно сравнивать между собой, поскольку для начала в качестве точек отсчёта используются абсолютно разные поверхности. Кроме того, альтиметрический КА может получить максимальное покрытие альтиметрической информацией за период около суток (Тореx/Poseidon), тогда как корабль вынужден проводить съёмку подобного района в течение 30 дней. Тем не менее, можно говорить, что качественно зарегистрированные картины неплохо совпадают: так, например, вихревое образование с координатами центра  $3^\circ$  в. д.,  $66^\circ$  с. ш. хорошо прослеживается на каждом распределении.



5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРОВ

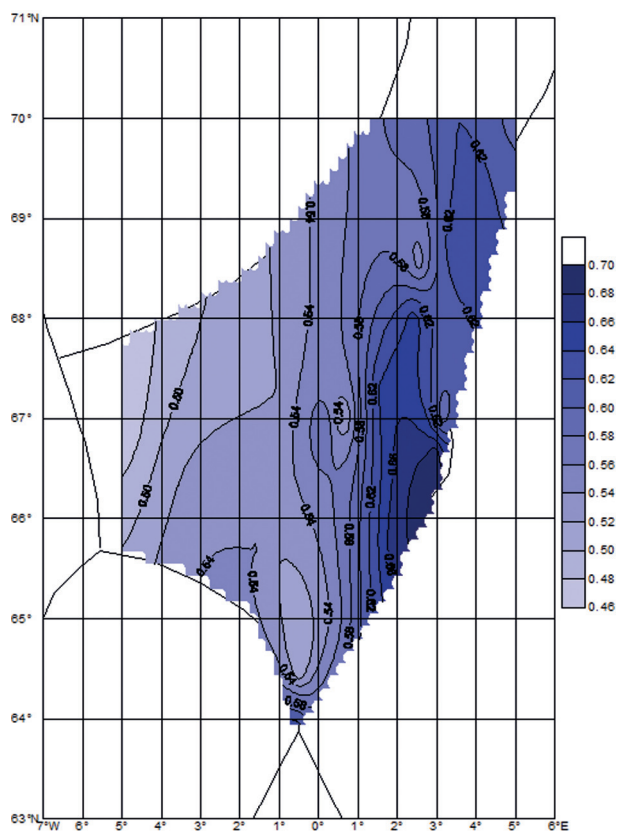


Рисунок 58. Распределение динамической топографии (в м) по данным судовых измерений относительно изобары 1000 м в июле 1997 г. [82]

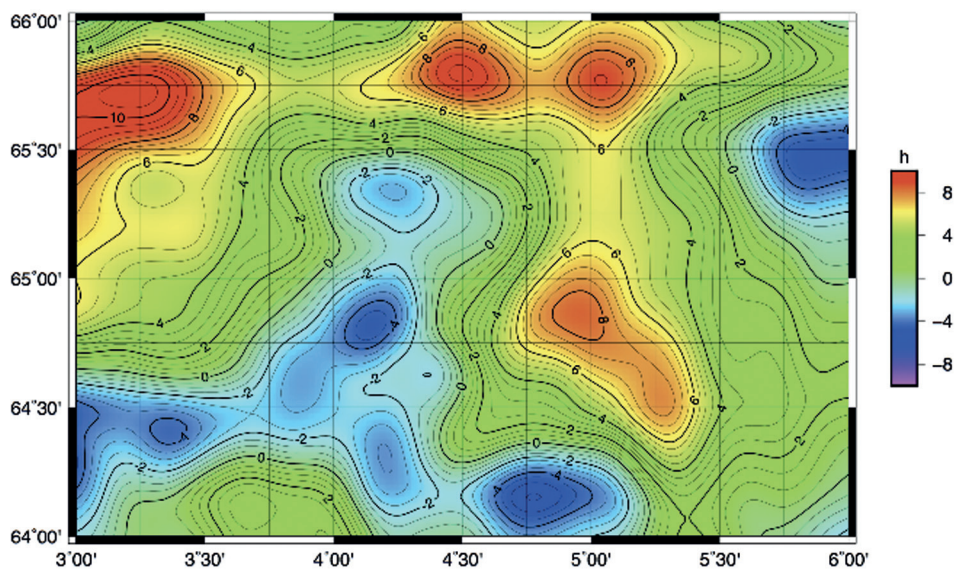


Рисунок 59. Карта аномалий высоты морской поверхности (в см) по данным КА Торех/Poseidon на 14.07.1997 – 24.07.1997 [82]



С учётом затрат на получение экспериментальных данных очевидно, что спутниковая альтиметрия по сравнению с традиционными судовыми океанографическими съёмками представляется весьма перспективной технологией, позволяющей существенно удешевить стоимость мониторинговых работ и, следовательно, значительно повысить их эффективность.

## 5.6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ, ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН, ЗОН КОНВЕРГЕНЦИИ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ РСА И РЛС БО

В настоящее время изучение морской поверхности при помощи РСА является уже вполне сформировавшимся направлением спутниковой океанографии. Целесообразность и эффективность использования РСА для наблюдения поверхностных и внутренних волн, течений и циркуляций, фронтальных разделов, морских загрязнений, подводной топографии на мелководье была продемонстрирована в ходе проведения съёмок с отечественного КА «Алмаз-1» в аэрокосмических экспериментах, выполненных в рамках программы «Океан-И» [83]: NAECES, «Гольфстрим» (совместно с МГИ АН Украины), PRE-SHERI, ERS-1/«Алмаз-1» и в экспериментах серии «Восток» на Камчатке (совместно с ИКИ РАН). Одним из наиболее показательных примеров использования РСА для изучения океанической циркуляции является комплексный эксперимент в Норвежском море 1997 г., результаты которого приведены в книге [82].

Возможность регистрации процессов, происходящих в атмосфере и океане, связана с вызываемыми ими изменениями рассеивающих свойств морской поверхности. Главным визуализирующим фактором являются короткие волны с длинами волн от 1 до 10 см, которые, за редким исключением, практически повсеместно присутствуют на поверхности океана. Обратное рассеяние РЛ-сигнала (радиолокационного) формируется в основном благодаря резонансному механизму, называемому *брегговским* рассеянием, при углах визирования от 20 до 60°. Этот механизм предполагает рассеяние энергии РЛ-сигнала поверхностными волнами, длина которых примерно равна длине волны РЛ-излучения. Модуляция, изменяющая параметры волн (амплитуду, крутизну, длину волны) и ответственная за рассеяние, вызывает различные волновые и динамические процессы, происходящие как на поверхности океана, так и внутри его.

*Радар с синтезированной апертурой (РСА)* — микроволновое устройство, используемое на авиационных или спутниковых платформах для получения изображений земной и океанской поверхности с высоким пространственным разрешением. В РСА микроволновый импульс излучается антенной в направлении земной поверхности, а микроволновая энергия, рассеянная назад на космический корабль, измеряется на борту КА. Для формирования изображения в РСА используется радарный принцип измерения временных задержек рассеянных назад сигналов. Интенсивность радиолокационного изображения зависит от количества микроволновой энергии, рассеянной назад наземной целью и принятой антенной РСА (рисунком 60, см. с. 136).

Поскольку физические механизмы, ответственные за обратное рассеяние микроволнового излучения, отличаются от механизмов формирования сигналов в видимом или инфракрасном диапазоне, *интерпретация* изображений РСА требует знания, как микроволны взаимодействуют с целями.

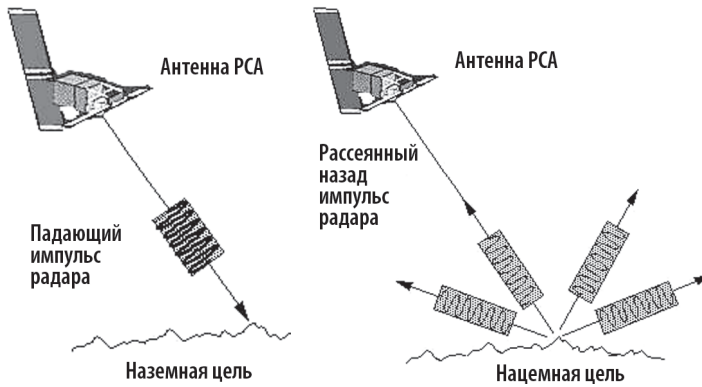


Рисунок 60. Формирование сигнала РСА

Способность микроволнового излучения проникать через облака, осадки или земной покров зависит от его частоты. В общем случае мощность проникновения возрастает для более длинных волн (низкая частота).

Интенсивность обратного рассеяния сигналов РСА увеличивается с увеличением шероховатости поверхности. Однако шероховатость — относительная величина. Является ли поверхность шероховатой или нет, зависит от соотношения размера неоднородности земной поверхности и шкалы длин волн радара. Взаимодействие различных радарных длин волн с шероховатой поверхностью иллюстрируется рисунком 61.

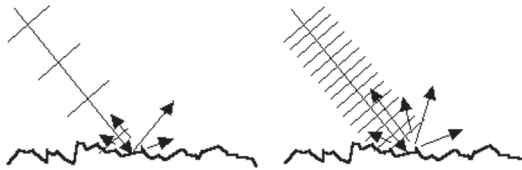
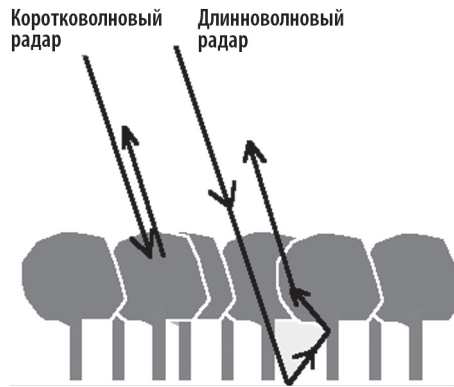


Рисунок 61. Поверхность Земли кажется гладкой для длинноволнового радара. Рассеяние от поверхности — слабое (слева). Та же самая поверхность Земли кажется шероховатой для коротковолнового радара. В радарном изображении поверхность кажется яркой из-за увеличенного рассеяния на поверхности (справа)

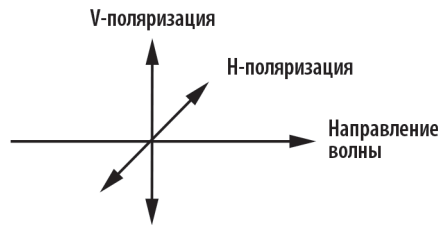
В изображении РСА опорным масштабом для оценки поверхностной шероховатости служит длина волны микроволнового диапазона. Если поверхностная неоднородность меньше, чем длина волны, то поверхность рассматривается гладкой. Например, при использовании РСА L-диапазона (длина волны от 15 до 30 см) от поверхности с неоднородностью порядка 5 см рассеивается слабое излучение и поверхность будет казаться тёмной. Однако та же самая поверхность будет казаться яркой из-за увеличения интенсивности обратного рассеяния в РСА-изображении X-диапазона (длина волны от 2,4 до 3,8 см).

Радиолокаторы спутников Radarsat и Sentinel-1A/B используют микроволновый C-диапазон (длина волны 5,6 см), в то время как РСА JERS (Japan Earth Resources Satellite) использовал L-диапазон. Микроволновый C-диапазон полезен для отображения свойств океана и ледовых условий. L-диапазон имеет большую длину волны и сильнее проникает вглубь, чем излучение C-диапазона. Следовательно, он более полезен для изучения растительности и лесов, поскольку излучение способно проникнуть глубже под крону растительности (рисунок 62, см. с. 137).



**Рисунок 62.** Коротковолновый радар взаимодействует, главным образом, с верхним слоем кроны деревьев, в то время как длинноволновый радар способен проникнуть глубже под кроны, испытывая многократное рассеяние между кронами, стволами и почвой

*Микроволновая поляризация* определяет ориентацию вектора электрического поля излучаемого импульса относительно горизонтального направления. Если вектор колеблется вдоль направления, параллельного горизонтальному, считается, что луч горизонтально (H) поляризован. С другой стороны, если он колеблется перпендикулярно горизонтальному направлению, луч является вертикально (V) поляризованным (рисунок 63).



**Рисунок 63.** Микроволновая поляризация: если вектор электрического поля колеблется вдоль горизонтального направления, волна горизонтально поляризована — H; если вектор электрического поля колеблется перпендикулярно горизонтальному направлению, волна вертикально поляризована — V

После взаимодействия с земной поверхностью состояние поляризации может измениться, так что рассеянная микроволновая энергия обычно имеет смесь из двух поляризаций. Приёмная антенна PCA может быть предназначена для регистрации H- или V-компонент рассеянной назад радиации. Следовательно, имеются четыре возможных поляризационных конфигурации для системы PCA: HH, VV, HV, VH в зависимости от поляризации переданных и принятых микроволновых сигналов. Например, PCA спутника ERS передавал поляризованный V-импульс и принимал только V-поляризованный микроволновый импульс, так что это — VV-поляризованный PCA. PCA спутника Radarsat — HH-поляризованный. Более современный PCA KA Sentinel-1A/B может принимать и излучать любую комбинацию сигналов: VV, VH или HH, HV [84].

*Угол падения* — угол между излучаемым импульсом радара и перпендикуляром к поверхности Земли. Взаимодействие между микроволновым излучением и поверхностью зависит от угла падения радарного импульса на поверхность.

РСА спутника ERS имеет постоянный угол  $23^\circ$  в центре сцены. Radarsat — первый спутниковый РСА, который позволяет реализовать различные углы падения луча, создавая микроволновые изображения под различными углами и с разным пространственным разрешением.

Угол падения  $23^\circ$  для РСА ERS (рисунок 64) оптимален при обнаружении океанских волн и других океанских поверхностных явлений. Большой угол падения лучше подходит для других применений. Например, большой угол падения увеличивает контраст между залесенными участками и областями вырубки деревьев. Получение РСА-изображений с использованием двух различных углов падения позволяет также создать стереоизображения.

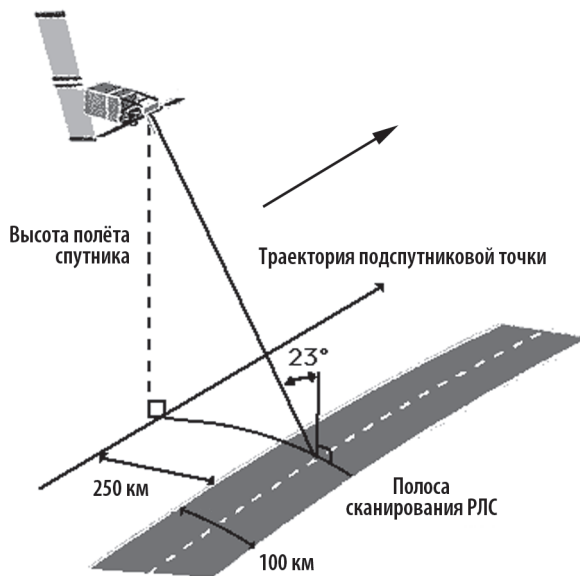


Рисунок 64. Геометрия режима изображений РСА

В радаре с реальной апертурой или *радиолокаторе бокового обзора* (РЛС БО) разрешение на земле ограничено угловым размером микроволнового луча, излучаемого антенной. Более мелкие детали на земной поверхности могут быть зарегистрированы при использовании более узкого луча. Ширина луча обратно пропорциональна размеру антенны, т. е. чем длиннее антенна, тем уже луч. Схема радиолокационного ДЗ выглядит так: излучение импульса в радиодиапазоне — прохождение этим импульсом расстояния до исследуемых объектов — отражение (поглощение) волн объектом — возвращение отражённой энергии — регистрация отражённого сигнала. При этом пространственное разрешение изображений, получаемых РЛС БО, зависит от размера импульса, сформированного в направлении, перпендикулярном полёту, и длительности импульса. Чем меньше размер импульса по ширине и чем меньше его длительность, тем выше разрешающая способность.

В силу различных технических причин в условиях космоса достаточно трудно реализовать длинную антенну, которая требуется для получения изображения земной поверхности высокого разрешения.

Известно, что диаграмма направленности приёмной антенны формируется в результате когерентного (с учётом фазы) сложения радиоволн, принимаемых отдельными её элементами. Например, если антенная система состоит из десяти рядом расположенных одинаковых антенн размером  $d$  (линейная ре-

шётка) и сигналы, принимаемые каждой антенной, когерентно суммируются, то такая антенная решётка имеет такую же узкую диаграмму направленности, как и антенна размером  $10d$ . Напомним, что *когерентность* — это процесс распространения колебаний, фаза которых постоянна во времени или изменяется по известному закону.

Следовательно, повышение угловой разрешающей способности возможно путём когерентного суммирования сигналов антенн, расположенных в пространстве на прямой линии, т. е. путём создания «пространственной» антенной решётки.

Принцип действия РСА основан на использовании движения РЛС для последовательного формирования антенной решётки на траектории полёта. В РСА применяется относительно небольшая антенна, диаграмма направленности которой неподвижна относительно носителя и направлена перпендикулярно линии пути (боковой обзор).

В процессе движения ИСЗ антенна РСА в моменты излучения (приёма) импульса последовательно занимает в пространстве положения 1, 2, 3 и т. д. (рисунок 65) на траектории, тем самым формируя искусственную (синтезированную) антенную решётку. Запоминая ряд сигналов, последовательно принимаемых антенной РЛС в каждой точке на участке траектории (например, 1–10) и затем когерентно их суммируя, получаем узкую диаграмму направленности искусственно сформированной антенной решётки. Размер решётки, т. е. размер синтезированной апертуры РСА, равен длине участка траектории, на котором осуществляется запоминание и когерентное суммирование сигналов.

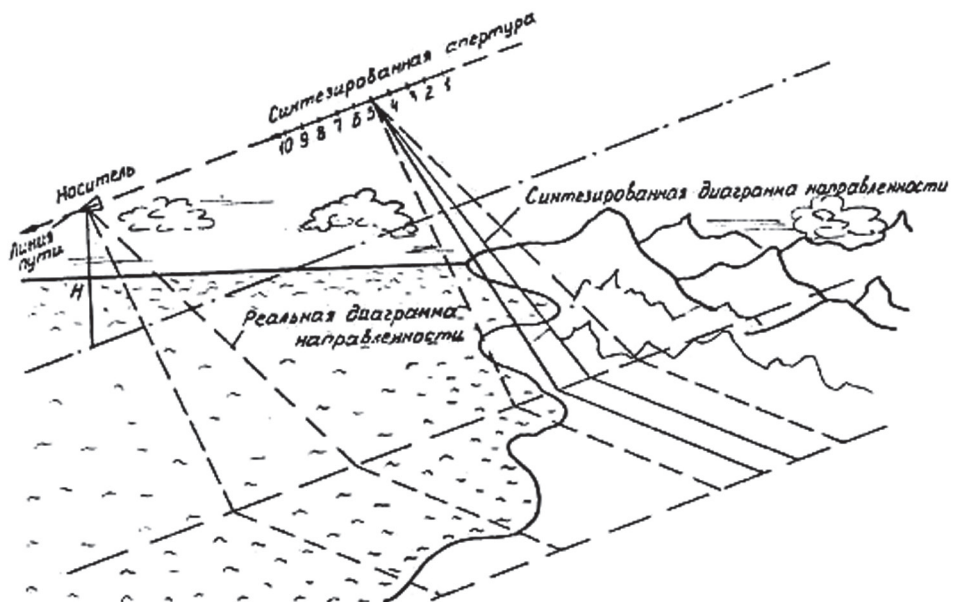


Рисунок 65. Принцип формирования синтезированной апертуры антенны РСА

Естественно, что для когерентного суммирования сигналов требуется знание параметров траектории носителя с очень высокой точностью (доли длины волны). Наиболее просто осуществить синтезирование апертуры при равномерном и прямолинейном движении носителя. На практике такое требование можно обеспечить на интервале порядка единиц секунд. В случае отклонения движения от равномерного и прямолинейного принципиальная возможность

синтезирования апертуры остаётся, но реализуется значительно труднее ввиду необходимости измерения характеристик движения и дальнейшего учёта их при когерентном суммировании.

Математически формирование изображения для РСА аналогично многим другим фокусирующим системам, таким как оптические линзы и большие антенны радиотелескопов. Это означает, что получение РСА-изображения эквивалентно реконструкции волнового фронта, для которой фундаментальным принципом является когерентность: зависимость всех составляющих сигналов от их фазовой структуры. Когерентное интегрирование приводит к мгновенному азимутальному разрешению, равному половине азимутальной длины антенны РСА.

Используя метод синтезирования, можно увеличить разрешающую способность РСА в 100–1000 раз и более по сравнению с РЛС БО. Так, для РСА спутника ERS за счёт перемещения космического аппарата имитировался большой размер антенны (приблизительно 4 км) при фактической длине антенны, равной 10 м.

Процесс синтеза апертуры позволяет повысить разрешение и сформировать развёртку изображения вдоль направления движения космического аппарата. Развёртка изображения по координате наклонной дальности (вдоль направления излучения сигнала и перпендикулярно направлению движения космического аппарата) формируется за счёт использования серии коротких импульсов, которые «сканируют» поверхности от ближнего до дальнего края полосы обзора. Величина пространственного разрешения также определяется шириной спектра зондирующих импульсов и зависит от угла падения волны. Непосредственно изображение формируется в интервале времени между испущенным и принятым сигналами, при этом чем дальше точка поверхности, рассеивающая излучение, тем больше времени проходит между излучением и приёмом сигнала. Формирование развёртки изображения указанным способом ограничивает радиолокационную съёмку в надир, поскольку в этом случае отклики от близких объектов на поверхности могут прийти на приёмную антенну практически одновременно. Поэтому в радиолокаторах космического базирования, как правило, применяют радиолокаторы с углом падения от 20°. Верхняя граница угла определяется мощностью радиосигнала, поскольку с увеличением угла падает количество энергии рассеиваемого поверхностью в обратном направлении. Для радиолокаторов космического базирования угол падения лежит в диапазоне от 20 до 60° [85].

Благодаря способности микроволн проникать через облака РСА способен создать изображения практически при любой погоде. Это особенно полезно в тропических областях, которые в течение года часто закрыты облаками. Будучи активным устройством ДЗ, РСА также способен к функционированию и в ночных условиях.

При отражении от множества распределённых отражателей случайные фазы индивидуальных элементов вызывают взаимную интерференцию, приводящую к модуляции яркости изображаемого поля. Это явление известно как спекл, который можно уменьшить усреднением, несколько ухудшающим разрешение.

При океанографических применениях объект интереса находится в движении, которое имеет значительное влияние на характеристики систем РСА. Могут наблюдаться волновые перепады большие, чем разрешение изображения. Этот эффект становится ещё более очевидным по мере увеличения времени экспозиции радара, что аналогично зависимости качества изображения стандартного фотоаппарата от его движения. Время экспозиции РСА  $\Delta T = (\lambda/D_{Az}) \cdot (R/V)$  прямо пропорционально длине волны. Фактор  $R/V$ , известный как отношение дальности к скорости, является пространственно-временным параметром, применяемым к изображению океанических волн в РСА. В общем случае, чем он меньше, тем лучше.



## ОТРАЖЕНИЕ РАДАРНОГО СИГНАЛА ОТ МОРЯ

Для распределённых сцен, таких как морская поверхность, *радарная отражательная способность описывается величиной  $\sigma^0$* , которая определяется отношением средней мощности излучения, рассеянного назад, к падающему излучению на единицу площади в горизонтальной плоскости. Параметр  $\sigma^0$  — есть функция как инструментальных, так и геофизических параметров. Инструментальные факторы включают: поляризацию (*pp*) и длину волны ( $\lambda$ ) радарного излучения, а также угол падения  $\theta_i$ , под которым просматривается сцена. Геофизические параметры включают: шероховатость поверхности и поверхностную проводимость, а также факторы окружающей среды, влияющие на свойства поверхности. Для радарных длин волн отражение от океана уменьшается по мере увеличения угла падения, как это показано на рисунке 66.

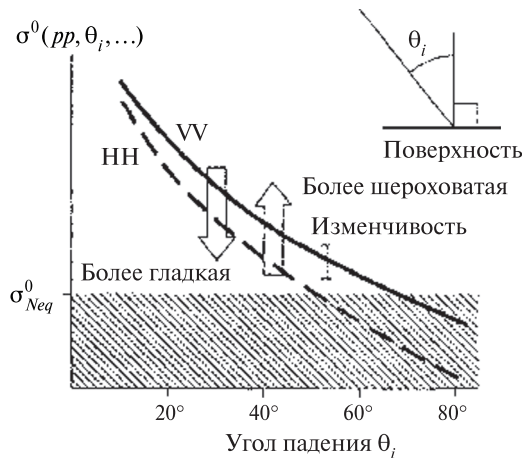


Рисунок 66. Зависимость  $\sigma^0$  от угла падения радарного импульса

Поляризация излучаемого электромагнитного поля определена геометрией антенны. Наблюдаемое отражение зависит от поляризационного состояния приёмной антенны и излучённого поля, причём для РСА наиболее часто используются и вертикальная линейная (V) и горизонтальная линейная (H) поляризации. Большинство систем используют одну и ту же антенну для функций приёма-передачи, приводя к поляризационно-подобной  $\sigma^0$ . Отражение от океана обычно больше для VV-, чем для HH-поляризации. Например,  $\sigma_{VV}^0$  больше, чем  $\sigma_{HH}^0$  на величину 2,5 дБ при угле 30° в С-диапазоне. Поперечно поляризованная компонента  $\sigma_{VH}^0$  слабее на 10 дБ.

Всем радарным наблюдениям свойственна статистическая изменчивость, заданная спеклом, описанным выше. Более того, все радарные наблюдения сцен содержат дополнительный радарный шум, уровень которого может быть описан эквивалентным количеством отражения или шумовой эквивалентной  $\sigma_{Neq}^0$ . Уровень отражательной способности сцены должен быть по меньшей мере на 5 дБ выше шума для полезного использования, а лучше иметь соотношение сигнал/шум не менее 10 дБ.

Для широкого диапазона углов падения доминирующим случаем радарного отражения от морской поверхности является брэгговское рассеяние, впервое предсказанное Райтом, выполнившим серьёзные теоретические и экспериментальные исследования. Брэгговское рассеяние обусловлено систематическим набегом фазы между падающей полуволной  $\lambda/2$ , проектируемой на морскую

поверхность и связанной периодической океанской волновой компонентой  $\Lambda_0$ . (Коэффициент  $1/2$  возникает из-за двойного пути, проходящего падающим излучением радара.)

Условие Брэгга  $\Lambda_0 = \lambda / (2 \sin \theta_i)$ . Для длин волн и углов падения типичных радаров ДЗ океана диапазон брэгговских волн простирается от длинных капиллярных волн ( $\sim 2$  см) до коротких гравитационных ( $\sim 50$  см). Шероховатость в контексте микроволнового ДЗ подразумевает специальный режим брэгговского отражения для компонент поверхностных волн, имеющих короткое время жизни и генерирующихся локально. Они модулируют более длинные и более энергичные морские волны. Из этого следует, что длинноволновая структура наблюдается микроволновыми системами в первую очередь благодаря картине, отражаемой в брэгговских волнах. Такой подход известен как *двухмасштабная модель микроволнового океанского рассеяния*.

Шероховатость на брэгговских длинах волн устанавливается локальными ветровыми нагрузками. Для заданного угла падения и длины волны радара имеется закономерность первого порядка мощности между отражательной способностью и скоростью ветра, как отображено на рисунке 67.

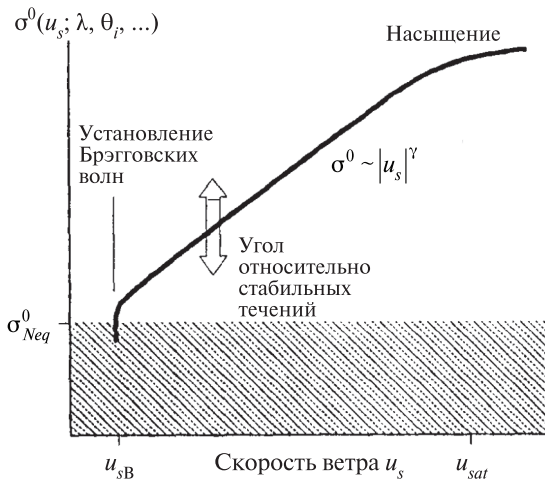


Рисунок 67. Зависимость  $\sigma^0$  от скорости ветра

Среди других параметров экспонента  $\gamma$  является функцией длины волны. Так, для спутника ERS-1, у которого длина волны равна 5,7 см, VV-поляризация и угол падения  $23^\circ$  параметр  $\gamma = 1,1 \pm 0,1$ . С другой стороны при том же угле падения для Seasat с длиной волны 23 см на HH-поляризации  $\gamma = 0,5 \pm 0,1$ .

Аэродинамические и гидродинамические возмущения, возникающие у поверхности воды, как бы фиксируются на радиолокационных изображениях (РЛИ) в поле коротких волн, становясь видимыми благодаря наличию поверхностной мелкомасштабной шероховатости. Использование РСА космического базирования открывает широкие возможности для наблюдения большинства океанических явлений, позволяя осуществлять их постоянный мониторинг, тем более что большинство этих явлений можно наблюдать только с его помощью.

Понимание процессов формирования РЛ-изображения также необходимо для их интерпретации. Эксперименты, проведённые во время полётов КА «Космос-1870» и «Алмаз-1», позволили установить, что радиолокация морской поверхности позволяет пока получать лишь качественную информацию, и только в отдельных случаях — количественную. Более того, оказалось, что

при помощи РСА можно наблюдать аналогичные процессы и явления и в крупных озёрах [86]. Ниже кратко описаны основные явления, наблюдение которых в океане возможно при помощи РСА.

Необходимо отметить, что, с учётом существенного влияния приводного ветра на механизм формирования радиолокационного изображения океана, возможны условия, при которых изображения океанических процессов получить не удастся. При существенной ветровой нагрузке информация, полученная с РСА ERS-2, оказалась практически полностью непригодной для последующего анализа [82].

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ И ЗЫБЬ

Длинные поверхностные волны хорошо различимы на РЛИ в основном из-за наличия коротких *гравитационно-капиллярных* (ГК) волн (ряби) на их поверхности, модулируемых орбитальным движением и формой волны, создаваемых длинной волной, а также характером локального ветрового потока вдоль волны. На радиолокационных изображениях можно выделить различные системы волн, распространяющиеся в различных направлениях, рефракцию волн на мелководье и интерференцию их за препятствиями, иногда отдельные пятна и полосы пены, вытягивающиеся вдоль ветра, прибойную зону и тому подобные детали. Заметим, что различный ветровой режим создаёт различные по своему внешнему виду картины волнения. Методами спектрального анализа РЛИ можно определять следующие параметры морского волнения: структуру и тип волнения, длину волны, направление и скорость распространения, количество систем волнения.

При изучении волнения различают двумерный, трёхмерный и смешанный типы волнения. Первый обычно создают свободные волны зыби, которые не подвержены действию ветра; второй — обычные ветровые волны; третий — волны зыби и ветровое волнение. На различных стадиях развития волнения картина взволнованной поверхности, изменяясь со временем и в пространстве, позволяет контролировать эти изменения. Прогноз волнения, а тем более его пространственные картины, начинает играть существенную роль при обеспечении деятельности человека в море. Возможности РСА КА «Алмаз-1» по наблюдению морского ветрового волнения и зыби обсуждаются в статьях [87, 88].

## ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ

Дивергентные и конвергентные компоненты поверхностных течений внутренних волн модулируют короткие гравитационно-капиллярные волны и создают на поверхности моря и на РЛИ картину в виде чередующихся, периодических, квазипараллельных светлых и тёмных полос (рисунок 68, см. с. 144).

В качестве основных механизмов, объясняющих контрасты ВВ, рассматривались: *кинематический* [89], *плёночный* и *турбулентный*.

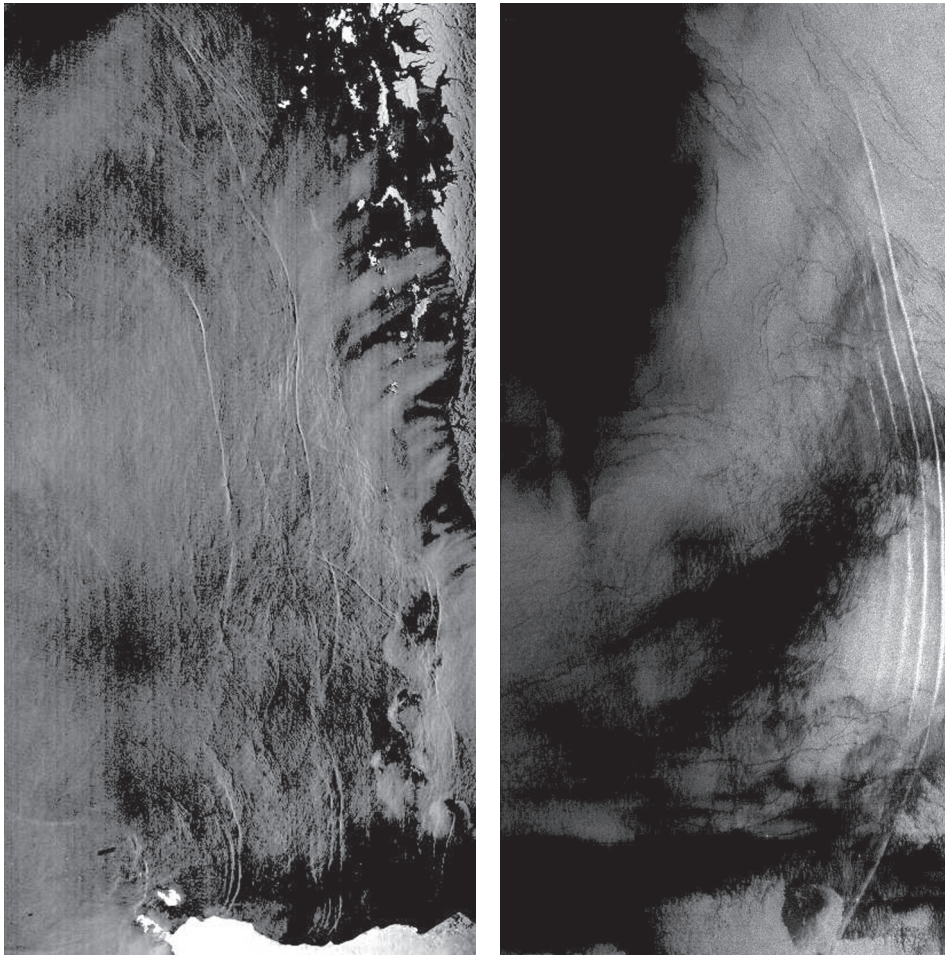
Внутренние волны могут быть генерированы:

- 1) приливом около границы материкового склона;
- 2) переменным течением при обтекании неоднородностей дна;
- 3) перемещающейся атмосферной барической системой или фронтальной зоной, создающими резкие колебания давления или ветра.

Поверхностные проявления ВВ можно использовать для восстановления термической структуры верхнего слоя океана (глубины термоклина, вертикальных градиентов температуры и плотности).

## ТЕЧЕНИЯ, ЦИРКУЛЯЦИИ, ВИХРИ

Известно, что сдвиг скорости течения видоизменяет пространственный спектр волнения как на коротковолновой, так и в длинноволновой областях и, следовательно, параметры ГК-волнения, перераспределяет интенсивность отражённого РЛ-сигнала. Поэтому участки течения с различными изменениями величины (и градиента) скорости или направления (границы, структура течений и их перемежаемость) — хорошо различимы на РЛИ; зоны усиления или ослабления течений, модулируя волнение, создают характерную картину на изображениях [82, 89–91].



**Рисунок 68.** Проявление внутренних волн в изображении РСА спутника Radarsat (*слева*) и ERS (*справа*)

## ФРОНТЫ, ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗОНЫ, АПВЕЛЛИНГ

Видны на РЛИ в виде разной по контрасту протяжённой полосы различной ширины благодаря изменению интенсивности ветрового волнения. Часто фронтальные зоны приурочены к прибрежным районам, дельтам крупных рек, где происходит взаимодействие речных и морских вод, а также к районам со-



прикосновения двух интенсивных течений или водных масс с различными гидрофизическими характеристиками и к районам апвеллинга.

Механизм их проявления на РЛИ связан с влиянием на поле ГК-волн градиентов скорости течения и градиентов температуры. В первом случае аналогично течениям, во втором — при наличии термических контрастов во фронтальной зоне может меняться устойчивость приводного слоя атмосферы, что приводит с одной стороны фронта к усилению приводного ветра, усиливая, а иногда и ослабляя, контрасты на РЛИ. Фронты, фронтальные зоны и апвеллинги — районы значительной биопродуктивности, имеющие большое значение для рыбного хозяйства. Оказалось, что океанические фронты можно увидеть на радиолокационных изображениях или в виде чёткой границы [92], или за счёт модификации поля длинных волн.

## ПРИЛИВЫ И ПРИЛИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Приливы видны на РЛИ благодаря тому, что генерируют на мелководье или в прибрежной зоне — на банках, отмелях и устьях — приливные течения различной интенсивности, механизмы визуализации которых описаны выше. Более того, впервые с помощью РСА КА «Алмаз-1» были получены уникальные РЛИ, на которых зафиксированы усыхающие во время отлива отмели [93]. При взаимодействии приливных и постоянных течений могут возникать слои, толчея, приливной бор. Приливами и их динамикой интересуются все службы, связанные с побережьем и прибрежными районами моря (рисунок 69).

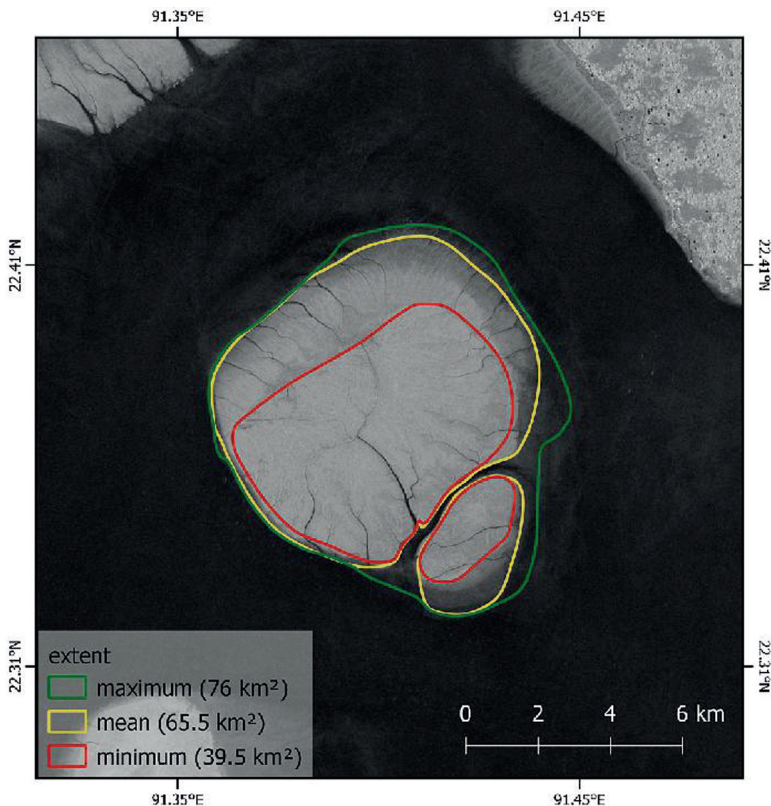


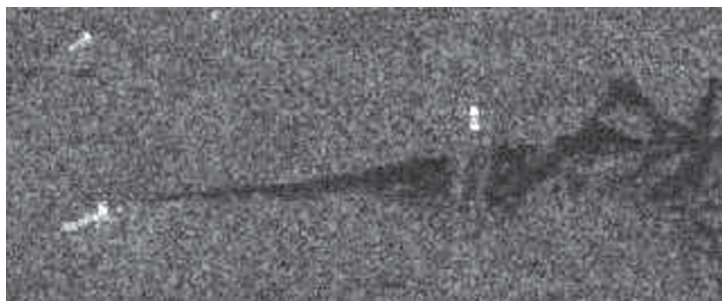
Рисунок 69. Эволюция береговой линии о. Тенга Чар, КА Sentinel-1 [84]

## ПОДВОДНАЯ ТОПОГРАФИЯ (РЕЛЬЕФ ДНА)

Оказалось, что только с помощью РСА удалось наблюдать формы рельефа на мелководьях. Механизм их появления связан с обтеканием приливным течением форм подводного рельефа (например, песчаных банок); вариации течения при обтекании банок модулируют короткие ветровые волны над ними. Подводный рельеф наблюдается при помощи РСА обычно в приливных морях и необходимым условием его наблюдения является наличие сильного прилива и ветрового волнения (ветра) [94]. Полезность такого рода информации совершенно очевидна и необходима для всех, кто занимается изысканиями на шельфе.

## МОРСКИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ПЛЁНКИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Как известно, на поверхности океанов образуются плёнки поверхностно-активных веществ (ПАВ) и загрязнений, концентрация которых достаточна для изменения физических свойств морской поверхности — например, поверхностного натяжения. Плёнки ПАВ и нефтепродуктов часто ответственны за появление на поверхности моря сликов, обусловленных ослаблением (гашением) в них сантиметровых и дециметровых волн, а также препятствуют их генерации при слабых ветрах. Благодаря этому плёнки поверхностных загрязнений и нефтепродуктов видны на РЛИ (рисунок 70) как тёмные пятна различной формы и конфигурации; иногда они причудливо вытягиваются и отслеживают постоянные течения.



**Рисунок 70.** РСА-изображение спутника ERS; видно, как судно (яркая цель в нижнем левом углу) сливает нефть в море

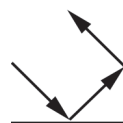
Спокойные морские поверхности в РСА-изображениях кажутся тёмными. Однако взволнованные морские поверхности могут казаться яркими, особенно когда угол падения мал. Присутствие нефтяных плёнок сглаживает морскую поверхность. При определённых условиях, когда морская поверхность достаточно шероховата, нефтяные плёнки могут проявляться как тёмные заплатки на ярком фоне.

## КОРАБЛИ И КОРАБЕЛЬНЫЕ СЛЕДЫ

Корабли всегда видны на РЛИ как яркие белые точки или небольшие пятна. Корабельные следы видны на РЛИ благодаря генерации движущимися судами специфической системы (след Кельвина) расходящихся продольных

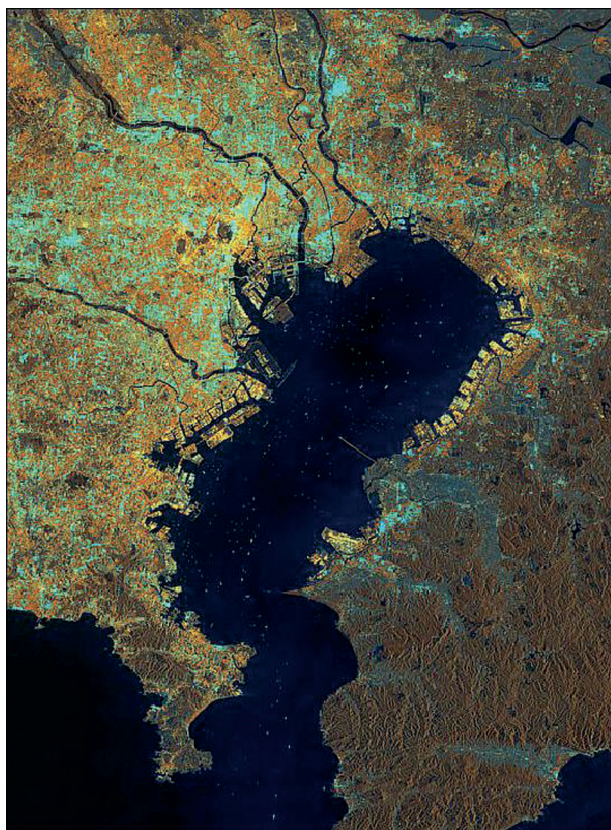


**Рисунок 71.** Отражение от угла: когда две гладких поверхности формируют правильный угол, стоящий перед радарным лучом, луч дважды отражается от поверхностей, и большинство радарной энергии попадет назад на приёмную антенну радара



(косых) и поперечных волн, турбулентного следа. При определённых гидрометеорологических условиях длина следа может существенно варьировать. Более того, когда при штормовой погоде пропадают РЛИ самих кораблей, корабельные волны фиксируются на РЛИ по той же причине, что и крупные волны. Основные результаты по наблюдению рыболовных судов с помощью РСА обобщены в работе [95].

Очень яркие цели могут появляться в изображении из-за влияния уголкового отражателя, на которых радарные импульсы испытывают два зеркальных отражения: сначала от горизонтального основания — земной (или морской) поверхности в направлении к цели, а затем от одной вертикальной грани цели в направлении на приёмную антенну радара (рисунок 71).



**Рисунок 72.** Данное РСА-изображение отображает морскую акваторию Токийского порта. Яркие пятна представляют множество судов. КА Sentinel-1 [84]

Примеры таких целей — суда в море (рисунок 72), высотные здания и характерные металлические объекты типа грузовых контейнеров. Районы строек и многие искусственные сооружения в радарном изображении обычно проявляются как яркие пятна из-за влияния уголкового отражателя.

## МОРСКИЕ ЛЬДЫ

Хорошо различимы на РЛИ из-за различного рассеяния РЛ-излучения льдом и морской поверхностью. По радиояркостным характеристикам льдов можно определять возраст, структуру и условия образования. В сплошном ледяном покрове при помощи РСА можно выявлять различные деформации, возникающие из-за термодинамических процессов: трещины, полыньи, разводья, складчатость, торосы, а также следы ледоколов, не всегда видимые другими средствами дистанционного зондирования. Плавающий мелкобитый лёд часто является индикатором (трассером) течений (рисунок 73).



**Рисунок 73.** Мониторинг айсбергов в интересах безопасности судоходства КА Sentinel-1 Гренландия. Зелёным цветом отображается связанный лёд, розовым — айсберги [84]

## ВЕТРОВЫЕ АНОМАЛИИ И НЕОДНОРОДНОСТИ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Возникшие на поверхности моря пятна и полосы ряби, эффекты вылёживания, зоны и границы усиления ветра, внутренние волны в атмосфере, атмосферные фронты и конвективные ячейки различных типов также регистрируются РСА. Усиленная или пониженная интенсивность волн ряби может вызываться непосредственно ветром и поэтому на РЛИ часто наблюдается поле практически мгновенного, «замороженного» ветра в поле волнения. Ветровые неоднородности могут образовываться при локальном усилении или ослаблении ветра, резких его порывах из-за атмосферной турбулентности, конвекции, при обтекании препятствий. В таблице 15 перечислены возможности космических РСА по наблюдению явлений в океане.

Из всего вышесказанного понятно, что космический РСА можно эффективно использовать для наблюдения и исследования различных явлений и процессов в рыбопромысловых зонах океана, а также для слежения за положением

и движением рыболовных судов. Однако для наблюдения таких мезомасштабных явлений океана как течения, фронтальные зоны и апвеллинги необходима широкая полоса обзора (до 500 км) и разрешение от 20 до 100 м, причём наилучшие результаты дали бы комплексные космические системы, одновременно работающие в СВЧ-, ИК- и видимом диапазонах. Результаты эксперимента по комплексному применению информации ДЗЗ для исследования состояния морской поверхности приведено в книге [82].

**Таблица 15.** Принципиальные возможности спутниковых РСА

	ERS-1/2	Radarsat	Sentinel-1
Температура воды	–	–	–
Содержание хлорофилла	–	–	–
Береговая линия	+	+	+
Течения, уровень моря	+ /альтиметр	–	–
Вихри, ринги	+	+	+
Фронты (динамические)	+	+	+
Апвеллинг	+	+	+
Поверхностное волнение	+	+	+
Внутренние волны	+	+	+
Приводный ветер	+ /скаттерометр	–	–
Нефтяные загрязнения, плёнки ПАВ	+	+	+
Подводная топография на мелководье	+	+	+
Морской лёд	+	+	+
Корабли и их следы	+	+	+

## 5.7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЛЁНОСТИ МОРСКИХ ВОД

На сегодняшний день имеется очень небольшой объём информации относительно крупномасштабной изменчивости солёности на океанской поверхности. Около 30 % сетки, покрывающей глобальную морскую поверхность с минимальным элементом пространственного разрешения  $1 \times 1^\circ$ , не имеет хотя бы единственного наблюдения солёности. В то же время солёность является главным динамическим параметром, который влияет на океанские циркуляции, управляемые плотностью, особенно конвективное опрокидывание в Северной Атлантике. Влияние океана на глобальный гидрологический цикл столь огромно, что гидрологический бюджет не может быть сбалансирован без закрытия бюджета соли в океанском перемешанном слое. Поверхностная солёность накладывает очень сильное ограничение на параметризацию потоков воды и энергии в моделировании системы «океан – атмосфера».

Принципы, а также технические проблемы спутникового дистанционного зондирования СПО, использующие низкие микроволновые частоты (1...3 ГГц), разрабатывались в течение более чем двух десятилетий [96, 97]. Для оценки технических и научных возможностей дистанционного определения СПО в микроволновой полосе частот была даже организована специальная рабочая группа по солёности морского льда (Salinity of Sea Ice Working Group – SSIWG). С целью анализа потенциального научного вклада данных дистанционного зондирования солёности при ожидаемом пространственном разрешении и точ-



ности восстановления 7–8 февраля 1998 г. в Скриппском океанографическом институте (США, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, USA) было проведено её первое заседание, где были рассмотрены различные технические подходы и проблемы, а также определены вопросы, требующие дальнейшего изучения.

Создание такой рабочей группы было своевременным по ряду причин. Прежде всего, этому способствовали новые знания, полученные различными исследователями, относительно той важной роли, которую изменчивость поверхностной солёности играет в динамике океана и климата. Данное обстоятельство и определило возникновение настоящей необходимости увеличивать наблюдения за солёностью морской поверхности в рамках программ исследования климата. Данные предложения касались в первую очередь сбора данных контактных измерений.

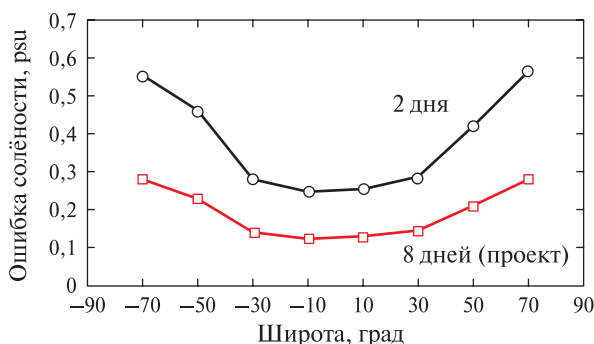
В апреле 1998 г. НАСА объявила запрос на создание спутниковой системы измерения СПО. Один из главных вопросов, возникших при этом, заключался в следующем. Возможен ли компромисс между техническими возможностями и научными требованиями, чтобы реализовать подобный проект в ближайшем будущем? Проведённое численное моделирование глобальных измерений ТПО и СПО, принимающее во внимание параметры датчиков и геофизических источников погрешности для конкретного спутникового датчика, показало, что возможно восстановление крупномасштабных измерений СПО в Мировом океане. Точность восстановления СПО при более высоком пространственном разрешении для различных периодов времени — основной предмет исследований, определяющих научный потенциал данных.

Научная основа подобного датчика — не праздный вопрос, поскольку те же самые микроволновые частоты (1...3 ГГц) используются для измерений влажности грунта [98]. Принципиальная разница состоит в том, что радиометрический сигнал в случае измерения влажности почвы гораздо сильнее, чем при измерениях СПО [99]. Ещё в 1996 г. были предложены две спутниковые системы для измерения влажности почвы, которые получили высокие оценки за научную проработку, но были забракованы по причине сложной технической реализации. Каждый из проектов рассматривал СПО как вторичную научную цель, отмечая при этом, что требования по точности измерения СПО существенно превышают возможности предлагаемых систем.

Современное рассмотрение предложений конкурирующих групп по созданию специализированного спутника привело к пониманию, что последние технологические новшества позволяют существенно снизить стоимость и улучшить точность дистанционных измерений солёности. Основное техническое препятствие для желаемого пространственного разрешения при работе в этой микроволновой полосе частот — очень большие геометрические размеры антенны. Поскольку размер элемента разрешения обратно пропорционален размеру апертуры антенны, то, в зависимости от высоты орбиты, 10–20-метровая апертура обеспечивает ~10-километровый размер элемента пространственного разрешения. Рассмотренные характеристики сегодня уже не являются уникальными, следовательно, подобные системы станут доступными в скором будущем. Таким образом, станет возможным объединение научных интересов дистанционных измерений геофизических параметров — влажность почвы, СПО и морской лёд, реализованных в единой спутниковой системе. Это, в свою очередь, позволит обеспечить глобальный мониторинг поверхностной гидрологии.

Современное состояние дистанционного зондирования СПО с самолёта иллюстрировалось J. Miller и D. LeVine [100, 101], представивших результаты самолётных измерений СПО в прибрежной зоне, в которых были надёжно детектированы изменения амплитуды в несколько единиц psu (practical salinity scale, практическая единица солёности, эквивалентная содержанию

1 г соли на 1 кг морской воды). Их сравнение с имеющимися данными контактных измерений подтвердило точность дистанционных измерений  $\sim 1$  psu. Моделирование работы радара и многоканального радиометра с конической развёрткой, учитывающее основные инструментальные и геофизические источники погрешностей для площади осреднения  $1 \times 1^\circ$  и 2-дневного глобального кадра, показало, что суммарная погрешность для каждых двух дней составляет приблизительно 0,2 psu в экваториальных областях. Точность ухудшается приблизительно до 0,6 psu в высоких широтах вследствие уменьшения сигнала из-за понижения температуры морских вод (рисунок 74, см. с. 151).



**Рисунок 74.** Моделирование ошибки восстановления солёности для радиометра L/S-диапазона и радара L-диапазона

Среднеквадратичная погрешность в пределах  $\pm 40^\circ$  широты меньше, чем 0,4 psu. Эти погрешности могли бы быть уменьшены примерно в два раза при 7–8-дневном или в четыре раза при ежемесячном осреднении. Таким образом, запроектированная точность восстановления СПО в тропиках может быть всего 0,05 psu для площади осреднения  $2 \times 2^\circ$  за месяц.

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СПО

### 1. Улучшение сезонных и межгодовых предсказаний климата.

Данная цель определяет эффективное использование данных СПО для уточнения связанных моделей прогноза климата, изучения и моделирования роли потока пресной воды в формировании и обеспечении состояния пограничных слоёв, а также теплосодержания перемешанного слоя в тропиках.

### 2. Улучшение оценок океанских ливней и глобальных гидрологических бюджетов.

Осадки над океаном всё ещё плохо изучены и зависят как от гидрологического бюджета, так и от скрытого нагрева вышележащей атмосферы. Учитывая поверхностную скорость и адекватное моделирование смешанного слоя, спутниковые наблюдения СПО обещают существенно сократить неопределённость в поверхностном пресноводном потоке на климатических масштабах времени.

### 3. Мониторинг крупномасштабных географических явлений, проявляющихся в солёности.

Явления включают таяние льда, выносы крупных рек и муссоны. В частности, наблюдения межгодовых вариаций СПО в скандинавских морях весьма актуальны для долгосрочных предсказаний и моделирования климата. Вариации СПО в высоких широтах влияют на скорость океанской конвекции и перенос

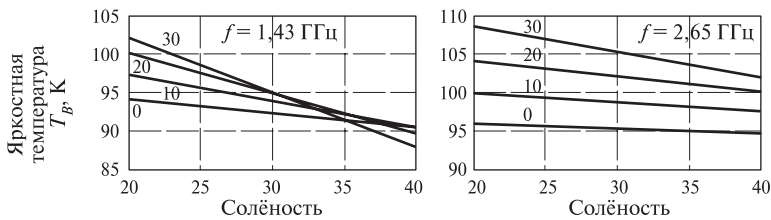
тепла к полюсам. Измерения СПО в высоких широтах технически наиболее сложны из-за ухудшения точности измерений и ослабления сигнала вследствие низкой температуры моря. В общем случае сигналы солёности намного сильнее в прибрежных океанских и внутренних морях, чем в открытом океане, но большой размер элемента разрешения ( $\sim 10\text{--}40$  км) будет ограничивать использование таких данных на шельфе. Однако многие из больших пограничных с материками морей, таких как Восточно-Китайское море, Бенгальский залив, Мексиканский залив и Коралловое море/залив Папуа, имеющих сильные сигналы СПО, вполне могли бы быть адекватно наблюдаемы из космоса.

Технические аспекты дистанционного измерения СПО — вышеупомянутые научные требования близки к технически достижимым пределам, но представляются вполне реализуемыми. Основные ограничения диктуются принципами дистанционного измерения солёности. Соотношение между радиометрической яркостной температурой ( $T_y$ ) и ТПО определяется коэффициентом излучения, который, в свою очередь, частично зависит от удельной электропроводности морской воды и, следовательно, от солёности. Данный эффект достаточно велик на частотах  $1\text{--}3$  ГГц, что и позволяет восстанавливать СПО. При этом между СПО и  $T_y$  существует почти линейное соотношение, в то время как остальные влияющие факторы сохраняются практически постоянными, так что итоговое уравнение может быть записано следующим образом:

$$\text{СПО} = A(\text{ТПО}, f, \sigma, p)T_y, \quad (38)$$

для заданной ТПО, частоты  $f$ , угла падения  $\sigma$  и состояния поляризации  $p = \text{H}$  или  $\text{V}$ .

На рисунке 75 представлены случаи для  $f = 1,43$  и  $2,65$  ГГц,  $\sigma = 0$  и при двух поляризациях  $\text{H}$  или  $\text{V}$  (при нулевом угле падения). Видно, что на частоте  $1,43$  ГГц сигнал более сильный и, следовательно, она может быть выбрана в качестве основного канала при измерении СПО. Множитель  $A$  изменяется от  $1,5\text{--}2,0$  в умеренных широтах и тропиках до  $3\text{--}4$  в полярных областях.



**Рисунок 75.** Зависимость изменения яркостной температуры от солёности на частотах  $1,4$  и  $2,65$  ГГц при измерениях в надир для разных значений ТПО

Таким образом, неопределённость  $0,1$  К в  $T_y$  приводит к погрешности восстановления СПО  $0,15\text{--}0,2$  psu в средних и низких широтах и  $0,3\text{--}0,4$  psu в высоких широтах. Инструментальная погрешность и поправки на влияние окружающей среды должны быть на уровне  $0,1$  К или меньше, однако данные наиболее высокого пространственного разрешения останутся сильно зашумленными. Также требует проверки сделанное неоднократно выше предположение, что остаточные погрешности будут некоррелированы, и что низкочастотные особенности не будут искажены. Чтобы разрешать большие масштабы и более низкие частоты изменчивости СПО, надо полагаться на пространственно-временное усреднение, EOF-фильтрацию и т. д.

Для реализации метода дистанционного измерения солёности оценивались три концепции спутниковых сканирующих систем, использующих раз-



ные типы антенных устройств. Каждая концепция обеспечивает примерно одинаковую радиометрическую точность и стабильность калибровки, но они различаются по пространственному решению, геометрии сканирования, вспомогательным каналам и поляризации. Данные обстоятельства обусловили невозможность сравнения точности восстановления СПО, измеренных с их помощью, без дальнейшего моделирования каждого конкретного типа.

В результате проведённого анализа были идентифицированы следующие ключевые источники погрешности:

*ТПО:* Для коррекции требуется использование либо вспомогательных данных, либо несколько каналов радиометра, обеспечивающих одновременное измерение СПО и ТПО.

*Шероховатость поверхности и пена (напряжение от ветровой нагрузки).* Данные характеристики плохо изучены и требуют дальнейших экспериментальных исследований. Ожидаемое воздействие может составлять  $\sim 0,1$  К на каждый метр в секунду скорости ветра. Для коррекции потребуются вспомогательные измерения ветра или шероховатости морской поверхности, либо использование нескольких радиометрических и радиолокационных каналов для одновременного измерения СПО и шероховатости.

*Ионосферное вращение Фарадея.* Данный эффект влияет на вектор поляризации и сильнее проявляется на низких частотах. Он может быть смягчён выбором орбиты спутника, избегающей солнечного полудня, когда эффект максимален, и проведением измерений в двух поляризациях: вертикальной и горизонтальной, а также измерением третьего параметра Стокса.

*Воздействие ливня.* Влияние данного фактора обычно мало, но может быть значительным во время проливного дождя. Воздействие ( $K$ ) —  $\sim 0,1RH$ , где  $R$  — скорость дождя (в мм/ч);  $H$  — глубина слоя дождя (в км), например,  $K \approx 0,1$  К для  $R = 10$  мм/ч,  $H = 1$  км. Из-за важности восстановления СПО в тропических зонах осадков коррекция этого эффекта обязательна. Просто фильтрации и блокировки данных, содержащих дождевое проявление, в данном случае недостаточно.

К менее значимым эффектам, требующим коррекции, относятся:

*Атмосферный пар и облака.* Они почти неразличимы на рассматриваемых частотах за исключением случаев дождя (см. выше).

*Атмосферное поглощение.* Создаёт практически постоянный сдвиг с незначительными вариациями, которые могут быть исправлены данными давления на уровне моря.

Основные эффекты, которые должны быть маскированы и отвергнуты:

*Вспышки на Солнце.* Эффект будет смягчён выбором орбиты, избегающей высоких углов Солнца.

*Галактический шум.* Для маскирования таких данных можно использовать карты неба, чтобы пометить, где основное галактическое излучение, отражённое от морской поверхности, попадёт в поле зрения радиометра.

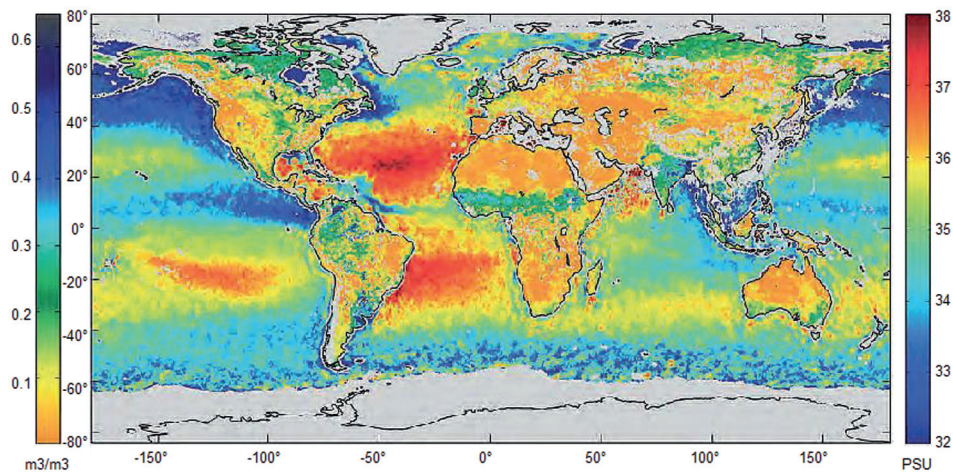
*Радиоинтерференция.* Необходимо провести измерения на частоте 1,413 ГГц, соответствующей водородной полосе поглощения, зарезервированной для радиоастрономии. Правда, даже в этом случае можно столкнуться с некоторыми изолированными шумами.

## КОСМИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛЁНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

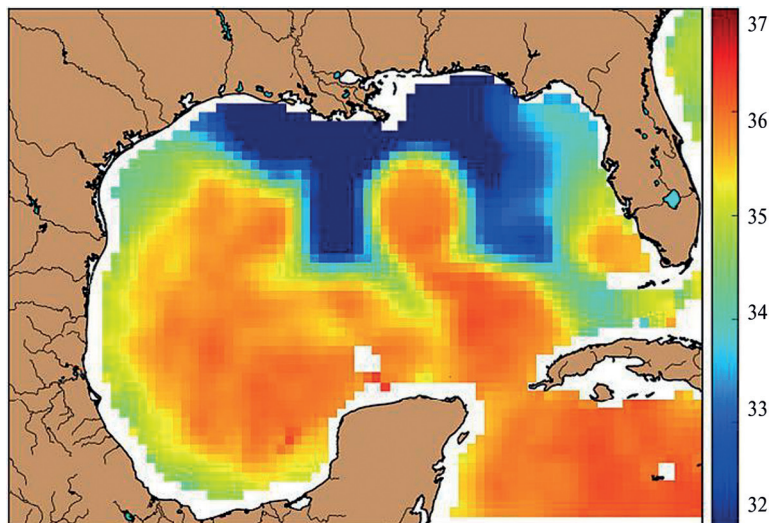
Приведённые выше теоретические основы методов дистанционного определения СПО, бесспорно, несколько упрощены, поскольку основная цель текущего раздела — дать общее представление о базовых принципах, применяемых

при дистанционном зондировании СПО. Даже с учётом текущего развития технологий дистанционное восстановление этого параметра является достаточно сложной научной проблемой.

Тем не менее, начиная с 2009 г., с запуском КА SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity), появилась возможность дистанционного зондирования СПО и влажности подстилающей поверхности. КА функционирует на солнечно-синхронной орбите высотой 755 км, наклоном 98,44° и периодом обращения 100 мин [82]. На борту установлен микроволновый радиометр L-диапазона MIRAS (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis). Прибор измеряет радиояркостную температуру в диапазоне углов 0...55°, имеет полосу обзора 900 км и пространственное разрешение 30...50 км. Распределение СПО и влажности подстилающей поверхности представлено на рисунке 76.



**Рисунок 76.** Глобальное распределение СПО и влажности подстилающей поверхности КА SMOS (MIRAS) [82, 102]



**Рисунок 77.** Распределение СПО (в pss) в Мексиканском заливе во время наводнения в Техасе, КА SMAP, август 2015 г. [82, 104]

В 2015 г. на солнечно-синхронную орбиту с высотой 695 км, наклонением  $98^\circ$  и периодом обращения 98,5 мин был запущен космический аппарат SMAP (Soil Moisture Active Passive). Концепция работы SMAP состоит в использовании микроволнового радиометра L-диапазона который регистрирует радиояркостную температуру в диапазоне 1,26...1,43 ГГц, но в отличие от MIRAS имеет фиксированный угол обзора —  $40^\circ$ . При этом стандартное отклонение измерений радиояркостной температуры не превышает 4 К [82, 103]. Пространственное разрешение составляет около 40 км.

КА SMAP, как следует из его названия, в первую очередь предназначен для мониторинга влажности подстилающей поверхности. Однако информацию этого КА можно использовать и для мониторинга СПО (рисунок 77, см. с. 154).

## 5.8 СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ

В соответствии с работами [105–107] методы спутниковой радиотомографии ионосферы с передатчиков, устанавливаемых на КА, разделяют на статистические и детерминированные. Класс детерминированных обратных задач применяется в случае необходимости восстановления группы неоднородностей или отдельных, но крупных вариаций концентрации заряженных частиц. В том случае если достаточно большое количество относительно мелкомасштабных неоднородностей занимает значительную часть исследуемого пространства, реконструировать структуру отдельную структуру непрерывно меняющихся неоднородностей практически нецелесообразно. В этом случае необходимо рассматривать задачу реконструкции структуры статистических характеристик неоднородностей: например, функцию корреляции плотности электронной концентрации и др.

Для решения детерминированных обратных задач используется либо лучевая, либо дифракционная томография [108]. Технология лучевой радиотомографии использует ряд приёмников вдоль траектории пролёта спутника, расположенных на расстояниях порядка сотен километров таким образом, чтобы геометрические пути лучей визирования спутник – приёмник имели минимальную высоту пересечения, соответствующую нижней границе ионосферы [105–108].

Задача дифракционной радиотомографии предполагает поперечное направлению движения спутника размещение линейки приёмных устройств. Характерное расстояние между устройствами приёма спутникового сигнала в линейке составляет не менее 1 км. При решении задач статистической радиотомографии применяются различные конфигурации приёмных устройств: как несколькими приёмниками, расположенными вдоль трассы космического аппарата, так и в перпендикулярном направлении [105–108].

Основная задача лучевой томографии ионосферы состоит в восстановлении структуры верхнего слоя атмосферы с учётом знания интегральных показателей электронной концентрации на пути визирования спутник – приёмник. Поскольку используется несколько приёмных устройств, непрерывно принимающих сигнал космического аппарата, происходит непрерывный обзор области исследования под разными углами или ракурсами.

Поскольку размеры крупных ионосферных неоднородностей естественного (типа ионосферного провала) или искусственного происхождения (следы космических аппаратов, технологические выбросы) составляют от десятков до тысяч километров, то учётом дифракционных эффектов при использовании сигналов УКВ-диапазона при спутниковом зондировании можно пренебречь.

Теоретической основой лучевой РТ являются известные соотношения [105–108] для фаз и амплитуд радиоволн в приближении геометрической оптики. Следующая пара равенств определяет линейные интегралы от распределений электронной концентрации  $N$  и эффективной частоты соударений  $\nu$ :

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \lambda r_e \int N \, d\sigma, \\ \chi &= -\frac{\lambda r_e}{\omega} \int N \nu \, d\sigma, \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

где  $\lambda$  — длина зондирующей волны;  $r_e$  — классический радиус электрона,  $w = kc$ ;  $k$  — волновое число в свободном пространстве;  $c$  — скорость света,  $\int d\sigma$  — символ интегрирования по пути распространения сигналов. Линейными интегралами здесь являются разность фаз  $\varphi = \Phi_0 - \Phi$  и уровень  $\chi$  — логарифм соотношения амплитуд сигналов  $\chi = \ln(A/A_0)$  измеряемого поля ( $E = A_0 \cdot \exp(i\Phi)$ ) и поля зондирующей волны ( $E = A_0 \cdot \exp(i\Phi_0)$ ).

В результате проведённой серии измерений (КА движется по орбите, линейка приёмников принимает и обрабатывает спутниковый сигнал) полной электронной концентрации ионосферы можно получить набор данных, на основании которых строится система линейная уравнений с учётом соотношений (39).

Математическая постановка задачи подразумевает решение полученной системы линейных уравнений (СЛУ)  $Ax = b$ , где  $A$  — матрица проекционного оператора;  $b$  — вектор измеренных значений и  $x$  — вектор восстанавливаемых значений электронной концентрации [105–108].

Проекционный оператор строится путём дискретизации значений функции, зависящей от геометрии распространения радиосигнала на заданной сетке в исследуемой области. Для построения проекционного оператора могут быть использованы различные аппроксимационные функции: кусочно-постоянная, кусочно-планарная, билинейная, кубическая и др. [105–108].

Поскольку СЛУ, полученная в результате проведённой серии измерений, будет переопределённой (количество измерений больше количества неизвестных), то фактически можно говорить об отсутствии решения подобной системы или о существовании бесконечного множества возможных решений, удовлетворяющих нашей системе. Таким образом, для решения СЛУ в задаче радиотомографии ионосферы применяются различные методы, учитывающие физические ограничения решаемой задачи, которые могут задаваться соответствующим начальными приближениями [108].

Наиболее часто для решения подобных СЛУ используются различные итерационные алгоритмы: ART (Algebraic Reconstruction Technique) и MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) [105–108]. Может применяться байесовский подход, основанный на процедуре стохастического обращения. Реже применяется алгоритм SVD (Singular Value Decomposition) [107].

Лучевую радиотомографию подразделяют на фазовую и фазоразностную. В фазовом методе измеряется линейный интеграл вида (39), умноженный на константу порядка единицы [105–108], которая связана с пересчётом фазы с одной частоты на другую. Основа возникающих трудностей по определению этого интеграла состоит в том, что сама по себе величина фазы весьма велика. Для характерных значений электронной концентрации  $N \approx 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $\lambda = 2 \text{ м}$ , и длины луча  $\varphi$  в ионосфере порядка тысячи километров составляет тысячи радиан. Отсюда возникает проблема выделения начальной фазы, остающейся постоянной в течение сеанса радиопросвечивания  $\varphi_0 = 2\pi l$ , которую нужно прибавить к измеряемой  $\Delta\varphi$  (в пределах  $2\pi$ ) и получить абсолютную (полную) фазу  $\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi$  или линейный интеграл (39) [109].



В работах [107, 110, 111] показано, что ошибка в определении неизвестной начальной фазы может составлять от 100 до 1000 %, следовательно, применять метод фазовой томографии при реализации подобного механизма исследования ионосферы нельзя просто потому, что ошибки при восстановлении распределения заряженных частиц будут слишком велики.

Для решения проблемы неизвестной начальной фазы авторами работы [105] был предложен метод фазоразностной томографии, суть которого состоит в использовании в качестве интегральной характеристики производной фазы  $df/dt$  (которая, с учётом дифференцирования, не содержит неизвестную константу, соответствующую начальной фазе сигнала).

В отличие от фазовой томографии, где интегральной величиной является полная фаза, фазоразностный метод является более чувствительным к относительно малым неоднородностям электронной концентрации, которые вносят незначительный вклад в фазу, и более существенный — в её производную. В реконструкциях поля электронной концентрации, выполненных с использованием метода фазовой томографии, не проявляются детали размером менее нескольких сотен километров, в то время как фазоразностная томография позволяет хорошо восстанавливать структуры размером 100 км и величиной электронной концентрации 4...6 % от концентрации максимума [105–108].

Фазоразностный метод используется для двухчастотных измерений (150 и 400 МГц), при которых прямыми методами невозможно определить абсолютное ПЭС (полное электронное содержание) в силу необходимости разрешения фазовой неопределённости (неизвестного числа полных циклов фазы). Использование данного метода позволяет хорошо восстанавливать флуктуации электронной концентрации слоя максимума ионосферы, тогда как фоновое значение электронной концентрации может быть восстановлено только с существенной ошибкой [105–108].

Подобные сигналы излучали навигационные системы первого поколения, а также метеорологические космические системы, предназначенные для исследования геофизических характеристик атмосферы и ионосферы, например, Formosat-3/COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) или её современные генерации.

Метод фазовой томографии позволяет восстанавливать распределение электронной концентрации на основе данных об абсолютном ПЭС. К сожалению, в настоящее время не существует передатчиков когерентных сигналов, анализ характеристик которых мог бы привести к определению абсолютного ПЭС с достаточной точностью [105–108]. Тем не менее, существуют определённые механизмы, позволяющие получать информацию об абсолютном ПЭС на основе анализа измерений глобальных навигационных спутниковых систем [105–108].

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИЗ МНОГОЧАСТОТНЫХ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Материал, изложенный в текущем разделе, построен на основе монографии [108].

Полное электронное содержание на пути распространения сигнала при использовании многочастотных передатчиков определяется вариациями характеристик зондирующей волны, а именно: разностью фаз между когерентными и достаточно широко разнесёнными по частоте сигналами, по относительной групповой задержке сигналов различных частот, а также изменением поляризации прошедших через ионизирующий слой волн (эффект Фарадея).

Теоретические основы методов восстановления ПЭС за счёт определения групповых задержек, а также эффекта Фарадея, подробно изложены в работе [112]. Кроме того, существуют определённые трудности при определении ПЭС вышеуказанными методами, так, при восстановлении ПЭС с учётом эффекта Фарадея возникает проблема определения полного значения угла вращения плоскости поляризации, поскольку он может измениться на величину более чем  $2\pi$  рад.

Собственно, при определении разности фаз регистрируемых сигналов возникает схожая проблема. Однако в дальнейшем будет показано, как при использовании комбинаций многочастотных измерений проблема необходимости учёта фазовой неоднозначности может быть решена.

Изменение фазы радиосигнала, прошедшего через ионосферу, определяется следующим соотношением:

$$P = \left( S - \int \frac{eN}{f^2} ds \right) \frac{f}{c}, \quad (40)$$

где  $S$  — геометрический путь, пройденный лучом;  $\epsilon = 40,3$ ;  $f$  — частота несущей сигнала;  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света;  $ds$  — элемент пути луча;  $\int N ds$  — полное электронное содержание.

Разность фаз для сигналов частот несущих  $f_a$  и  $f_b$  имеет вид:

$$\Delta P_{ab} = P_a - P_b = \frac{f_a}{f_b} \frac{(f_b - f_a)(f_b + f_a)\epsilon}{cf_b f_a} \int N ds. \quad (41)$$

Разность фаз регистрируется приёмным устройством с учётом неоднозначности, равной целому числу полных циклов изменения фазы, кратным  $2\pi$ .

Предположим, что реализована трёхчастотная схема измерений, причём соседние частоты отличаются в  $n_2/n_1$  раз, где  $n_2$  и  $n_1$  целые. Тогда частоты, выраженные через основную частоту  $f_0$ , будут иметь следующий вид:  $f_1 = n_1^2 f_0$ ,  $f_2 = n_1 n_2 f_0$ ,  $f_3 = n_2^2 f_0$ .

Следовательно, выражение для разности фаз можно переписать:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{12} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\epsilon}{n_1^3 n_2^2 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{13} &= \frac{(n_2^4 - n_1^4)\epsilon}{n_1^3 n_2^4 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{14} &= \frac{(n_2^6 - n_1^6)\epsilon}{n_1^3 n_2^6 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{23} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\epsilon}{n_1^2 n_2^3 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{24} &= \frac{(n_2^4 - n_1^4)\epsilon}{n_1^2 n_2^5 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{34} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\epsilon}{n_1 n_2^4 c f_0} \int N ds. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$



Поскольку фаза сигнала известна с точностью до некоторой постоянной величины, разность фаз может быть представлена в виде неизвестной целой и некоторой измеряемой части

$$\Delta P_{ab} = K_{ab} + \Delta \Phi_{ab}. \quad (43)$$

Для определения целой части используются методы разрешения фазовой неоднозначности. В случае схемы с двухчастотными измерениями неоднозначность ПЭС соответствует целому числу полных циклов измеряемой фазы сигнала. В случае использования трёхчастотной схемы, величины неоднозначностей будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \Delta_{12} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} = 7,44 \cdot 10^6 \cdot f_0 \frac{n_1^3 n_2^2}{(n_2^2 - n_1^2)} m^{-2}, \\ \Delta_{13} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) \varepsilon} = 7,44 \cdot 10^6 \cdot f_0 \frac{n_1^3 n_2^4}{(n_2^4 - n_1^4)} m^{-2}, \\ \Delta_{14} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^6 c f_0}{(n_2^6 - n_1^6) \varepsilon} = 7,44 \cdot 10^6 \cdot f_0 \frac{n_1^3 n_2^6}{(n_2^6 - n_1^6)} m^{-2}, \\ \Delta_{23} \int N ds &= \frac{n_1^2 n_2^3 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} = 7,44 \cdot 10^6 \cdot f_0 \frac{n_1^2 n_2^3}{(n_2^2 - n_1^2)} m^{-2}, \\ \Delta_{24} \int N ds &= \frac{n_1^2 n_2^5 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) \varepsilon} = 7,44 \cdot 10^6 \cdot f_0 \frac{n_1^2 n_2^5}{(n_2^4 - n_1^4)} m^{-2}, \\ \Delta_{34} \int N ds &= \frac{n_1 n_2^4 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} = 7,44 \cdot 10^6 \cdot f_0 \frac{n_1 n_2^4}{(n_2^2 - n_1^2)} m^{-2}. \end{aligned} \quad (44)$$

Очевидно, что измерения ПЭС на всех трёх частотах проводятся одновременно, поэтому ПЭС для этих трёх измерений должно быть одинаковое. Следовательно, справедливо следующее выражение:

$$\frac{\Delta P_{12}}{n_2^2} = \frac{\Delta P_{13}}{n_1^2 + n_2^2} = \frac{\Delta P_{23}}{n_1 n_2}. \quad (45)$$

Соотношение, определяющее неоднозначность определения ПЭС при использовании трёх частот, выражается следующим соотношением:

$$\Delta_{123} \int N ds = \frac{n_1^2 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) e} n_2^2 = 7,44 \cdot 10^6 \cdot f_0 \frac{n_1^2 n_2^4}{(n_2^2 - n_1^2)} m^{-2}. \quad (46)$$

Анализ выражений (45, 46) показывает, что величина неоднозначности трёхчастотных измерений в  $n_1 n_2$  раз больше, чем максимальная двухчастотная неоднозначность (42). Это утверждение будет выполняться только при известных сдвигах задержки фазы для каждой частоты в силу особенностей приёмно-го тракта устройства.

Для устранения неоднозначность значения ПЭС в уравнении (45) необходимо решить это уравнение в целых числах:

$$\Delta P_{12} (n_1^2 + n_2^2) = \Delta P_{13} n_2^2, \quad (47a)$$

$$(K_{12} + \Delta \Phi_{12}) (n_1^2 + n_2^2) = (K_{13} + \Delta \Phi_{13}) n_2^2, \quad (47b)$$

$$K_{12}(n_1^2 + n_2^2) - K_{13}n_2^2 = \Delta\varphi_{13}n_2^2 - \Delta\varphi_{12}(n_1^2 + n_2^2), \quad (47в)$$

здесь  $\Delta\varphi_{12}$  и  $\Delta\varphi_{13}$  — измеренные части фазы;  $K_{12}$  и  $K_{13}$  — неизвестные целые величины — число целых циклов набега фазы. Правая часть уравнения (47в) должна быть целой, так как левая часть — целая.

Задача решения уравнений (47а)—(47в) сводится к нахождению наименьшего общего знаменателя:

$$x_{12}(n_1^2 + n_2^2) - x_{13}n_2^2 = 1, \quad (48)$$

$$K_{12} = [\Delta\varphi_{13}n_2^2 - \Delta\varphi_{12}(n_1^2 + n_2^2)]x_{12} + kn_2^2, \quad (49а)$$

$$K_{13} = [\Delta\varphi_{13}n_2^2 - \Delta\varphi_{12}(n_1^2 + n_2^2)]x_{13} + k(n_1^2 + n_2^2), \quad (49б)$$

где  $k$  — целое.

Запишем значения абсолютных фаз с учётом уравнений (49):

$$\Delta P_{12} = K_{12} + \Delta f_{12} = [\Delta\varphi_{13}n_2^2 - \Delta\varphi_{12}(n_1^2 + n_2^2)]x_{12} + kn_2^2 + \Delta\varphi_{12}, \quad (50а)$$

$$\Delta P_{13} = K_{13} + \Delta f_{13} = [\Delta\varphi_{13}n_2^2 - \Delta\varphi_{12}(n_1^2 + n_2^2)]x_{13} + k(n_1^2 + n_2^2) + \Delta\varphi_{13}. \quad (50б)$$

Тогда значения восстановленного ПЭС могут быть записаны как:

$$\begin{aligned} \int N ds &= \Delta P_{12} \frac{n_1^2 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) e} = \\ &= \frac{n_1^2 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) e} \left\{ [\Delta\varphi_{13}n_2^2 - \Delta\varphi_{12}(n_1^2 + n_2^2)]x_{12} + \Delta\varphi_{12} \right\} + \frac{kn_1^2 n_2^4}{(n_1^2 - n_2^2)}, \end{aligned} \quad (51а)$$

$$\begin{aligned} \int N ds &= \Delta P_{13} \frac{n_1^4 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) e} = \\ &= \frac{n_1^4 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) e} \left\{ [\Delta\varphi_{13}n_2^2 - \Delta\varphi_{12}(n_1^2 + n_2^2)]x_{13} + \Delta\varphi_{13} \right\} + \frac{kn_1^2 n_2^4}{(n_1^2 - n_2^2)}. \end{aligned} \quad (51б)$$

С учётом уравнения (48) упрощаем выражения (51):

$$\int N ds = \frac{n_1^2 n_2^4 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) e} [(\Delta\varphi_{13}x_{12} - \Delta\varphi_{12}x_{13}) + k], \quad (52)$$

здесь  $k$  — произвольное целое число. Значения  $x_{12}$  и  $x_{13}$  находятся из уравнения (47) при известных значениях  $n_1$  и  $n_2$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИЗ МНОГОЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Приведённые выше соотношения могут быть успешно обобщены для случая произвольного числа используемых когерентных частот. Пусть используется  $(k+1)$  частота, причём

$$f_{i+1} = \frac{n_2}{n_1} f_i, \quad (53)$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= n_1^k f_0, \\ f_2 &= n_1^{k-1} n_2^k f_0, \\ \dots \\ f_{l+1} &= n_1^{k-l} n_2^l f_0, \\ \dots \\ f_{k+1} &= n_1^{k-1} n_2^k f_0. \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

Из выражения (54):

$$\Delta P_{l(l+1)} = \frac{(n_2^{2l} - n_1^{2l})e}{n_1^k n_2^{2l} c f_0} \int N ds, \quad (55a)$$

$$\Delta P_{l(k+1)} = \frac{(n_2^{2k} - n_1^{2lk})e}{n_1^k n_2^{2k} c f_0} \int N ds. \quad (55b)$$

Составим пропорцию для  $\Delta P_{l(l+1)}$  и  $\Delta P_{l(k+1)}$ :

$$\frac{e}{c f_0} \int N ds = \frac{\Delta P_{l(l+1)}}{(n_2^{2l} - n_1^{2l})/n_1^k n_2^{2l}} = \frac{\Delta P_{l(k+1)}}{(n_2^{2k} - n_1^{2lk})/n_1^k n_2^{2k}}. \quad (56)$$

С учётом приведённых выше выражений, трёхчастотная неоднозначность определения ПЭС при использовании максимальной, минимальной и одной из промежуточных частот имеет следующий вид:

$$\Delta_{l(l+1)(k+1)} \int N ds \frac{n_1^{2l} n_2^{2k} c f_0}{(n_2^{2l} - n_1^{2l})\varepsilon} n_2^{2k-2l} = 7,44 \cdot 10^6 f_0 \frac{n_1^{2l} n_2^k}{(n_2^{2l} - n_1^{2l})} n_2^{2k-2l} m^{-2}. \quad (57)$$

Оценим величину фазовой неоднозначности для различных существующих спутниковых систем восстановления параметров ионосферы. Для передатчиков низкоорбитальных навигационных систем первого поколения (150/400 МГц), которые использовались для проведения томографических экспериментов, приняты значения  $n_1 = 3$  и  $n_2 = 8$ ; значения  $f_0$  находятся вблизи 16,666 МГц.

Из формул (44) имеем:

$$\Delta_{12} = \frac{55}{576} \cdot \frac{\varepsilon}{c f_0} \int N ds = 7,96 \cdot 10^{-16} \int N ds. \quad (58)$$

Величина двухчастотной неоднозначности из равенства (19) будет иметь значение около 0,1 TECU.

Для спутниковых передатчиков ГЛОНАСС  $n_1 = 7$  и  $n_2 = 9$ ; значение  $f_0$  составляет 25,4286 МГц.

В соответствии с выражениями (44), величина неоднозначности будет иметь значение около 0,004 TECU.

Для передатчика CERTO (Coherent Electromagnetic Radio Tomography) КА Formosat-3/COSMIC:

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= 16,668 \text{ МГц}, \\ f_1 &= 9f_0 = 150,012 \text{ МГц}, \\ f_2 &= 24f_0 = 400,032 \text{ МГц}, \\ f_3 &= 64f_0 = 1066,752 \text{ МГц}. \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

Тогда, соотношения (44) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{12} &= \frac{55}{576} \cdot \frac{\varepsilon}{cf_0} \int N ds = 7,96 \cdot 10^{-16} \int N ds, \\ \Delta_{13} &= \frac{4015}{368646} \cdot \frac{\varepsilon}{cf_0} \int N ds = 8,82 \cdot 10^{-16} \int N ds, \\ \Delta_{23} &= \frac{55}{1536} \cdot \frac{\varepsilon}{cf_0} \int N ds = 2,56 \cdot 10^{-16} \int N ds. \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

Величины двухчастотных неоднозначностей (60) примут значения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{12} \int N ds &= 1,2995 \cdot 10^{15} m^{-2} \approx 0,1 \text{ TECU}, \\ \Delta_{13} \int N ds &= 1,1392 \cdot 10^{15} m^{-2} \approx 0,1 \text{ TECU}, \\ \Delta_{23} \int N ds &= 3,4652 \cdot 10^{15} m^{-2} \approx 0,3 \text{ TECU}. \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

И, наконец, трёхчастотная неоднозначность будет равна:

$$\Delta_{123} \int N ds = 8,3165 \cdot 10^{16} m^{-2} \approx 8,3 \text{ TECU}. \quad (62)$$

Следовательно, фазовая неоднозначность, получаемая из трёхчастотных измерений, в 64 раза больше, чем при измерениях на двух частотах: 150 и 400 МГц.

Уравнение (49) необходимо решить для перевода фазовых разностей в ПЭС:  $x_{12}73 - x_{13}64 = 1$ , имеем  $x_{12} = -7$ ,  $x_{13} = -8$ . Следовательно, выражение (52) примет следующий вид:

$$\int N ds = 8,3165 \cdot 10^{16} [(-\Delta\varphi_{13}7 + \Delta\varphi_{12}8)_{\text{mod}1} + k]. \quad (63)$$

При использовании трёхчастотного метода точность определения ПЭС будет в  $\sqrt{x_{12}^2 + x_{13}^2}$  хуже точности двухчастотных. Иными словами использование частот 150, 400 и 1067 МГц (передатчик CERTO Formosat-3/COSMIC) позволяет определить ПЭС примерно в 10 раз менее точно, чем при радиопросвечивании ионосферы частотами 150 и 400 МГц. Если точность измерения разности фаз сигналов составит около  $6^\circ$ , то точность определения ПЭС для 1-й и 3-й, а также 1-й и 2-й пар частот будет около 0,002 TECU, и, точность определения ПЭС для трёхчастотного метода составит порядка 0,02 TECU. Однако с учётом того, что значение фазовой неоднозначности составит 8,3 TECU при использовании априорной информации, можно определить фазовую неоднозначность и перейти к фазовым методам восстановления распределения электронной концентрации, что существенно повысит точность реконструкции в целом.

Рассмотрим ещё один случай зондирующей системы. Следующим шагом в ряду частот 150, 400, 1067 МГц будет:

$$f_4 = \frac{n_2}{n_1} f_3 = \frac{8}{3} \times 1066,66 \text{ МГц} = 2844,44 \text{ МГц}.$$

Рассмотрим трёхчастотный сигнал: 150/400/2844 МГц. Тогда  $k = 3$ , из равенств (54) следует, что  $f_0 = 5,556 \text{ МГц}$ , и тогда величина неоднозначности из выражения (57) будет составлять 1418 TECU.

Подобное значение неоднозначности позволяет перейти к абсолютным значениям ПЭС без использования дополнительной информации. Следовательно, при использовании подобных частотных схем зондирования можно

будет существенно упростить алгоритмы, используемые при решении задачи томографии ионосферы, а также повысить точность реконструкции вертикального распределения электронной концентрации в ионосфере.

## ТЕХНОЛОГИЯ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ВЫСОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ

С учётом развития информационных и сетевых технологий, а также повышения общего уровня компьютерной техники появилась возможность реализовать полностью замкнутую и законченную информационную технологию [108]. В этом разделе обсуждаются все аспекты обработки информации в рамках автоматизированной технологии реконструкции вертикального распределения электронной концентрации ионосферы на основе метода фазоразностной томографии.

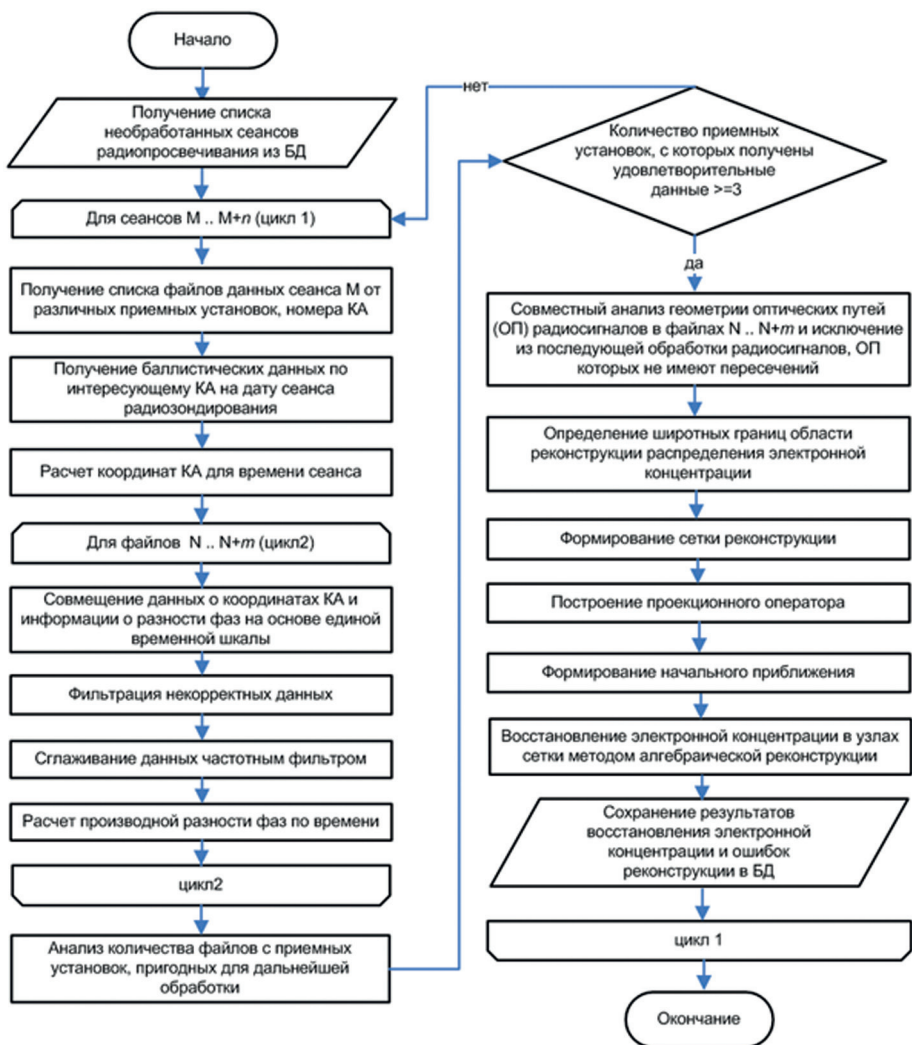


Рисунок 78. Методика автоматизированной обработки данных радиопросвечивания ионосферы

Технология автоматизированной обработки данных фазоразностной радиотомографии ионосферы базируется на методике, общее описание которой можно представлено на рисунке 78. Алгоритмы, задействованные в методике, имеют линейную структуру, осложнённую вложенными циклами. Логическим элементом здесь является сеанс радиопросвечивания, который может состоять из трёх и более файлов данных с приёмных установок томографической цепочки. Ввод и вывод данных из процесса обработки подразумевает наличие интерфейса к хранилищу данных, обозначенного на рисунке 78 (см. с. 163) как база данных (БД) [108].

Подробное описание технологии представлено в работе [108]. Ниже приведём тезисное объяснение каждого из элементов технологического цикла.

### Выделение полезного сигнала

Первичными данными для задачи томографии являются значения приведённой фазы, которые представляют разность фаз двух когерентных сигналов на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , приведённых к частоте  $f_1$  (в случае использования низкоорбитальных навигационных космических аппаратов (ННКА)  $f_1 = 150$  МГц — зондирующий сигнал,  $f_2 = 400$  МГц — опорный сигнал). Принятые сигналы записываются программным обеспечением приёмной установки в виде квадратурных компонент сигналов [113]. Методика преобразования квадратурных компонент в значения амплитуды и фазы сигнала приводится в работах [105–108]. В результате этого преобразования получаются ряды значений фазы и амплитуды сигнала (приведённых) с частотой дискретизации 50 Гц.

Сигнал, принимаемый со спутника, записывается в файл. Поскольку приёмное оборудование включается и начинает записывать сигнал с небольшим запасом по времени, возникает задача выделения полезной составляющей из всего сеанса связи с КА.

Для выбора информации, соответствующей полезному сигналу, из данных радиопросвечивания используются следующие условия: дисперсия в скользящем окне не должна превышать 1; длительность непрерывного ряда должна быть не менее 60 с.

### Определение формальных критериев для совмещения данных одного сеанса, полученных на различных приёмных установках

Процесс томографической реконструкции подразумевает одновременную обработку данных радиопросвечивания ионосферы, полученных на сети приёмных установок за время пролёта одного ИСЗ [114, 115]. Таким образом, для того чтобы начать тематическую обработку данных необходимо иметь уверенность, что отобранные для обработки данные с различных приёмных установок представляют собой результаты радиосеанса с одним и тем же ИСЗ в одно и то же время.

Указанная задача решается как на программном уровне технологии, так и на аппаратном. Аппаратный уровень подразумевает разработку приёмного оборудования таким образом, чтобы в заданное время принимался только указанный в расписании ИСЗ. Программный уровень реализуется при помощи соответствующих ограничений, накладываемых в рамках разработанных алгоритмов в части контроля времени проведённых сеансов с регистрацией и отслеживанием точного времени их начала для всех приёмных установок в цепочке.



## Процедура координатно-временной привязки данных

Точность координатно-временной привязки данных во многом определяет успех решения томографической задачи. На текущем этапе решения задачи обработки данных имеются временные ряды данных о фазе радиосигнала с шагом 0,02 с (50 Гц). Координаты приёмных установок, как правило, известны. Для того чтобы определить путь радиосигнала в пространстве необходимо знать траекторию движения ИСЗ по орбите во время сеанса радиопросвечивания.

Для расчёта координат ИСЗ использовалась широко распространённая модель орбитального движения SGP4 (Simplified General Perturbations) [116]. В качестве входных параметров модели используется набор орбитальных характеристик ИСЗ, два раза в сутки уточняемый и распространяемый NORAD (North American Aerospace Defense Command — Командование северо-американской противовоздушной обороной). Орбитальные параметры всех КА публикуются на сайте [117] в интернете. Точность расчёта положения спутника на орбите составляет менее 5 км [116].

## Процедура определения границ сетки реконструкции

После проведения описанных выше процедур имеются данные с нескольких приёмных установок, характеризующиеся координатной и временной информацией. Классическая задача томографии ионосферы с применением сигналов НККА [105–108] рассматривается как двумерная в пространстве координат  $(h, \tau)$ , где  $h$  — высота над уровнем моря, а  $\tau$  — горизонтальное расстояние вдоль орбиты ИСЗ. Поскольку приёмные установки располагают вдоль преимущественных направлений пролётов спутников, которые имеют полярные и приполярные орбиты, т. е. меридионально, то координата  $\tau$ , по сути, есть расстояние вдоль меридиана.

Если представить типичное распределение пути сигналов (лучей) в области реконструкции в результате пролёта ИСЗ над цепочкой приёмных установок, то станет понятно, что у крайних приёмников есть лучи, которые не имеют пересечения с лучами от других приёмных установок. Эти лучи не соответствуют постановке задачи томографии, восстановление распределения поля неизвестной величины в которой базируется на более чем одной проекции для каждого узла сетки. Другими словами, каждый луч должен иметь хотя бы одно пересечение с другими лучами. Поэтому лучи, не имеющие пересечений с другими лучами, должны быть исключены из дальнейшей обработки [108].

## Формирование проекционного оператора

Математическая постановка задачи томографии подразумевает решение системы линейных уравнений  $Ax = b$ , где  $A$  — матрица проекционного оператора,  $b$  — вектор измеренных значений и  $x$  — вектор восстанавливаемых значений электронной концентрации. Проекционный оператор строится путём дискретизации значений функции распространения зондирующего радиосигнала на заданной сетке реконструкции.

В данной методике [114, 115] проекционный оператор формируется на основе кусочно-планарной аппроксимации [105, 118]. Относительные ошибки реконструкции в данном случае на 8 % больше, чем при использовании билинейной аппроксимации [105], однако время формирования матрицы проекционного оператора в 2 раза меньше и составляет в среднем 40–90 мин (в отличие от билинейной — 130–250 мин, значения времени приведены для реализации в программной среде MatLab).

Процедура формирования матрицы проекционного оператора является наиболее длительным этапом в технологической цепочке сбора и обработки, занимает больше времени, чем все остальные процедуры вместе взятые, и фактически определяющим общую скорость получения информационного продукта.

### Формирование начального приближения

Задача томографии ионосферы с помощью ННКА характеризуется относительно малым количеством ракурсов интегральной характеристики. Это связано с ограниченным количеством приёмных установок в цепочке, которое, как правило, не превышает 3-4 и частотой их установки вдоль направления пролёта ИСЗ, среднее расстояние между соседними приёмными установками составляет 200...400 км [108].

Малое число ракурсов интегральной характеристики приводит к увеличению количества решений обратной задачи. Для того чтобы итерационный алгоритм сходился к нужному решению необходимо задать определённое начальное приближение, которое примерно соответствует распределению и величине искомых значений.

В рассматриваемой методике предлагается новый оригинальный подход к построению начального приближения [108]. В основе подхода лежит поиск такого модельного распределения электронной концентрации при имеющемся проекционном операторе, произведение которых будет характеризоваться наименьшим отклонением от измеренных интегральных значений реконструируемой функции. Суть процедуры подбора начального приближения состоит в синтезе конечного множества правдоподобных начальных приближений и оценки соответствия этих приближений измеренным характеристикам.

### Формирование вектора коэффициентов релаксации и решение системы линейных уравнений

Для восстановления вертикального распределения электронной концентрации ионосферы в рассматриваемой методике используется алгоритм ART — алгоритм алгебраической реконструкции с релаксацией [108].

Для ускорения сходимости к решению при применении итеративного алгоритма применяется подход с применением вектора коэффициентов релаксации, который позволяет перераспределять добавку невязки к каждому элементу реконструируемого изображения в соответствии с начальным приближением [108].

При использовании вектора коэффициентов релаксации значения реконструируемого распределения в областях фоновых концентраций изменяются в итерационном процессе меньше, чем в районе области максимума. Это, с одной стороны, позволяет уменьшить количество артефактов в областях фоновых значений, а другой — позволяет алгоритму произвести необходимую коррекцию начального приближения в области максимальной ионизации, которая является носителем основного количества неоднородностей электронной концентрации [108].

### Примеры и первичный анализ вертикальных реконструкций электронной концентрации ионосферы

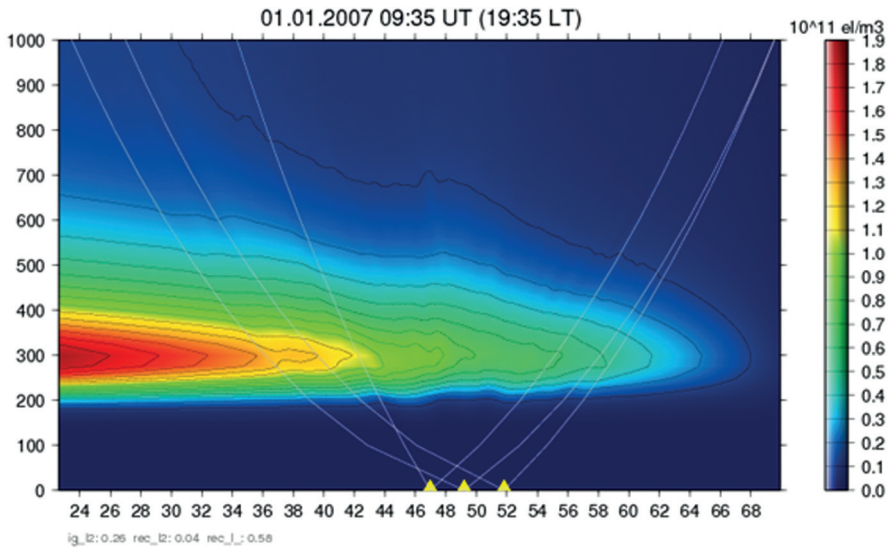
Материал текущего раздела был сформирован на основе монографии [108]. Всего за 2007 г. было собрано и обработано около 450 реконструкций электрон-

ной концентрации в ионосфере дальневосточного региона над о. Сахалин. В данном разделе остановимся на некоторых аспектах обработки информации, а также анализе полученных результатов.

Одной из самых больших проблем при создании автоматизированной технологии томографической реконструкции вертикального распределения электронной концентрации по данным низкоорбитальных и специализированных космических аппаратов следует признать подбор начального приближения для решения обратной задачи.

Для контроля качества подбора начального приближения при помощи предложенной технологии можно воспользоваться следующим критерием. Необходимо убедиться, что между областью, в которой есть лучи спутник – приёмник и областью, которая не затрагивается исследованиями на окончательной картинке, не наблюдалась серьёзных градиентов электронной концентрации. Именно для этого на приведённых ниже реконструкциях приведены зоны видимости томографических станций (естественно, что зона видимости станции серьёзно варьируется от сеанса к сеансу).

Как отмечалось выше, в случае корректной работы модуля подбора начального приближения между зоной реконструкции и областью, где начальное приближение не корректировалось, не должно быть явно выраженных скачков градиентов электронной концентрации. Пример корректной работы данного алгоритма представлен на рисунке 79.



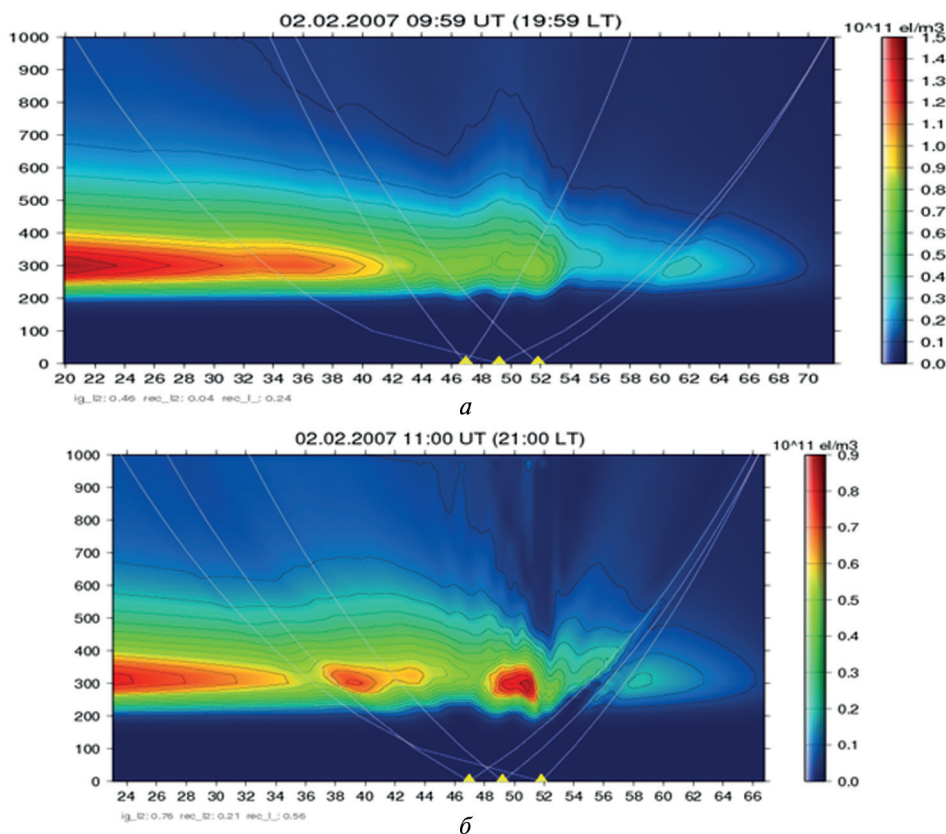
**Рисунок 79.** Распределение электронной концентрации ионосферы над регионом исследования. Серыми линиями указаны зоны видимости каждой из трёх станций

На рисунке 79 представлен пример реконструкции практически спокойной ионосферы дальневосточного региона в ночной период времени. Совершенно стандартное распределение электронной концентрации, имеющее чётко выраженный широтный градиент, с плавным уменьшением концентрации электронов на север практически до нуля.

Пример более динамичного распределения концентрации представлен на рисунке 80 (см. с. 168). На верхней панели представлено распределение на 02.02.2007 в 19:59 по местному времени, на нижней — ситуация в ионосфере чуть более чем через один час.

Над Южно-Сахалинском сформировался провал электронной концентрации (рисунок 80*а*), который через час преобразовался в квазиволновую структуру с длиной волны порядка 200 км (рисунок 80*б*). Электронная концентрация данных неоднородностей составила порядка  $0,8 \cdot 10^{11}$  электрон/м<sup>3</sup>.

Работу алгоритма подбора начального приближения на этих реконструкциях можно признать удовлетворительной. Однако необходимо отметить, что на рисунке 80*а*, и тем более на рисунке 80*б*, в северной части реконструкции существенны перепады градиента между областями, в которых коррекция начального приближения происходила и не происходила. Иными словами, с северной стороны, особенно во втором случае, алгоритм подбора начального приближения достаточно сильно зависил от необходимой концентрации.



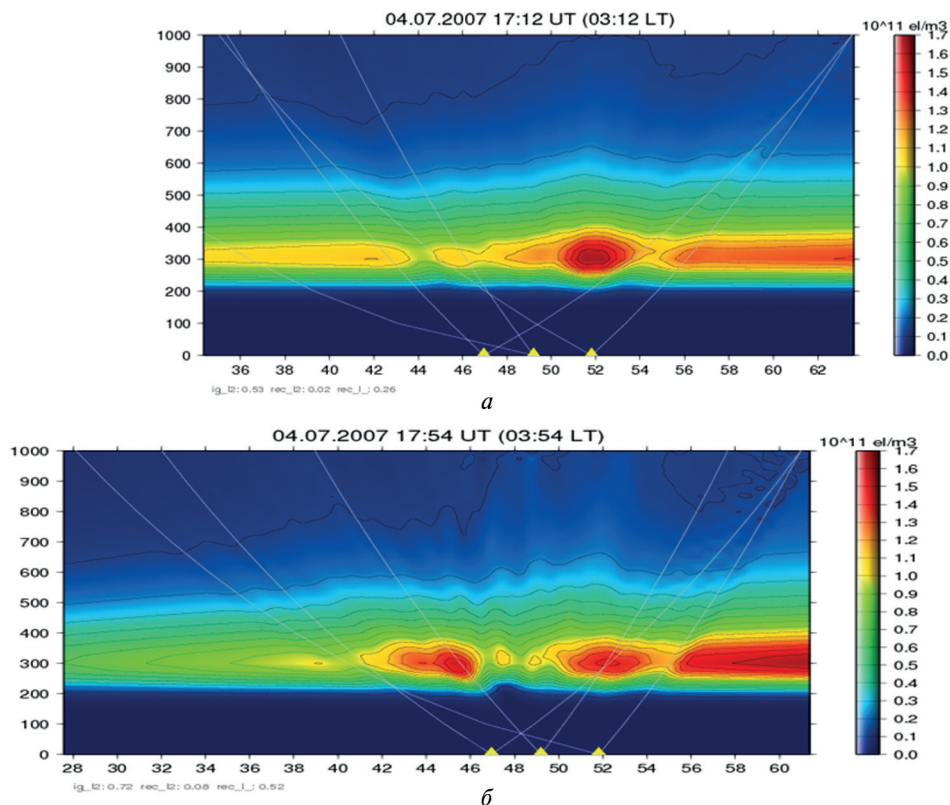
**Рисунок 80.** Томографическая реконструкция электронной концентрации 02.02.2007 в 19:59 (*а*), 21:00 (*б*)

На рисунке 81 (см. с. 169) представлена очень интересная картина распределения электронной концентрации. Необходимо отметить, что на этот раз алгоритм подбора начального приближения сработал вполне корректно.

Необычность зарегистрированного распределения состоит в том, что градиент электронной концентрации имеет обратный знак. Другими словами, электронная концентрация увеличивается по направлению на север, хотя в обычных условиях она должна уменьшаться. Скорее всего подобное состояние ионосферы вызвано выбросом высокоэнергетических частиц в авроральной зоне, что привело к повышенной ионизации на севере. Данный эффект оказал-

ся хорошо заметным именно в ночной период времени, когда общая концентрация электронов невелика.

Приведённые на рисунке 81 реконструкции электронной концентрации главным образом интересны интервалом между повторными измерениями. Между реконструкциями на рисунках 81а и б прошло менее 50 мин. Таким образом, можно увидеть эволюцию структур, наблюдаемых на более раннем разрезе.



**Рисунок 81.** Распределение электронной концентрации в ионосфере дальневосточного региона России 04.07.2007 03:12 (а) и 03:54 (б)

Структура в районе 52° с. ш. практически не изменила геометрические размеры, но электронная концентрация в её максимуме упала примерно на 30%. С другой стороны, едва различимая структура на 46° с. ш. распалась на несколько неоднородностей. Причём структуру на рисунке 81б можно классифицировать как квазиволновое возмущение с длиной волны порядка 100 км, распространяющееся в южном направлении.



## ГЛАВА 6

# ПРИНЦИПЫ ВЕРИФИКАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. ПОДСПУТНИКОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

### 6.1

## ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОКЕАНА

На сегодняшний день использование данных ДЗ в целях океанографического мониторинга постепенно обретает характер оперативной повседневной деятельности. Различные параметры водной поверхности входят параметрами в уравнение переноса и для их определения в строгой математической постановке требует решения обратных задач. Как правило, класс подобных задач следует относить к некорректно поставленным задачам, которые не имеют единственного и точного решения. Следовательно, необходимо учитывать указанный аспект при осуществлении дистанционного мониторинга подстилающей поверхности и постоянно осуществлять верификацию полученных результатов.

Поэтому для обеспечения верификации (проверки достоверности) космической информации о состоянии акваторий мирового океана необходимо собирать синхронные данные подспутниковых гидрологических, гидрохимических, гидробиологических, и экологических наблюдений.

Подобная работа особенно важна в тех случаях, когда элементы информационных технологий только разрабатываются и для подтверждения эффективности вновь разрабатываемых элементов требуется значительный объём экспериментальных исследований. Более того, указанные работы могут дать новые результаты только на тех полигонах, которые уже многократно изучены и по которым имеются значительные временные ряды данных.

Для отработки региональных алгоритмов восстановления океанографических характеристик морской поверхности необходимо выбрать несколько полигонов, а имея в виду прикладное использование разрабатываемых технологий указанные полигоны должны быть выбраны в промысловых районах.

Подобными отраслевыми полигонами могли бы стать акватории Баренцева или Норвежского морей на Севере и Сахалино-Курильский район на Дальнем Востоке. Подобный выбор полигонов обуславливается тем, что по указанным акваториям имеется большое количество априорной информации. Кроме того, в Мурманске и Южно-Сахалинске размещены станции приёма спутниковой информации, позволяющие обеспечить спутниковый мониторинг в верификационных научно-производственных экспериментах.

Основные задачи, решаемые в подобных экспериментах, могут быть сведены к следующим:

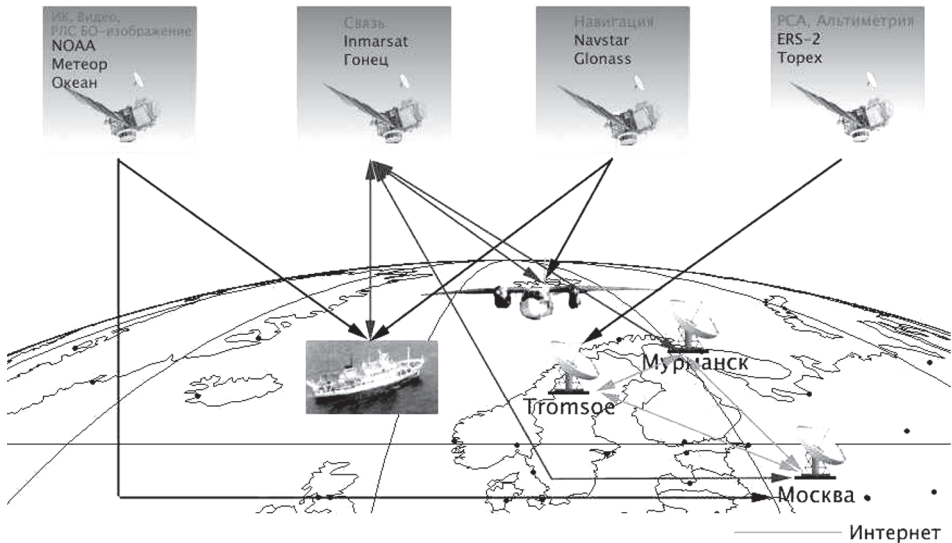
- выявление океанографических процессов и явлений на морской поверхности по космическим снимкам в разных диапазонах спектра;
- синхронная съёмка исследуемого полигона судовыми средствами;
- разработка региональных алгоритмов восстановления океанографических параметров;



- разработка моделей усвоения космических данных для краткосрочного прогноза состояния морской среды.

Для проведения указанных работ необходимо иметь соответствующие средства экспериментальной поддержки: хорошо оснащённое научно-исследовательское судно и самолёт-лабораторию.

Информационное обеспечение спутникового промысло-океанографического мониторинга



**Рисунок 82.** Информационное обеспечение верификационного подспутникового эксперимента

Схема информационного обеспечения верификационных экспериментов при проведении промысло-океанографического мониторинга представлена на рисунке 82.

## ТРЕБУЕМОЕ ОСНАЩЕНИЕ СУДНА

Специализированные НИС (научно-исследовательское судно) позволяют выполнять исследовательские работы в области океанологии, ихтиологии, гидробиологии, гидрохимии, гидрологии, геологии, метеорологии, промысловой гидроакустики, промышленного рыболовства и технологии морепродуктов.

НИС типа «Атлантик-833», специально разработанные по заказу Министерства рыбного хозяйства для отраслевых экспериментальных исследований, имеют неограниченный район плавания во все времена года, в тропических и умеренных широтах в соответствии с классом Л2.

### *Основные технические характеристики НИС типа «Атлантик-833»*

Длина наибольшая . . . . .	62 м
Ширина . . . . .	13,8 м
Высота борта . . . . .	6,6 м
Осадка . . . . .	5,2 м
Скорость . . . . .	12,2 узлов

Научная группа . . . . .	до 16 чел.
Мощность двигателя . . . . .	1200 л. с.
Водоизмещение. . . . .	2500 т
Дедвейт . . . . .	630 т
Сеть питания электрооборудования:	
силовая трёхфазная . . . . .	380 В
радионавигационного и научного оборудования . . . . .	220 В
частота. . . . .	50 ГГц

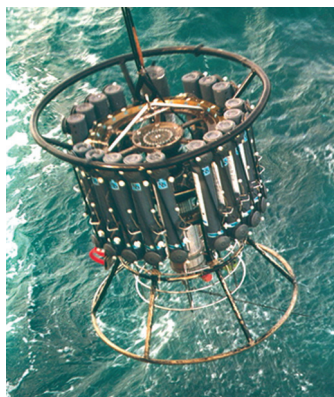
Для навигационных целей на судне установлены приёмоиндикаторы FSN-70 («Фуруно» (Furuno Electric), Япония), «Шхуна» (СССР), осуществляющие определение географических координат судна по сигналам навигационных ИСЗ системы «Транзит», приёмоиндикатор сигналов береговых станций фазовой навигационной системы «Декка» – «Пирс IM», радиопеленгатор «Рыбка», доплеровский лаг и измеритель скорости и направления течений CI-30 («Фуруно», Япония), судовые лаг и гирокомпас. Впоследствии навигационная аппаратура судов модернизировалась, добавлялись комплексы для определения координат при помощи глобальных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

Для поиска промысловой концентрации донных и пелагических рыб, оценки плотности и биомассы их промысловых скоплений установлен комплекс гидроакустической аппаратуры, состоящей из гидролокатора «Сарган-Г», эхолота «Сарган-Э», эхоинтегратора, эхолота ЕК-400 («Симрад» (Simrad), Норвегия), эхолота для оценки размерного состава рыбных скоплений ES-400 («Симрад», Норвегия).

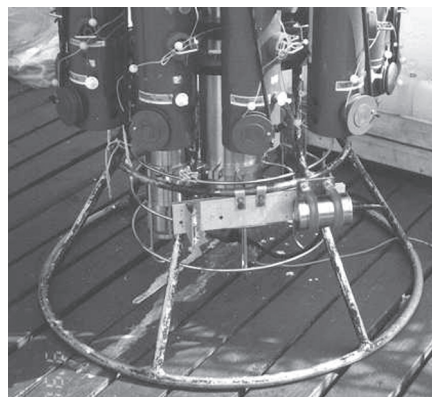
Контроль и анализ процесса облова косяков рыб осуществляется с помощью гидроакустической аппаратуры траловой телеметрии.

Наблюдение за погодой в районе исследований проводится с помощью аппаратуры приёма спутниковой метеорологической информации типа SU-8 («Фуруно», Япония).

Разнообразная производительная автоматизированная аппаратура обеспечивает решение комплексных и проблемно-ориентированных исследовательских задач.



**Рисунок 83.** Внешний вид погружного СТД зонда



**Рисунок 84.** Оптический датчик «Трап»

Многофункциональная информационная система сбора и обработки океанографических данных, разработанная и изготовленная фирмой EG&G Ocean Products, обеспечивает проведение наблюдений за пространственно-временной

изменчивостью гидрологических, гидрохимических и гидрооптических характеристик исследуемых вод океана. Система разработана по заказу Министерства рыбного хозяйства СССР и включает в своём составе STD-зонды «Смарт», «Марк-Зв», укомплектованного оксиметром «Бекман» (Beckman Coulter, USA) и флуориметром фирмы «Си Тех» (Sea Tech, Нижний Новгород), батометрической кассетой «Розетт» (Rosetta) фирмы «Дженерал Океаникс» (General Oceanics), снабжённой 24 пробоотборниками типа Го-Фло (Go-Flo) (рисунок 83, см. с. 172). Структурным ядром системы является персональный компьютер типа IBM PC.

Пробы воды, отобранные с изучаемых горизонтов с помощью батометров кассеты «Розетт», исследуются с помощью измерительной системы сбора и обработки гидрохимических данных фирмы «Алпкем» (Alpkem Corporation, Clackamas, Oregon), позволяющей проводить наблюдения пространственно-временной изменчивости биогенных элементов — исходной материальной базы продуктивности вод. Обработка измерительной гидрохимической информации осуществляется с помощью персонального компьютера.

Для изучения формирования световых полей, режимов питания и процессов фотосинтеза органического вещества, определения первичной продукции установлен комплекс гидрооптической аппаратуры, состоящий из подводного спектрорадиометра LI-1800UW, измерителя нисходящих и восходящих потоков солнечной радиации фирмы «Лай Кор» (Li-Cor, USA) и флуориметра фирмы «Сии Тич». Для исключения влияния качки судна на показания измерителя солнечной радиации предусмотрен специально сконструированный карданный подвес. Для автоматизированного измерения содержания зоопланктона в процессе погружения на STD может быть установлен оптический датчик ТРАП производства Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) (рисунок 84, см. с. 172).

Оборудование систем сбора и обработки гидрологической, гидрохимической и гидрооптической информации размещено в четырёх просторных специально оборудованных лабораториях. В их состав входит ангар для хранения зондов и отбора проб воды, анализируемой с помощью разнообразного сменного исследовательского оборудования: спектрофотометров, био- и хемолуминографов, оксиметров, рН-метров, измерителей содержания органического углерода, кремния, аммиака, а также ряда других химических и микробиологических элементов. В ангаре хранятся погружаемые блоки измерительных систем, рабочие и запасные батометры, стандартное гидрологическое оборудование. Специальное тельферное устройство обеспечивает вывод STD-зондов, кассеты батометров к борту судна.

Для проведения океанографических наблюдений с помощью STD-зондов «Марк-Зв» и «Смарт» установлена электрическая кабельная лебёдка типа ЛГГ-1 с поворотным гидравлическим выстрелом, а также гидрологическая лебёдка типа ЛЭРОК-1,2 с гидрологической заваливающейся кранбалкой.

Для проведения геологических и гидробиологических наблюдений, исследований бентоса, планктонных организмов (бактерио-, фито-, зоо- и ихтиопланктона) предусмотрен комплекс постов сбора проб стандартными техническими средствами, лабораторные помещения, кладовые для хранения проб, реактивов, экспедиционного оборудования. Сбор проб осуществляется с помощью электрических лебёдок типа ЛЭРОК-0,5, ЛЭРОК-1,2 с гидравлическими кранбалками. Для удобства проведения работ по сбору проб предусмотрены откидные площадки. Лабораторные помещения снабжены комплексом стандартного исследовательского и вспомогательного оборудования.

Судно оборудовано системой непрерывной подачи заборной воды, отбираемой из-под корпуса судна. Отобранная с помощью двух патрубков морская среда подаётся в помещения гидрохимической и гидробиологической

лабораторий. Система предназначена для анализа состава отобранных проб воды по маршруту движения судна с помощью различного исследовательского оборудования.

С целью изучения поведения скоплений и косяков рыб в естественной их среде обитания, изучения их реакции на различные орудия лова, проведения исследовательских работ по наблюдению взаимодействия «судно – орудия лова – гидробионты» на судне установлен комплекс технических средств, состоящий из кабельной лебёдки типа ЛГГ-1 для работы с буксируемыми подводными аппаратами (телевизионными, гидроакустическими и др.), поворотного гидравлического выстрела, установленных на кормовом переходном мостике, кабельного канала связи с гидроакустической аппаратурой и лабораторией подводных наблюдений.

Многочисленные удобные лабораторные помещения позволяют проводить широкий комплекс океанологических, гидробиологических, ихтиологических и технологических исследований. Для этого наряду с 12 основными проблемно-ориентировочными лабораториями на судне имеется большое число вспомогательных помещений. Имеется конференц-зал для проведения конференций и совещаний научной группы. Для обработки фотоматериалов, негативов, печатания фотографий, полученных во время научно-исследовательских работ, предусмотрена фотолаборатория, оборудованная необходимой аппаратурой.

Для проведения сбора и хранения полученной в экспедиции информации на судне в специально оборудованном для этого помещении установлена мини-ЭВМ, а также периферийные устройства, разнесённые по большинству лабораторий судна.

Научно-исследовательские суда типа «Атлантик-833» могут быть по желанию заказчика дооборудованы необходимыми исследовательскими научными приборами, в частности буксируемых зондом «Аквашаттл» (AquaShuttle) (рисунок 85). Их использование позволит проводить на высоком научном и техническом уровне комплексные и проблемно-ориентированные исследования Мирового океана.

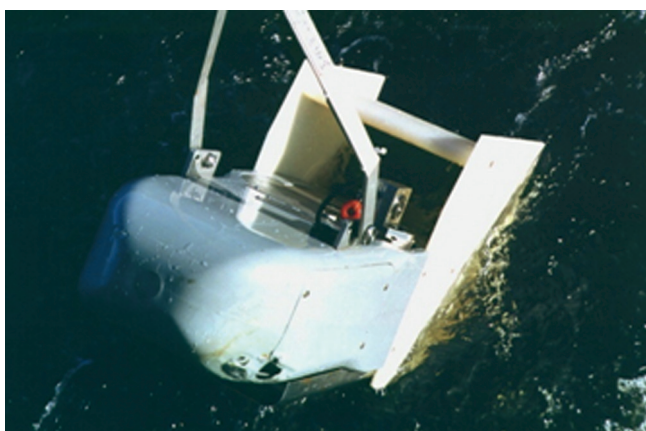


Рисунок 85. Буксируемый СТД-зонд «Аквашаттл»

## СОЗДАНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ АРГО

Данные контактных физико-биологических, гидрологических и гидрохимических измерений необходимы для широкого спектра применений, особенно в прогнозах погоды и состояния климата планеты. На сегодня проблема

получения таких данных по всему Мировому океану стоит как никогда остро. Существующие сегодня базы данных пополняются информацией, получаемой из эпизодических натуральных экспериментов, осуществляемых на очень ограниченных акваториях, а также данными попутных наблюдений транспортного флота, основные маршруты которого также строго лимитированы. В последние несколько десятилетий существенный вклад в исследование состояния Мирового океана вносят различные спутниковые системы.

Идея создания глобальной сети океанографических дрейфующих буйковых станций появилась у учёных США и Франции в 1997–1998 гг. после успешного проведения глобального эксперимента по изучению циркуляции океана (World Ocean Circulation Experiment — WOCE). Проект создания такой сети был назван АРГО, а основными его целями являются:

- размещение и поддержание в акваториях Мирового океана заданного количества буёв;
- создание национальных центров АРГО (Argo);
- обеспечение свободного доступа к данным;
- передачу в глобальную сеть данных в течение 24 ч с момента их поступления в береговой центр, а в Мировые центры данных АРГО — в течение нескольких месяцев.

Реализация подобной глобальной датчиковой сети позволяет осуществлять:

- оперативный (в реальном масштабе времени) сбор данных для прогноза состояния океана;
- верификацию различных прогностических моделей;
- качественные климатические трёхмерные схемы состояния Мирового океана и параметры их временной изменчивости;
- временные ряды различных физико-химических параметров состояния океана и параметров воды;
- получение характеристик течений в 2000-метровом слое океана;
- определение абсолютного уровня океана.

Схема функционирования буёв представлена на рисунке 86 (см. с. 176).

Данные с сети буёв АРГО поступают ежедневно и в большом количестве (при плановом количестве в 3000 буёв ежегодно производится около 100 000 STD-станций). Дискретность измерения каждого буя составляет 10 сут, а плановый нижний горизонт измерений — 2000 м.

Каждый буй дрейфует в течение 10 сут на заданной глубине, затем опускается на горизонт 2000 м, с него он всплывает на поверхность, измеряя температуру и солёность (электропроводность). Затем в течение 6 ч данные передаются на несколько спутников «Аргос», которые непрерывно пересылают их в два береговых центра системы «Аргос». После этого буй опускается на глубину дрейфа и цикл продолжается до тех пор, пока не истощатся батареи (рабочий период составляет около четырёх лет, или примерно 120 станций).

Буй может закончить свою работу преждевременно (попасть в рыбацкие сети или быть выброшен на берег). Некоторые районы Мирового океана из-за дрейфа буёв могут быть оголены. Для возмещения потерянных измерителей предусматривается постоянное пополнение буёв и их повторное использование. В перспективе предусматривается самостоятельное движение буёв в конце цикла по команде и использование обратной связи для изменения параметров работы (например, глубины дрейфа).

В проекте в настоящее время участвуют все развитые страны, включая США, Канаду, Австралию, Новую Зеландию, Японию, Южную Корею, страны ЕС.



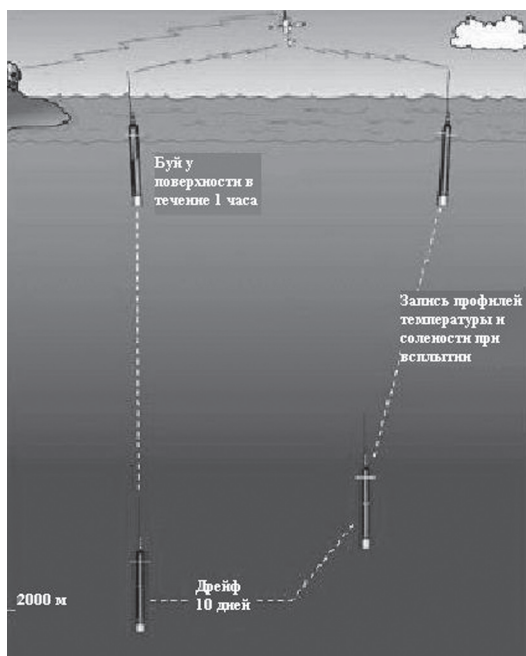


Рисунок 86. Схема работы буя АРГО

Вместе с данными измерений температуры и солёности (электропроводности) дрейфующие буи обеспечивают также данные о течениях на двух горизонтах (заданной глубине дрейфа и у поверхности). Вместе со спутниковыми измерениями возвышения океанской поверхности они позволяют определить характеристики течений от поверхности до заданного горизонта дрейфа.

## ВОЗМОЖНОСТИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ САМОЛЁТА-ЛАБОРАТОРИИ

В настоящее время для верификации данных ДЗ создан и эффективно используется самолёт-лаборатория на базе Ан-26 БРЛ. Самолёт имеет увеличенную дальность и продолжительность полёта при высоких показателях экономичности его эксплуатации. Это позволяет использовать указанный авианоситель для решения широкого круга научных и практических задач, связанных с дистанционными исследованиями моря, в том числе в интересах рыболовства и управления промыслом.

Самолёт Ан-26 БРЛ имеет следующие основные тактико-технические характеристики:

- практическая дальность полёта..... 3500 км
- максимальная продолжительность полёта ..... 9 ч
- крейсерская скорость на высоте 6000 м..... 430 км/ч
- скорость на высоте 200 м ..... 250–350 км/ч
- практический потолок..... 7000 м
- диапазон высот полёта ..... 50...7000 м
- максимальная взлётная масса ..... 1300 м
- максимальная грузоподъёмность..... 5000 кг
- часовой расход топлива:
  - на высоте 200 м ..... 900 кг
  - на высоте 6000 м ..... 700...800 кг



Меньшая, чем у Ил-18 взлётная масса и невысокие требования к длине и качеству взлётной полосы делают для данного типа самолётов доступными практически все аэродромы в районах Арктики и Дальнего Севера, а наличие дистанционно управляемых поворотных прожекторов позволяет проводить работы в условиях полярной ночи.

Самолёт-лаборатория Ан-26 БРЛ может быть использован для решения следующих задач:

- авиапоиск скоплений рыбы;
- авиасъёмка морских млекопитающих, прибрежных акваторий для ма-рикультуры, водорослей, рек и внутренних водоёмов;
- ледовая авиаразведка;
- комплексная океанологическая съёмка морей;
- контроль 200-мильных зон и правил рыболовства;
- контроль промысловой ситуации (расположения и количества судов);
- экологический авиамониторинг (обнаружение загрязнений, оценка объёмов);
- подспутниковые съёмки для верификации данных спутникового ДЗ.

Кроме того, в силу универсальности установленного на борту оборудования и лёгкости изменения его комплектации самолёт способен решать целый круг задач, не связанных с рыбохозяйственными исследованиями. Особую гибкость использованию самолёта придаёт наличие бортовой автоматизированной системы, снабжённой обширным комплексом программно-аппаратных средств.

При проведении комплексных авиационных съёмок авиазондирование морской поверхности осуществляется в видимом, инфракрасном и радиодиапазонах электромагнитных длин волн. При этом в качестве основных измерительных средств используется следующее оборудование.

*ИК-радиометр* — предназначен для измерения температуры ТПО по трассе полёта. По данным измерений ТПО восстанавливается её пространственная структура, анализ которой позволяет идентифицировать фронты, вихри, меандры и другие гидродинамические неоднородности, косвенным образом влияющие на формирование промысловых скоплений скумбрии или сельди при определённых тепловых условиях.

*Спектрорадиометр* — предназначен для измерения оптических характеристик морской поверхности, по которым в дальнейшем по эмпирическим уравнениям рассчитывается концентрация хлорофилла, анализ которой позволяет идентифицировать и выделить участки повышенной концентрации первичной биопродуктивности, являющейся одним из косвенных признаков благоприятствующих формированию промысловых скоплений скумбрии и сельди.

*Комплекс диагностики зон конвергенций* («Дидикон») — осуществляет подсчёт количества пенных обрушений и площади поверхности моря, покрытой пеной, что обеспечивает в дальнейшем, по определённым методикам, алгоритмам и технологиям, идентификацию зон конвергенции и дивергенции. При этом конвергентные участки благоприятствуют формированию промысловых скоплений скумбрии и сельди, так как здесь происходит накопление кормовой базы.

*РСА* — предназначен для всепогодного радиолокационного зондирования морской поверхности с целью идентификации по полученным изображениям фронтальных зон, вихрей, меандров и других мезо-масштабных гидродинамических неоднородностей, косвенным образом благоприятствующих формированию промысловых скоплений скумбрии и сельди. По РЛИ РСА представляется возможным с достаточно высокой степенью достоверности, основываясь на накопленном собственном опыте, непосредственно идентифицировать косяки скумбрии и сельди.

*Фото- и видеосъёмочная аппаратура* — предназначена для съёмки наиболее интересных участков морской поверхности с точки зрения мезомасштабной изменчивости, гидробиологических особенностей и других явлений, эффектов и объектов, в том числе судов, морских млекопитающих, крупных скоплений птиц и косяков рыбы.

*Метеорологический комплекс* — предназначен для измерения температуры и влажности заборного воздуха, а также скорости и направления ветра.

Наряду с инструментальным зондированием с борта самолёта-лаборатории традиционно осуществляются и визуальные наблюдения за морской поверхностью и окружающим воздушным пространством, а также поиск косяков рыбы, во время проведения которых регистрируются:

- все явления и эффекты на морской поверхности гидродинамического и гидробиологического происхождения, оказывающие определённое влияние на формирование промысловых скоплений скумбрии и сельди (фронтальные разделы, вихри, меандры, наличие фито- и зоопланктона и т. п.);
- биологические объекты (морские млекопитающие, птицы), косвенным образом указывающие на наличие или возможное присутствие пелагических рыб, так как питаются ею;
- проявление различных видов загрязнений на поверхности моря;
- местоположение и основные характеристики различных объектов на морской поверхности, в том числе и судов, включая их принадлежность и вид деятельности;
- местоположение, размеры, форма, окраска, направление движения обнаруженного косяка рыбы;
- разнообразные атмосферные явления и эффекты с указанием их интенсивности.

## 6.2 КОМПЛЕКСНЫЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ

В июле 1997 г. в районе промысловых работ в открытой части Норвежского моря, а также в Норвежской экономической зоне проводился комплексный научно-производственный эксперимент на НИС «Академик Борис Петров» с использованием космических, авиационных и судовых средств океанографического мониторинга.

Основной целью эксперимента являлась отработка в натуральных условиях элементов автоматизированных технологий комплексной обработки космической, гидрологической, гидрооптической, гидроакустической и промысловой информации, получаемой с помощью судовых, авиационных и космических измерительных систем.

В ходе экспедиции решался комплекс задач информационного обеспечения краткосрочного прогнозирования промысловой обстановки, главными из которых были следующие:

- экспериментальная отработка технических решений по созданию судовой и самолётной автоматизированных систем сбора и обработки данных дистанционного зондирования океана;
- экспериментальная отработка технических решений по организации базы данных для комплексного усвоения разнородных данных, поступающих от измерительно-вычислительных комплексов судна, самолёта и ИСЗ;
- проведение комплексных гидрологических, гидрооптических, гидробиологических, гидрохимических, гидроакустических и космических

- работ на полигоне, направленных на отработку методик верификации данных различных спутниковых датчиков на реальных океанографических явлениях, наблюдаемых в выбранной акватории (вихри, фронтальные зоны, зоны течений, промысловые скопления гидробионтов);
- оценка эффективности полученных в ходе эксперимента практических результатов, совершенствование научно-методических подходов и верификация технологической системы отраслевого производственно-океанографического мониторинга.

## РАЙОН И СХЕМА ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Работы, проводимые во время экспедиции общей продолжительностью 30 сут, выполнялись по следующей схеме. На первом этапе осуществлялась фоновая съёмка открытой части Норвежского моря на полигоне, ограниченном с запада 5° з. д., с севера 70° с. ш., с юга 64,5° с. ш., с востока границей норвежской экономической зоны (НЭЗ). Было выполнено 8 галсов непрерывного зондирования слоя 10...80 м с помощью буксируемого прибора «Аквашаттл», регистрирующего изменения температуры, солёности, содержания кислорода и флюоресценции. По результатам фоновых полигонных наблюдений выбран район для проведения микрополигона, расположенный в районе промысла скумбрии и пересекающий стрежень Западной ветви Норвежского течения. На микрополигоне выполнено 11 галсов непрерывного зондирования.

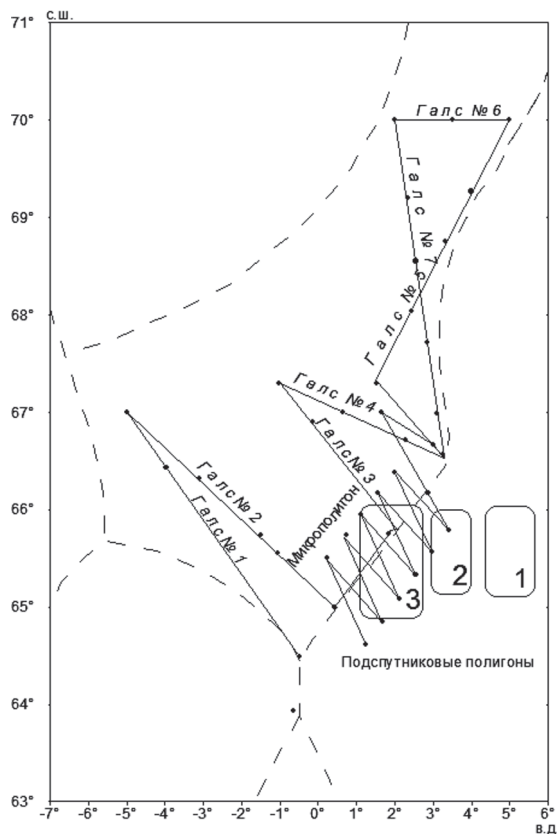


Рисунок 87. Схема выполнения подспутниковых экспериментов

Для более детального изучения гидрофизических характеристик водных масс производились глубоководные (до 1000 м) гидрологические станции с отбором биогидрохимических проб на характерных горизонтах. Всего на полигонах было выполнено 40 станций. После этого была выполнена серия измерений на подспутниковых и самолётных микрополигонах в НЭЗ вдоль широты 65,5° с. ш.

На рисунке 87 (см. с. 179) представлена схема района проведения экспедиционных работ. Здесь же показано положение глубоководных станций, пунктирной линией обозначены границы экономических зон. Цифрами обозначены подспутниковые микрополигоны.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ТРЕБОВАНИЯ К ОБРАБОТКЕ

Для решения поставленных задач применялась стандартная судовая измерительная аппаратура, обеспечивающая контактные поверхностные измерения физических характеристик, а также измерения разрезов по глубине с отбором проб с заданных горизонтов. Получаемые экспериментальные данные обрабатывались и представлялись для анализа в оперативном режиме. При проведении работ использовалась также информация дистанционного спутникового мониторинга и результаты съёмки поверхности океана с самолёта. Одновременно собиралась информация о метеорологической обстановке, данные о температуре поверхности океана, характеристики ведения промысла в исследуемом районе и др.

На время проведения эксперимента были созданы два центра береговой поддержки. Оба центра и НИС «Академик Борис Петров» были оборудованы терминалами российской системы спутниковой связи «Гонец». Вся информация, получаемая как непосредственно на корабле, так и в береговом центре приёма и обработки во ВНИРО, может быть условно разделена на три потока, а именно:

- растровые изображения поверхности моря (спутниковые и самолётные изображения различного разрешения в различных спектральных диапазонах);
- векторные поля различных физико-химических характеристик (температура, солёность, концентрация хлорофилла и т. д.);
- цифровая атрибутивная информация справочного характера о состоянии или характеристиках объектов (дислокация судов промыслового флота, объёмы вылова и т. д.).

## ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для обработки и представления результатов эксперимента были использованы средства ГИС, а также современные программные средства обработки спутниковых изображений. Среди пакетов ГИС сравнивались и анализировались возможности использования таких продуктов, как ArcInfo, ArcView, MapInfo, MapEdit. Из программного обеспечения обработки спутниковых изображений рассматривались ERDAS Imagine, IDRISI, ER Mapper. Позднее, при анализе данных спутниковой альтиметрии, а также совместном анализе экспериментальной информации использовался программный пакет GMT.

Основными требованиями при выборе программного обеспечения были следующие:

- обеспечение возможностей полнофункциональной обработки и представления разнородных типов экспериментальных данных;

- возможность работы на достаточно простых компьютерах типа IBM PC, имеющихся на научно-исследовательских и рыбопоисковых судах;
- простота обслуживания программного обеспечения с учётом квалификации обслуживающего персонала;
- стоимость программного обеспечения.

По результатам сравнительного анализа были выбраны ArcView 3.0 GIS и ERDAS Imagine (вариант PC, Windows NT). Выбор среды ArcView 3.0 GIS был обусловлен достаточностью функционального обеспечения для решения поставленных задач, сравнительной простотой при эксплуатации, расширяемостью за счёт дополнительных модулей, широкими возможностями по представлению атрибутивной информации, возможностью работы с форматами данных других программных продуктов (в частности ERDAS Imagine), наличием локализованной версии и, не в последнюю очередь, ценой.

В качестве программной среды обработки спутниковых изображений был выбран пакет ERDAS Imagine, который является мировым лидером в данной области обработки информации. Вариант Windows NT для PC был выбран из-за необходимости использования в судовых условиях, а также для обеспечения совместной работы с ArcView 3.0 GIS. Кроме этих пакетов был также использован пакет векторизации растровых изображений Easy Trace, обеспечивающий возможности оперативного преобразования информации в векторный формат и представления её в среде ArcView 3.0 GIS.

Растровые изображения исследуемой поверхности Норвежского моря принимались от метеорологических спутников NOAA-12 и NOAA-14 в видимом и инфракрасном диапазоне спектра (режим АРТ, пространственное разрешение 4 км), а также от спутника «Океан-О1» № 7 РЛС БО (пространственное разрешение 1 км) непосредственно на борту судна. Береговой центр ВНИРО получал изображения с тех же спутников в режиме HRPT (High-resolution picture transmission) с пространственным разрешением 1 км по каналам интернета из ИКИ РАН. Данные с ERS-2 (РСА, пространственное разрешение 30 м) получались по интернету из Норвежского центра приёма и обработки спутниковой информации.

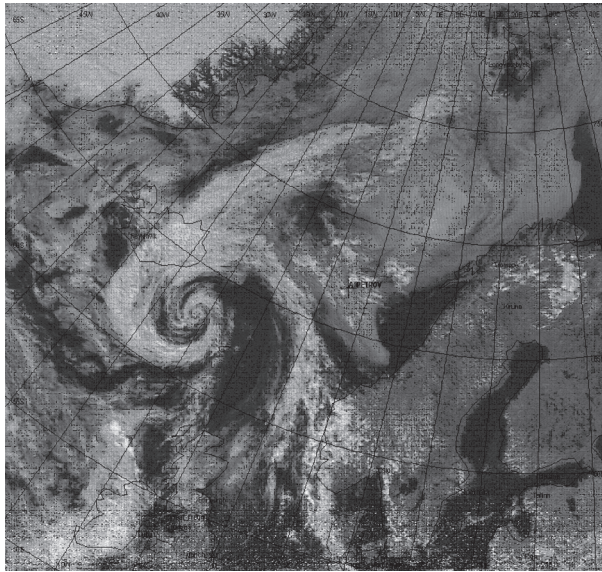
## МЕТОДЫ РАБОТЫ С ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ

Приём информации от метеорологических спутников осуществлялся непосредственно на борту НИС с помощью автоматизированной станции приёма и обработки спутниковой информации «Мемосат-М» разработки ВНИРО. Ежесуточно, в течение всего рейса со 2-го по 28 июля 1997 г. осуществлялся приём от 4 до 8 снимков подстилающей поверхности.

В качестве примера получаемой информации на рисунке 88 (см. с. 182) представлен снимок от спутника NOAA-14 за 14.07.1997 (14:27 GMT) с характерным случаем метеорологической обстановки на полигоне.

Для дальнейшего использования и составления композиционных изображений спутниковые снимки пересчитывались в стандартные географические проекции. Пересчёт осуществлялся с помощью пакета программ ERDAS Imagine. Здесь же, по конкретным алгоритмам, осуществлялся пересчёт значений интенсивности пикселей изображения в значения физических характеристик — радиационную температуру. После пересчёта географически привязанные изображения в формате \*.img использовались как покрытия (слои) для представления в ГИС. Формат этих изображений также удобен для организации информационных хранилищ и баз данных.





**Рисунок 88.** Типичная метеорологическая ситуация в районе подспутникового эксперимента (снимок с ИСЗ NOAA)

Океанологическая съёмка осуществлялась в соответствии с сеткой станций, на которых проводился комплексный сбор гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических данных до глубины 1000 м, а также гидрооптических данных до глубины 60 м.

Сбор данных о концентрации хлорофилла, фотосинтетической активности, природной продуктивности фитопланктона, подводной освещённости и температуре осуществлялся в процессе зондирования приповерхностного слоя с помощью действующего макета прибора «ПримПрод» (МГУ). Между станциями и на микрополигонах для получения более полной картины трёхмерной пространственной изменчивости океанологических параметров использовался буксируемый носитель измерительного комплекса AquaShuttle (фирмы Chelsea Instruments, Англия), способный на ходу судна двигаться по синусоидальной траектории с периодом от 800 м до 40 км и осуществлять измерения температуры, электропроводности, давления, флуоресценции, парциального давления кислорода, водородного показателя рН и окислительно-восстановительного потенциала.

## ПОДГОТОВКА И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Как правило, данные от установок, приборов и комплексов поставляются в специфических, присущих только данному измерительному устройству, форматах данных. Поэтому для обеспечения возможности хранения и поиска данных различные первичные экспериментальные массивы информации были преобразованы в единый (один из наиболее широко распространённых) формат \*.dbf. Если это было необходимо, исходные данные дополнялись координатными составляющими (от системы спутникового позиционирования GPS), а также метеорологической информацией от судового измерительного комплекса.

В частности, все данные контактных измерений, представленные, как правило, в виде цифровых таблиц, преобразовывались с помощью пакета Microsoft



Excel в стандартные таблицы базы данных в формате \*.dbf. Построение полей физико-химических характеристик по результатам измерений на полигонах осуществлялось с помощью пакета программ Surfer. С помощью этого пакета проводилось также преобразование построенных полей и характеристик в векторный формат \*.dxf. В дальнейшем эта информация экспортировалась в ArcView 3.0 GIS в виде покрытия для комплексного анализа и интерпретации.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

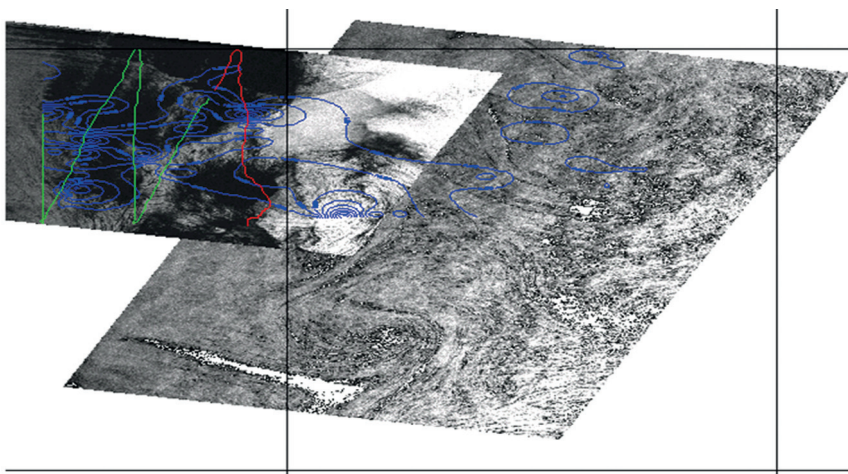
В качестве программной среды представления результатов обработки экспериментальных данных использовался пакет программ ArcView 3.0 GIS. Пакет работает с цифровыми данными, представленными в формате \*.dbf. В качестве исходного формата для представления графических результатов обработки использовался широко распространённый формат векторных данных \*.dxf.

Для построения исходного (начального) картографического покрытия были использованы батиметрические данные из цифрового атласа “General Bathymetric Chart of the Ocean” (GEBCO), масштаб 1:125 000, дискретность представления батиметрических уровней — 100 м. В последующем в оперативном режиме подготавливались и представлялись в качестве слоёв среды ArcView следующие данные:

- местоположение НИС «Академик Борис Петров»;
- положение, номер гидрологических станций и слои физико-химических параметров;
- границы экономических зон сопредельных государств;
- местоположение разрезов и данные гидрологического зондирования на различных горизонтах;
- местоположение разрезов и данные гидроакустического зондирования;
- траектории полёта спутников и границы кадров изображений при съёмке микрополигонов;
- местоположение судов промыслового флота и промысловая справочная информация;
- траектории полёта самолёта в подспутниковых экспериментах и данные результатов съёмки.

Результаты обработки экспериментальных данных были представлены в виде таблиц в формате \*.dbf. Графическое представление результатов обеспечивается в виде растровых цветных изображений в формате \*.gif, или в векторном формате \*.dxf с географической привязкой данных для последующего сравнения и наложения слоёв географического покрытия ГИС. Для проведения сравнительного анализа и выявления корреляционных зависимостей данные разрезов различных физических, гидрологических, биологических характеристик по глубине представлены в виде цветных графических изображений в формате \*.gif и в векторном формате \*.dxf.

На рисунке 89 (см. 184) дан пример использования различных элементов технологии получения, обработки и представления данных. Здесь в среде ArcView 3.0 GIS представлен снимок РСА спутника ERS-2 с наложенной на него сопутствующей информацией. Снимок передан на НИС «Академик Борис Петров» по каналам спутниковой связи «Гонец-Д1», а затем подготовлен с помощью пакета программ ERDAS Imagine для представления в среде ArcView совместно с гидроакустическими и гидрологическими данными. Отметим, что вихревым структурам, ясно различимым на снимках РСА, соответствуют повышенные концентрации рыбных скоплений (синие изолинии).



**Рисунок 89.** Пример ассимиляции экспериментальной информации в ArcView 3.0 GIS

В результате проделанной работы был сделан вывод, что программные продукты ArcView 3.0 GIS и ERDAS Imagine могут быть эффективно использованы при решении задач океанографического мониторинга промысловых районов, а также для комплексного усвоения и представления тематически обработанной информации при проведении судовых, космических и авианаблюдений.

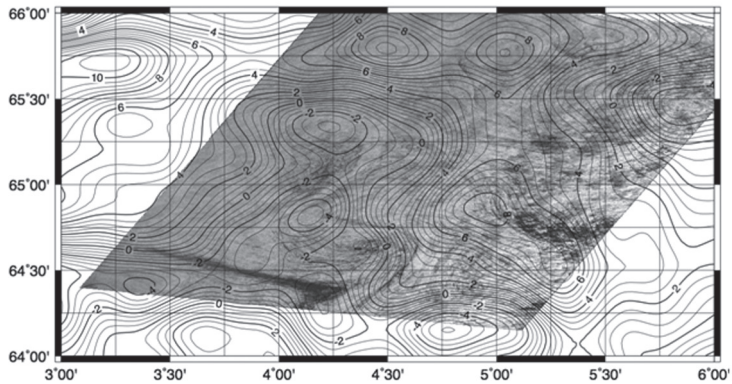
## СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Проведённый эксперимент позволил взглянуть на различную информацию о состоянии морской поверхности исследуемого региона немного с разных позиций. Для начала рассмотрим результаты совместного анализа информации в рамках всего эксперимента в целом, проанализировав динамику развития выявленных на поверхности океана структур без привязки к фазам проведённых исследований. Материалы этого раздела в основном были изложены в работах [82, 119].

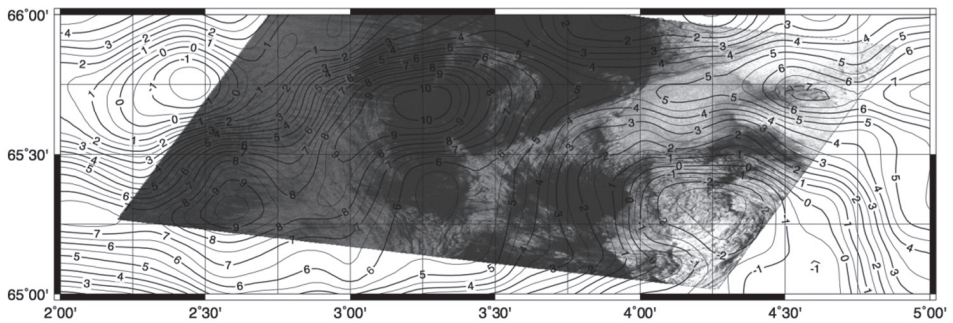
На рисунке 90 (см. с. 185) [82, 119] представлено изображение КА ERS-2 с наложенными изолиниями карты аномалий морской поверхности, полученными по информации с КА Topex/Poseidon. На изображениях радиолокатора и картах спутниковой альтиметрии отчётливо наблюдаются вихревые структуры, представляющие интерес в том числе с точки зрения промысловой океанологии. Естественно, крайне интересно сопоставить полученную информацию из различных источников, которая в идеальном случае должна неплохо совпадать — т.е. местоположение и размеры вихревых образований, должны быть примерно одинаковыми на всех изучаемых картах.

Анализ изображения показывает, что выявленные структуры действительно неплохо совпадают. Так, вихревые образования, видимые на снимке с КА ERS-2 с координатами центра  $65^{\circ}15'$  с. ш. и  $4^{\circ}15'$  в. д., а также  $64^{\circ}30'$  с. ш. и  $4^{\circ}30'$  в. д., представлены и на карте аномалий высоты поверхности океана (см. рисунок 58). На альтиметрической реконструкции наблюдается целый комплекс циклонических образований в южной и центральной частях исследуемого региона. Однако координаты центров вихрей несколько (около  $15'$ ) отличаются от рингов, регистрируемых радиолокатором.

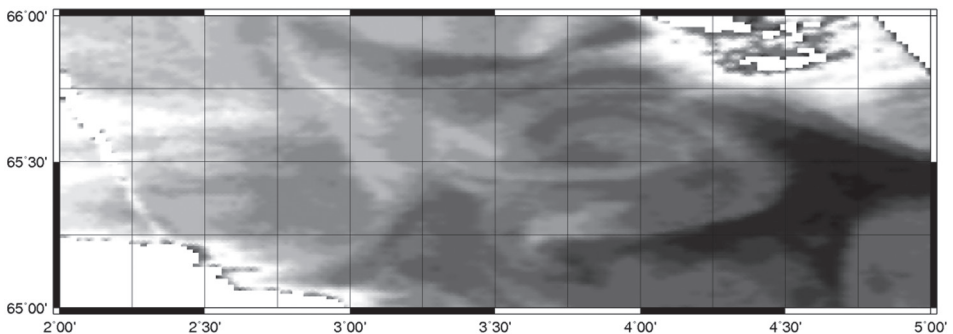
По всей видимости, группа циклонических рингов начинает формировать более крупное образование, а поскольку карта аномалий поверхности формируется из альтиметрических данных, набирающихся в исследуемом регионе в течение 10 сут, местоположение активно меняющихся образований на «мгновенной» съёмке радиолокатором и на реконструируемой карте аномалий морской поверхности могут немного различаться [82, 119].



**Рисунок 90.** Сравнение изображения водной поверхности с КА ERS-2 (19.07.1997) и аномалий высоты морской поверхности по данным спутника Торех/Poseidon (изолинии)



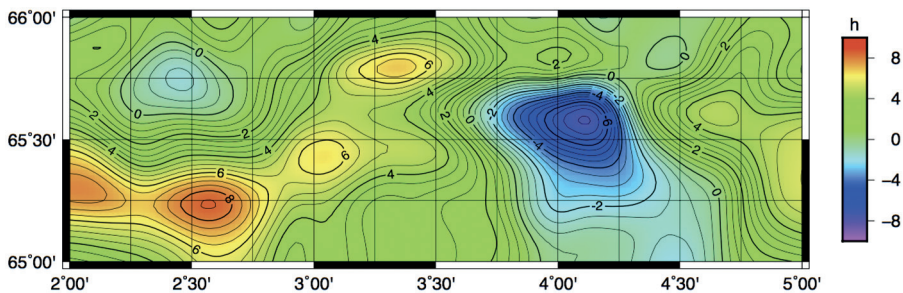
**Рисунок 91.** Сравнение изображения водной поверхности с КА ERS-2 (22.07.1997) и аномалий высоты морской поверхности по данным спутника Торех/Poseidon (изолинии)



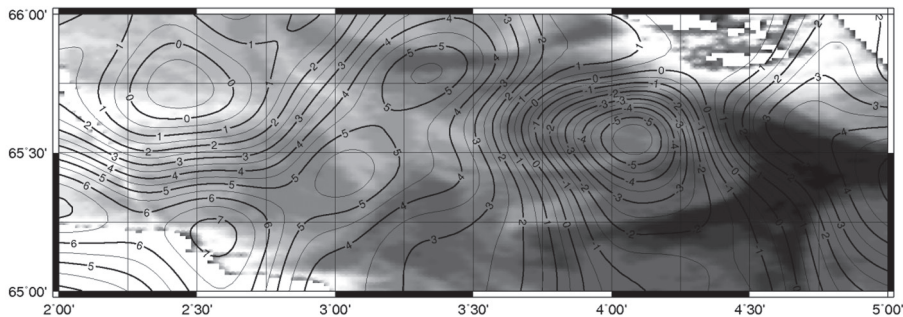
**Рисунок 92.** Изображение 4 канала КА NOAA

В пользу высказанного предположения свидетельствуют изображения, представленные на рисунках 91 и 92 (см. с. 185). На рисунке 91 приведено сравнение изображения ERS-2 на 22.07.1997 и соответствующего распределения аномалий морской поверхности. По всей видимости, циклонический ринг в этот момент уже полностью сформировался и стабилизировался, поскольку и на радиолокационном изображении, и на 10-дневной карте топографии поверхности совпадают не только координаты центров, но и формы объектов (вихрь с координатами  $65^{\circ}15'$  с. ш. и  $4^{\circ}15'$  в. д.).

Кроме того, на карте распределения ТПО с космического аппарата NOAA за 25.07.1997 (см. рисунок 92) циклонический ринг наблюдается практически на том же самом месте (сместился на  $15'$  на север), аналогичная картина наблюдается и на соответствующей 10-дневной карте аномалий высоты поверхности океана (рисунки 93 и 94). При этом изолинии аномалий высоты морской поверхности точно повторяют форму вихревого образования, регистрируемого на карте температуры.



**Рисунок 93.** Аномалии морской поверхности по данным спутника Topex/Poseidon (20.07.1997–30.07.1997)



**Рисунок 94.** Сравнение карты температуры поверхности океана по данным КА NOAA (25.07.1997) и аномалий высоты морской поверхности по данным спутника Topex/Poseidon (изолинии)

К сожалению, технологические возможности по передаче информации в 1997 г. не позволяли достаточно оперативно передавать изображения радиолокатора непосредственно на борт НИС для обеспечения информационной поддержки эксперимента и оперативного управления «контактной» съёмкой.

Тем не менее, ориентируясь на результаты предварительной части эксперимента было проведено несколько пробных тралений на акватории подспутникового полигона, результаты которых представлены на рисунках 95 и 96 (см. с. 187).



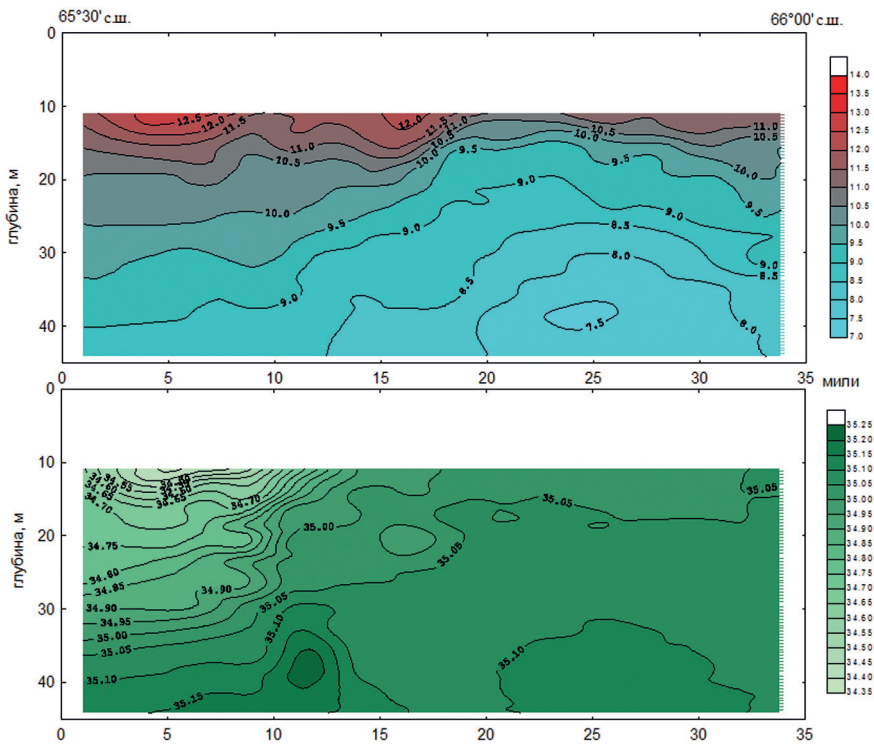


Рисунок 95. Вертикальное распределение температуры (вверху) и солёности (внизу) на разрезе вдоль 3°48' в.д. Подспутниковый полигон № 2, 21.07.1997–23.07.1997

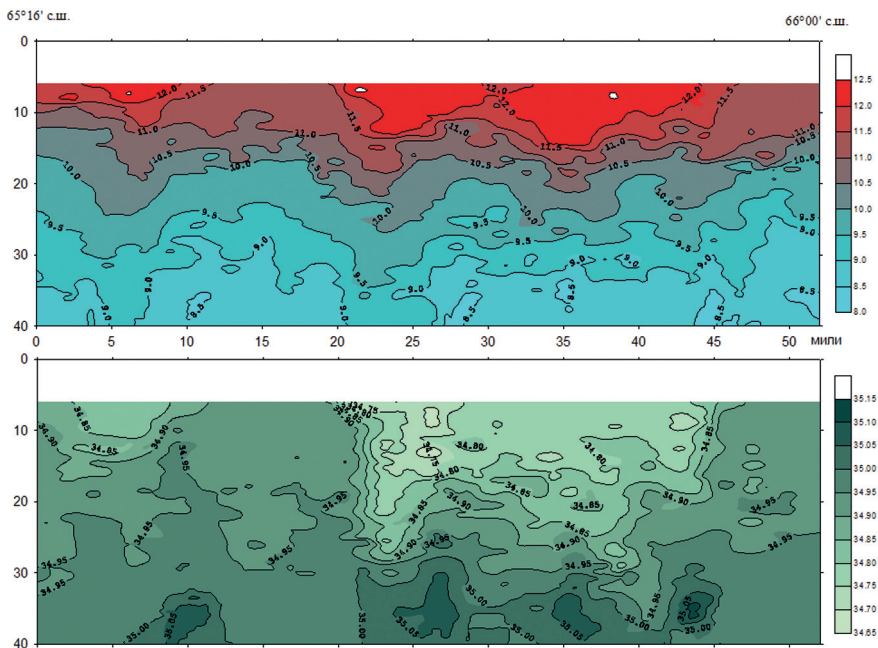
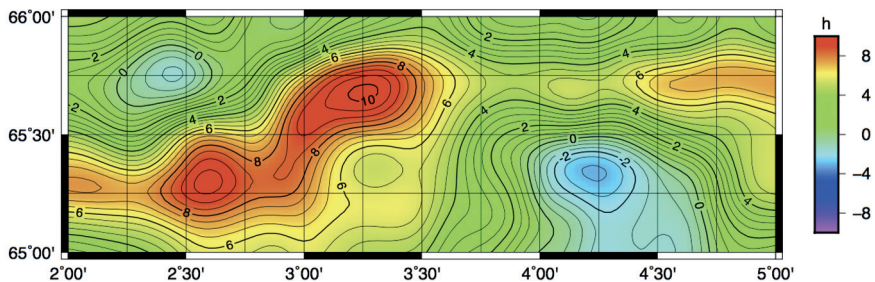


Рисунок 96. Вертикальное распределение температуры (вверху) и солёности (внизу) на разрезе вдоль 3°22' в.д. Подспутниковый полигон № 2, 21.07.1997–23.07.1997

Было сделано два гидрологических разреза при помощи буксируемого измерителя температуры и солёности в толще воды AquaShuttle. На подспутниковом полигоне № 2 НИС работало вдоль 3°48' в. д. и 3°22' в. д., с 65°30' до 66°, и с 65°16' до 66°, соответственно.

Первый разрез захватывает циклоническую структуру, к сожалению, только в самом начале. Тем не менее, на рисунке 95 хорошо различается вертикальная структура вихря, видны аномалии температуры (до 12 °С) и разрозненные водные массы (до 34,65 ‰), соответствующие подобному образованию.

Второй разрез прошёл несколько западнее местоположения изучаемого циклонического образования. Тем не менее, северная часть разреза попала в градиентную зону между циклоническим и антициклоническим образованиями (рисунок 97).

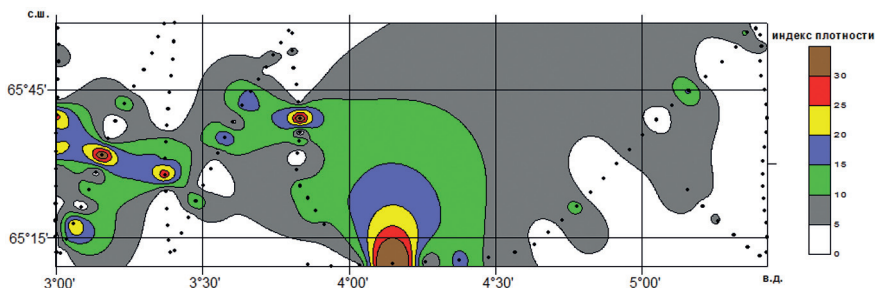


**Рисунок 97.** Аномалии морской поверхности по данным спутника Topex/Poseidon (17.07.1997–27.07.1997)

На рисунке 96 явным образом прослеживается распределение температуры и солёности, характерные для циклонических образований. Аналогично предыдущему случаю, температура воды достигает 12,5 °С, тогда как солёность падает до 34,7 ‰.

К сожалению, поскольку выявленные структуры находились в пределах норвежской исключительной экономической зоны, российские суда не могли вести реальных промысловых работ в указанном регионе. Следовательно, промысловая статистика от российского флота по определению в этом регионе не доступна. Однако одновременно с гидрологическими исследованиями на подспутниковом полигоне № 2 проводилась и гидроакустическая съёмка с целью качественной оценки биологических запасов в регионе исследований.

На рисунке 98 представлено пространственное распределение индекса плотности скоплений скумбрии.



**Рисунок 98.** Распределение скоплений скумбрии, 19.07.1997–22.07.1997.  
Точками отмечена траектория движения судна



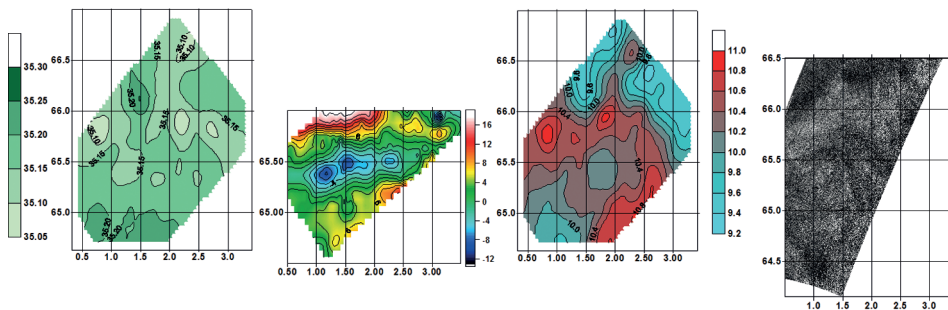
Анализ изображения показывает, что максимальные скопления скумбрии наблюдаются в южной и западной частях полигона. Максимум плотности на юге региона с максимумом индекса плотности свыше 30 точно соответствует местоположению циклонического ринга, регистрируемого по данным «дистанционной» и «контактной» съёмок, что вполне укладывается в современные представления о принципах промысла скумбрии. В северном полушарии питательные вещества имеют тенденцию концентрироваться на периферии циклонических круговоротов (где имеет место отток воды от центра к периферии благодаря действию силы Кориолиса) [119].

Скопления в центральной и западной областях региона с индексами плотности 20–30 также не выбиваются из привычной картины, поскольку соответствуют антициклоническим образованиям, наблюдаемым на рисунках 93, 96, 97. В северном полушарии питательные вещества концентрируются в центре антициклонических круговоротов (где по той же причине вода стремится от периферии к центру) [119].

### АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧЕННОЙ НА МИКРОПОЛИГОНЕ

Гидрологическая съёмка на микрополигоне выявила наличие высокодинамичных образований в регионе исследований. На распределении температуры поверхности океана присутствуют три вихревых образования с положительной температурной аномалией, достигающей  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, выявляется слабая антициклоническая структура с координатами центра  $1,75^{\circ}$  в.д. и  $65,5^{\circ}$  с.ш., амплитуда температуры поверхности от центра к периферии образования составляет не более  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В целом, аналогичная картина наблюдается и при анализе информации, полученной от радиолокатора с синтезированной аппаратурой ERS-2 и спутникового альтиметра Topex/Poseidon. К сожалению, общая ветровая обстановка в регионе исследований не позволила получить высококонтрастное радиолокационное изображение, тем не менее, на представленном изображении можно отчётливо выделить вихревую структуру с координатами центра  $1,5^{\circ}$  в.д.,  $65^{\circ}$  с.ш. и радиусом 60...80 км наряду с фронтальной структурой, что соответствует общему характеру распределения температуры поверхности (рисунок 99).



**Рисунок 99.** Результаты гидрологической и спутниковых съёмок: распределение солёности, аномалии высоты поверхности, температуры и радиолокационное изображение (09.07.21997) микрополигона 14.07.1997–17.07.1997 (слева направо)

На карте аномалии морской поверхности (см. рисунок 99) различается группа циклонических структур с амплитудой порядка 6...8 см, по характеру совпадающая с образованиями, наблюдаемыми на результатах гидрологической

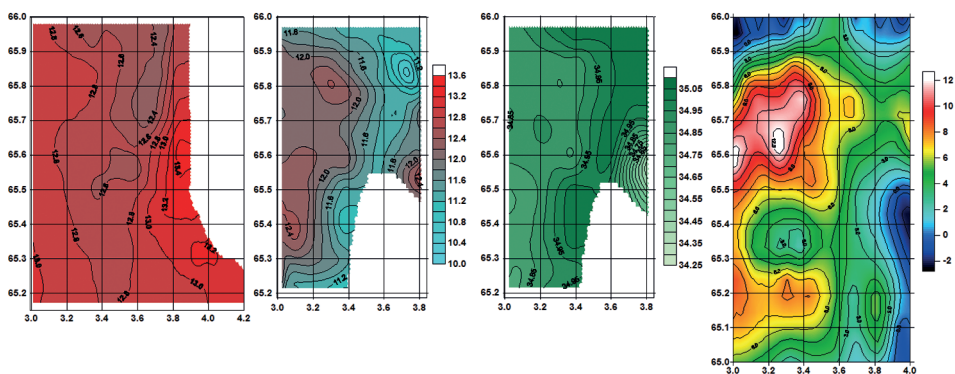
съёмки. Слабая антициклоническая структура в центральной части микрополигона не регистрируется на распределении аномалии высоты морской поверхности, по всей видимости, в силу большого времени накопления информации с учётом изомаршрутного цикла альтиметрического КА.

Общий характер циркуляции на микрополигоне по данным спутниковой альтиметрии совпадает с информацией, представленной на распределениях температуры и солёности поверхности океана, построенных по данным контактных измерений.

## АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧЕННОЙ НА ПОЛИГОНЕ № 2

Этот раздел построен на материале работы [120]. Кроме того, достаточно полный анализ информации по подспутниковому полигону № 2 проведён в работах [82, 119]. Были показаны соответствия структур, зарегистрированных по результатам альтиметрической и радиолокационной, а также гидрологической съёмки посредством буксируемого комплекса AquaShuttle [82].

Циклоническая вихревая структура с координатами центра  $4^\circ$  в.д.,  $65,5^\circ$  с.ш. была зарегистрирована и по результатам съёмки погружным комплексом NeilBrown [82] (рисунок 100).



**Рисунок 100.** Результаты гидрологической съёмки подспутникового полигона № 2 (21.07.1997–23.07.1997): температура поверхности, температура и солёность океана на горизонте 10 м (слева направо)

Анализ распределения температуры показывает наличие существенного перепада значений температуры от центра к периферии вихря, причём распределения температуры и солёности на глубине 10 м подтверждают развитие аномалии. Глубина структуры составляет до 30 м в соответствии с одновременными измерениями комплекса AquaShuttle [119].

На альтиметрической съёмке указанная циклоническая структура также различается достаточно хорошо.

Кроме того, наблюдается структура с координатами центра  $3,3^\circ$  в.д.,  $65,35^\circ$  с.ш. и радиусом 100...120 км, которая отсутствует на распределении температуры на поверхности, но чётко различается на горизонте 10 м. Анализ данных гидрологической съёмки показал [82, 119], что в этой же области исследований наблюдалась существенное повышение концентрации скоплений скумбрии.

С учётом наличия непрерывного ряда альтиметрических наблюдений для указанного региона за период с 1992 по 2003 г. была проанализирована динамика

ка изменений значений аномалий высоты морской поверхности исследуемой части акватории Норвежского моря (рисунок 101). Анализ 10-дневных распределений аномалий морской поверхности по региону показал, что вихревая структура с координатами центра  $4^{\circ}$  в. д.,  $65,5^{\circ}$  с. ш. и радиусом  $30...50$  км наблюдалась в регионе непрерывно в период с 1995 по 1999 г. 25 июля  $\pm 6$  дней, что позволило предположить квазистационарный характер выявленного образования.

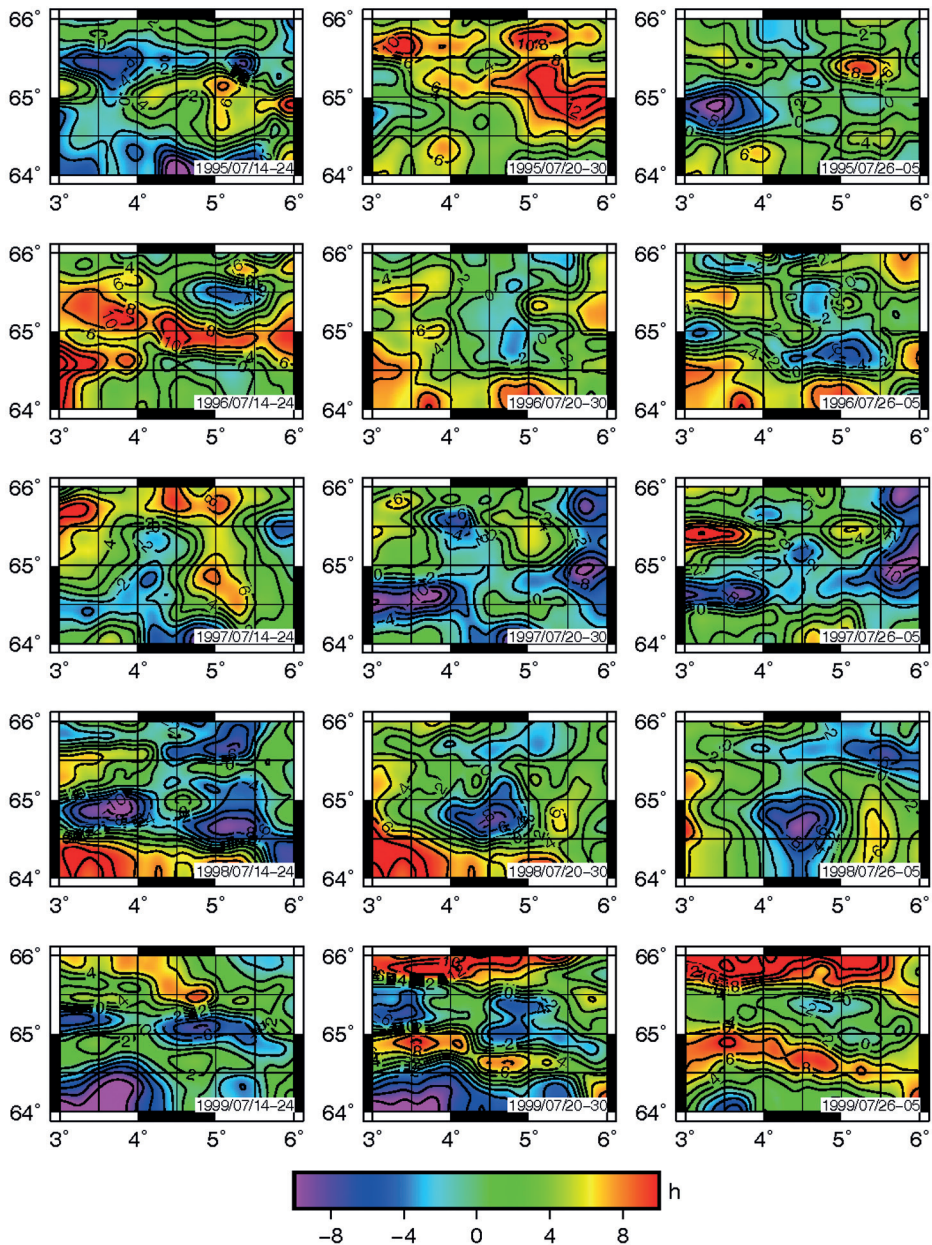
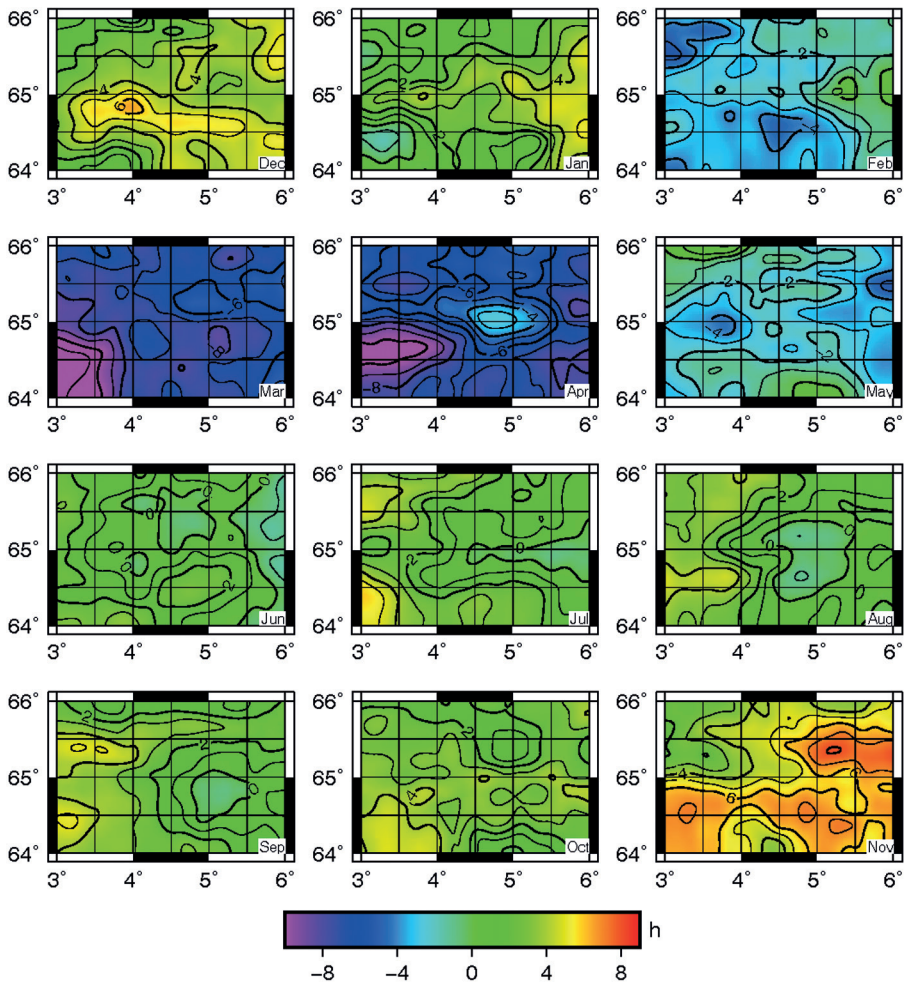


Рисунок 101. Декадные распределения аномалий высоты морской поверхности по данным КА Topex/Poseidon

Подтверждением указанного предположения могут служить среднемесячные и среднесезонные распределения аномалий морской поверхности, построенные за весь период альтиметрической наблюдений КА Торех/Poseidon (рисунок 102).



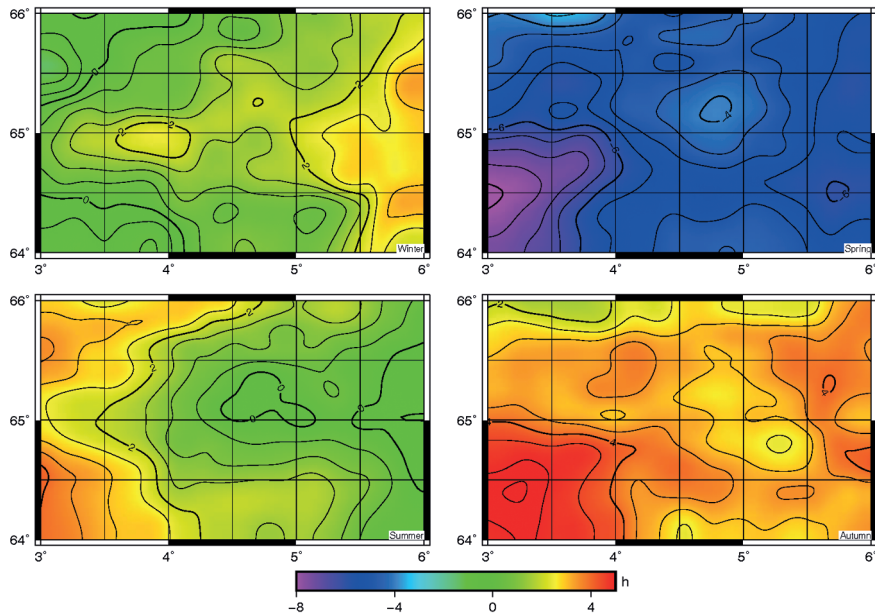
**Рисунок 102.** Среднемесячные распределения аномалий высоты морской поверхности по данным КА Торех/Poseidon

Учитывая общий годовой ход уровня исследуемой акватории Норвежского моря можно видеть, что циклоническая вихревая структура с координатами центра  $4^{\circ}$  в. д.,  $65,5^{\circ}$  с. ш. начинает формироваться в начале весеннего периода и в апреле достигает своего максимума.

В летний период, с учётом перестройки общего режима циркуляции, амплитуда изменения уровня несколько снижается и в начале лета, уровень поверхности в регионе становится практически равномерным (изменения амплитуды высоты поверхности не превышают нескольких сантиметров). Несмотря на это в июле, августе и сентябре наблюдается указанная циклоническая вихревая структура с амплитудой уровня  $1...2$  см, что сравнимо с общей динамикой уровня поверхности в указанный период.



Указанная динамическая структура регистрируется на среднесезонном распределении аномалий высоты морской поверхности, что может служить дополнительным подтверждением квазистационарного характера вихревого образования (рисунок 103). Анализ распределений показывает наличие циклонической структуры в регионе исследований даже с учётом наличия сезонных изменений уровня исследуемой акватории.



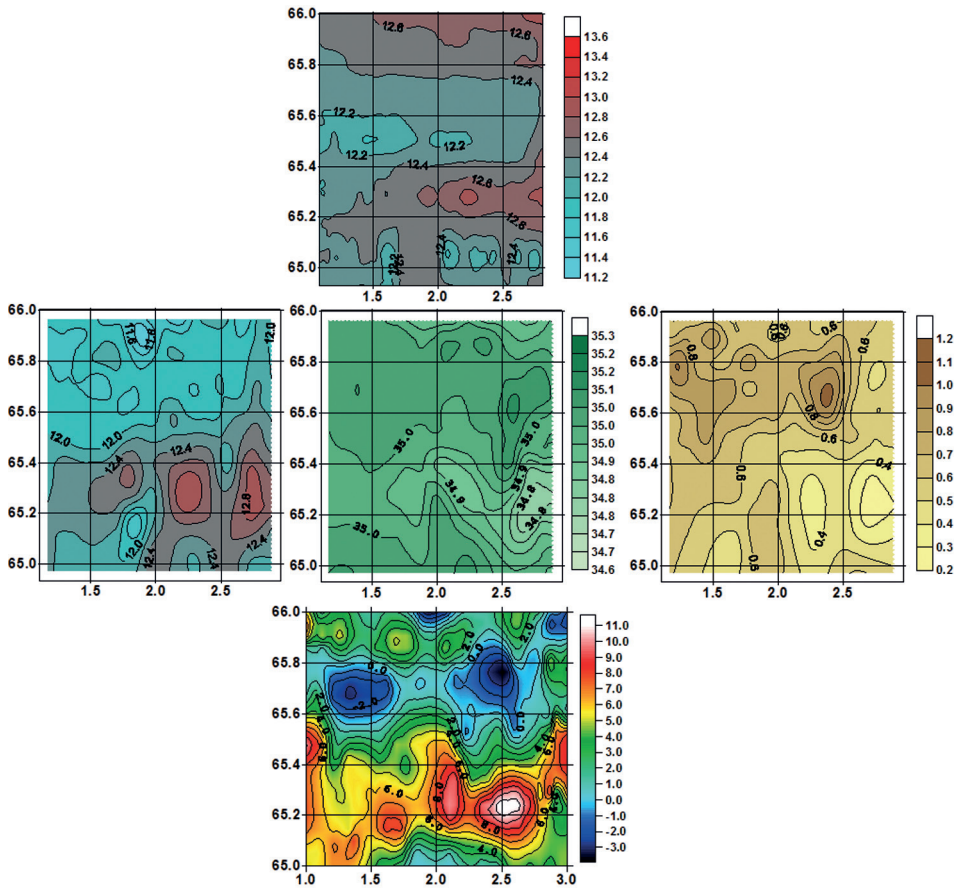
**Рисунок 103.** Среднесезонное распределение аномалий высоты морской поверхности по данным КА Topex/Poseidon

Значение температуры от центра к периферии вихря изменяется в пределах от 12 °С до 13 °С, что наряду с выносом питательных веществ, по всей видимости, способствует повышенной концентрации морских гидробионтов [119].

### АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧЕННОЙ НА ПОЛИГОНЕ № 3

Распределение температуры поверхности океана, полученное по данным гидроакустической съёмки в регионе подспутникового полигона № 3 показывает наличие небольших по амплитуде температуры вихревых образований с координатами центра основного 2,2° в. д., 65,3° с. ш. и диаметром около 30...40 км (рисунок 104, см. с. 194). С ростом глубины амплитуда изменения температуры и солёности возрастает до 0,5...0,8 °С (на поверхности не более нескольких десятых градуса), группа циклонических и антициклонических образований становится хорошо различимой, кроме того, структуры присутствуют и на пространственном распределении концентрации хлорофилла на глубине 20 м.

Анализ распределения аномалий высоты морской поверхности показывает, что в регионе исследований присутствуют несколько циклонических и антициклонических структур с координатами центров 2,5° в. д., 65,75° с. ш.; 2° в. д., 65,25° с. ш.; 2,5° в. д., 65,25° с. ш., соответственно. Кроме того, присутствует циклонический вихрь с координатами центра 1,5° в. д., 65,7° с. ш.



**Рисунок 104.** Результаты комплексной съёмки на подспутниковом полигоне № 3 (23.07.1997–25.07.1997). Температура поверхности океана, солёность и концентрация хлорофилла на горизонте 20 м и аномалии высоты морской поверхности по данным спутниковой альтиметрии (сверху вниз и справа налево)

Характер изменения физических величин от центра к периферии вихрей в целом соответствуют ранее выявленным закономерностям и совпадает с общими представлениями о динамике температуры и солёности в регионе. Циклоническим образованиям соответствуют вихри с тёплыми и распреснёнными водными массами, антициклоническим — с более холодными и солёными (см. рисунок 104).

Необходимо подчеркнуть, что на распределении аномалий высоты морской поверхности удалось различить структуры, которые хорошо видны на распределениях гидрофизических величин, полученных для горизонта 20 м, при этом результаты гидрологической съёмки характеристик поверхности океана показывают наличие несколько более слабой температурной аномалии (см. рисунок 104). Вместе с тем распределение концентрации хлорофилла указывает и на наличие вихревой структуры в северо-западной области региона (как и на альтиметрическом распределении), тогда как на температуре и солёности для рассматриваемого горизонта рассматриваемая структура практически неразличима.



## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ГЛАВНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В Норвежском море в 1997 г. был проведён научно-промысловый эксперимент с применением различных способов получения информации о состоянии поверхности и толщи водных масс в исследуемом регионе: с научно-исследовательского судна, с борта самолёта и космических аппаратов в различных спектральных диапазонах.

В регионе исследований по данным спутникового зондирования и восстановленным картам аномалий морской поверхности был выявлен ряд образований, представляющих собой циклонические и антициклонические структуры на поверхности океана.

Проанализированы результаты гидрологической съёмки на микрополигоне совместно с данными дистанционного зондирования: радиолокационной съёмкой региона и распределением высоты поверхности океана, полученным по данным спутниковой альтиметрии. Выявленные структуры на поверхности акватории показывают общий характер наблюдаемой циркуляции как по данным спутниковых измерений, так и в результате проведённой гидрологической съёмки региона.

В результате анализа информации по подспутниковому полигону № 2 показано, что структура, регистрируемая по радиолокационным и инфракрасным данным дистанционного зондирования и подтверждаемая анализом гидроакустических съёмок [119], отлично различается по результатам проведённых гидрологических исследований. Кроме того, выявлен квазистационарный характер указанного образования, что подтверждается анализом декадной, а также месячной и сезонной изменчивости исследуемой акватории, проведённой по данным полного цикла измерений КА Topex/Poseidon в период с 1992 по 2003 г.

В результате анализа гидрологической и альтиметрической информации по подспутниковому полигону № 3 были выявлены несколько структур циклонического и антициклонического характера. Вихревые образования хорошо прослеживаются на поверхности океана по данным спутниковой альтиметрии, однако на распределении температуры поверхности океана по данным гидрологических измерений выявлены слабо. Анализ распределений температуры, солёности и концентрации хлорофилла, полученных по результатам гидрологической съёмки, однозначно выявляет наличие аналогичных (аномалиям, выявленным по данным спутниковой альтиметрии) структур в приповерхностном слое акватории на глубине 20 м.

Сравнительный анализ информации, полученной как с борта космических аппаратов, так и научно-исследовательского судна, показал хорошее соответствие между зарегистрированными рингами, что подразумевает возможность предположения общности наблюдаемых эффектов и использования информации для изучения промысловой обстановки в регионе.

Комплексный анализ полученной информации в целом подтвердил существующие закономерности промысла морских гидробионтов в Норвежском море. Действительно, основные скопления скумбрии наблюдаются в областях повышенной динамики поверхности и толщи океана — циклонических и антициклонических вихревых образованиях, которые обеспечивают концентрацию основной кормовой базы.

Несмотря на оценочный характер проведённых гидроакустических исследований, в рамках которых не представлялось возможным оценить видовой и размерный состав особей скумбрии в виду отсутствия возможности проведения контрольных тралений, выявленные эффекты, бесспорно, требуют дальнейшего тщательного изучения и подтверждения в будущих исследованиях.

Отработанные в рамках комплексного научно-производственного эксперимента «Норвежское море – 97» методы и подходы комплексной обработки и анализа информации легли в основу работ по созданию отраслевой системы мониторинга водных биоресурсов и промыслового флота Росрыболовства [82].

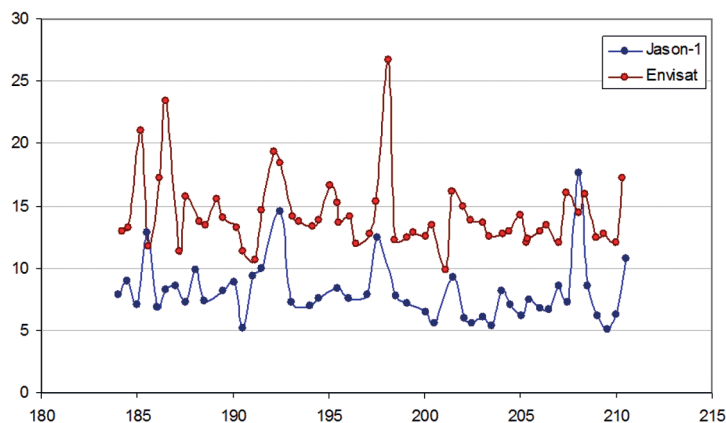
## 6.3 ВЕРИФИКАЦИЯ РЕКОНСТРУКЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Непосредственно оценить качество полученной информации в результате томографической реконструкции по данным сигналов спутниковых низкоорбитальных навигационных и специализированных систем можно путём сравнения с данными от других источников информации об ионосфере, таких как спутниковые альтиметры, ионозонды, а также вертикальные профили ионосферы, полученные от космических систем «просветного зондирования» и радаров некогерентного рассеяния.

На первый взгляд наиболее подходящим источником информации об ионосфере Земли является спутниковый альтиметр. Спутниковый альтиметр, излучающий в надир на частоте  $\sim 13$  ГГц — активный прибор, который установлен на спутниках Jason-1/2, Sentinel-3A/B и др. с высотами орбит от 800 до 1300 км. Альтиметр измеряет временную задержку между испущенным и принятым сигналом, из которого рассчитывается мгновенная высота фазового центра антенны альтиметра над уровнем океана. Для учёта ионосферной задержки сигнала альтиметра используется второй когерентный сигнал на частоте  $\sim 5\text{--}6$  ГГц.

Однако в силу специфики работы прибора оценить полное электронное содержание в надир спутниковый альтиметр может только над акваторией океана.

С другой стороны, в соответствии с работой [121] точность ионосферной поправки альтиметра не превышает 2...3 см. Если пересчитать данную величину в термины полной электронной концентрации вдоль луча распространения сигнала получится, что точность определения электронной концентрации спутниковыми альтиметрами не превышает 5 TECU. На самом деле точность определения полной электронной концентрации спутниковыми альтиметрами может быть и несколько хуже (рисунок 105).

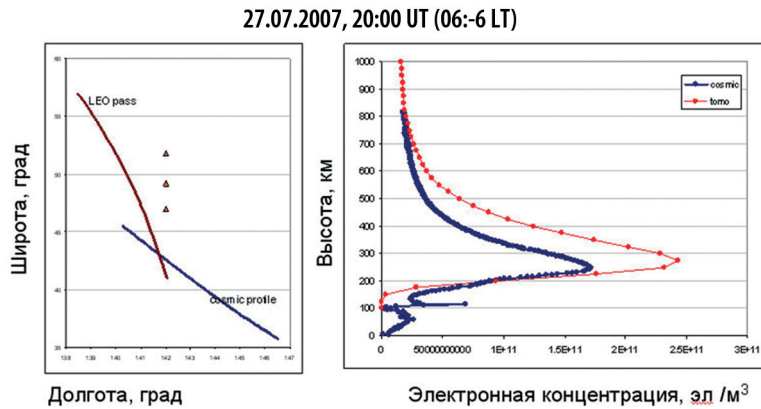


**Рисунок 105.** Временной ход полной электронной концентрации ионосферы в районе залива Терпения, о. Сахалин в июле 2007 г. По оси абсцисс — дни года, по оси ординат — ПЭС, TECU

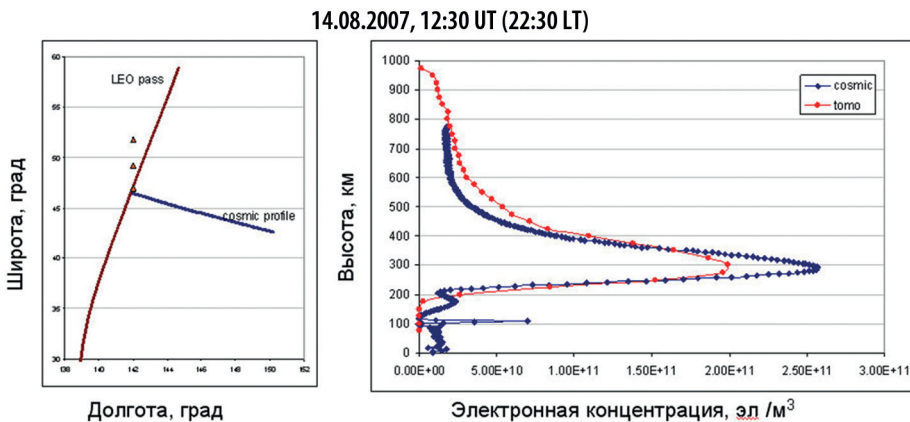
Результат анализа информации со спутниковых альтиметров, установленных на КА Jason-1 и Envisat, для одной точки пространства показал, что абсолютная разница измерений двух альтиметров составляет порядка 10 TECU, что делает использование данных спутниковой альтиметрии затруднительным для верификации.

В 2006 г. была запущена космическая система Formosat-3/COSMIC, являющаяся продолжателем космической миссии экспериментального спутника CHAMP, низкоорбитальные КА которой оснащены приборами для регистрации сигналов системы GPS для осуществления зондирования ионосферы и нижней атмосферы «на просвет» или «лимбового зондирования».

Было проанализировано более 200 профилей электронной концентрации, полученных по данным указанной системы. Наиболее типичные примеры представлены на рисунках 106 и 107. На рисунке 106 представлен профиль электронной концентрации (правая панель), полученной из анализа томограммы (красная кривая), и данных системы COSMIC (синяя кривая) 27.07.2007 в 20:00 по Гринвичу. Аналогично на рисунке 107 представлена информация томограммы и профиль электронной концентрации системы COSMIC 14.08.2007 в 12:30 GMT.



**Рисунок 106.** Профили электронной концентрации по данным томографии и системы COSMIC 27.07.2007



**Рисунок 107.** Профили электронной концентрации по данным томографии и системы COSMIC 14.08.2007

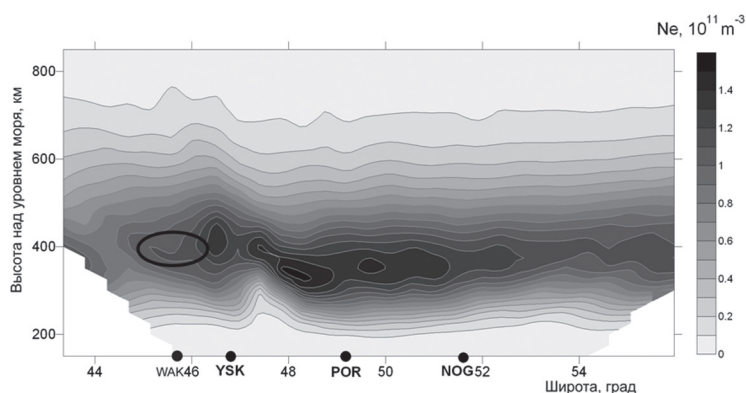
Характер кривых на рисунках показывает, что кривые профилей плохо согласуются друг с другом. Причём на рисунке 106 концентрация максимума по томографии больше, чем на профиле, полученном по данным системы COSMIC, тогда как рисунке 107 представляет обратную ситуацию.

Наиболее вероятная причина подобного несовпадения профилей, рассчитанных на основе информации томографических реконструкций вертикального распределения электронной концентрации по данным навигационных и специализированных низкоорбитальных систем и системой COSMIC, лежит, по всей видимости, в геометрической конфигурации схемы измерений (см. рисунки 106 и 107, левые панели). Коричневыми точками представлен спутниковый трек низкоорбитального навигационного аппарата, а синими точками обозначены проекции на поверхность Земли точек профиля системы COSMIC.

Из рисунков следует, что профиль системы COMIC представляет собой не измерение электронной концентрации в надир, а имеет существенную (~800 км) протяжённость под некоторым углом к поверхности Земли. Поэтому не совсем очевидно, на какой широте из томографической реконструкции следует выбирать вертикальный профиль для сравнения с данными системы COSMIC. На рисунках 106 и 107 взят профиль, соответствующий широте проекции на Землю точки максимума профиля системы COSMIC. Из рисунка видно, что расстояние между сравниваемыми профилями по поверхности Земли превышает 100...150 км, которые составляют пространственный радиус корреляции в ионосфере. Таким образом, к сожалению, данные системы COSMIC также не совсем подходят для верификации информации спутниковой томографии ионосферы.

Следующий этап верификации данных томографии ионосферы связан с анализом данных ионозонда. Необходимо отметить, что ионозонд позволяет оперировать значениями максимума электронной концентрации (значениями критической частоты) и значениями высоты максимума ионосферы.

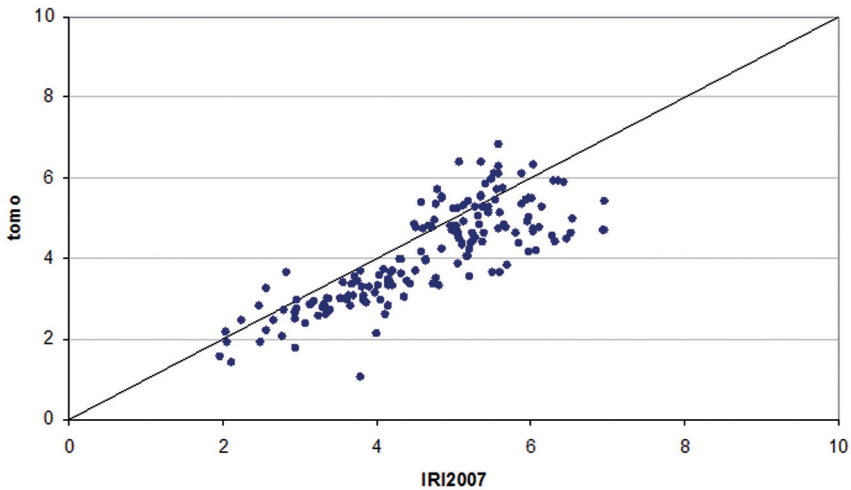
Для верификации абсолютных значений электронной концентрации, получаемых в процессе реконструкции, были использованы данные ионозонда Вакканай (Wakkanai), расположенного на о. Хоккайдо в 150 км к югу от наиболее южной приёмной установки томографической цепочки. Из полученных реконструкций структуры ионосферы вычислялись максимальные значения электронной концентрации для широты, на которой расположен ионозонд (рисунок 108) [122, 123].



**Рисунок 108.** Расположение области получения данных ионозондом на томограмме, выделено овалом (Wak — ионозонд; Ysk, Por, Nog — томографические приёмные установки, по оси абсцисс — расстояние вдоль меридиана 142°, положительные значения отстоят к северу от Южно-Сахалинска, по оси ординат — высота, км)

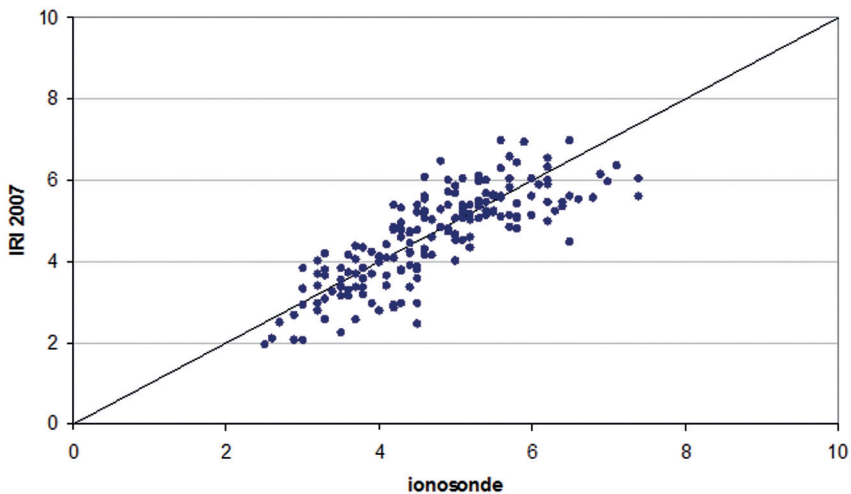
Прежде чем приступить к сравнительному анализу информации спутниковой томографии с данными ионозонда, было бы интересно сравнить данные томографии с моделью ионосферы. Наиболее адекватной моделью ионосферы на момент проведения исследований была модель IRI2007 [124].

В целом видно (рисунок 109), что данные, рассчитанные из реконструкций, неплохо совпадают с моделью, однако данные томографических реконструкций несколько меньше по абсолютной величине соответствующих им значений критической частоты, рассчитанной по модельным представлениям.



**Рисунок 109.** График сравнения критических частот (в МГц), полученных над Вакканаем по данным модели IRI2007 и томографическим реконструкциям электронной концентрации ионосферы

На рисунке 110 представлен результат сравнения данных ионозонда с данными значений критических частот по модели ионосферы IRI2007.

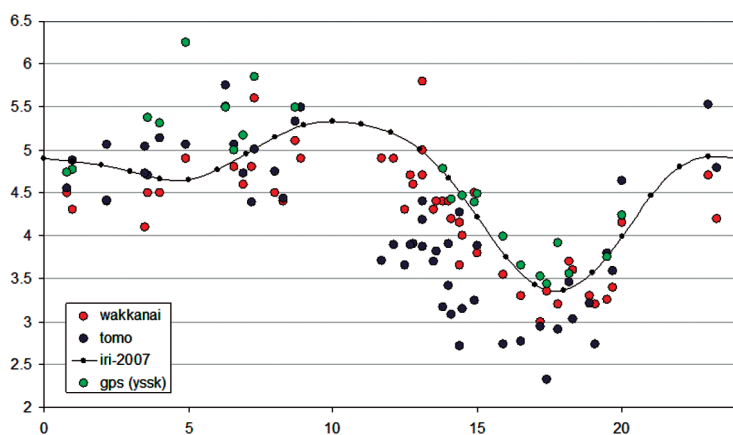


**Рисунок 110.** График сравнения критических частот (в МГц), полученных над Вакканаем по данным модели IRI2007 и ионозонда

Данные ионозонда неплохо соответствуют критическим частотам, рассчитанным по IRI2007, что и не удивительно, поскольку модель, в том числе, строится на основе измерений ионозондов по всему миру.

Тем не менее следует отметить, что дисперсия данных критических частот, рассчитанных на основе томографии и измеренных ионозондом, по отношению к модели ионосферы практически одинакова.

На рисунке 111 представлен суточный ход изменения критической частоты над Вакканаем за период с 23 июля по 14 августа 2007 г., где чёрной кривой отображается суточный ход критической частоты, рассчитанный на основе модели IRI2007, красными точками нанесены значения ионозонда Вакканай, зелёными точками — значения критической частоты, пересчитанные из измерений ПЭС на станции IGS в Южно-Сахалинске, и синими точками — значения критической частоты, полученные из томографических реконструкции высотных распределений электронной концентрации ионосферы.



**Рисунок 111.** Суточный ход изменения критической частоты над Вакканаем (по оси абсцисс — время UTC, по оси ординат — критическая частота  $F_2$ , МГц) в июле 2007 г.

В целом характерная по предыдущему сравнению картина сохраняется. Данные ионозонда лучше соответствуют вариациям кривой критической частоты, рассчитанной по модели IRI2007. Однако необходимо отметить, что в дневные часы данные спутниковой томографии ионосферы не имеют чёткого смещения в область более низких частот, тогда как результаты ночных съёмок лежат несколько ниже модельной информации.

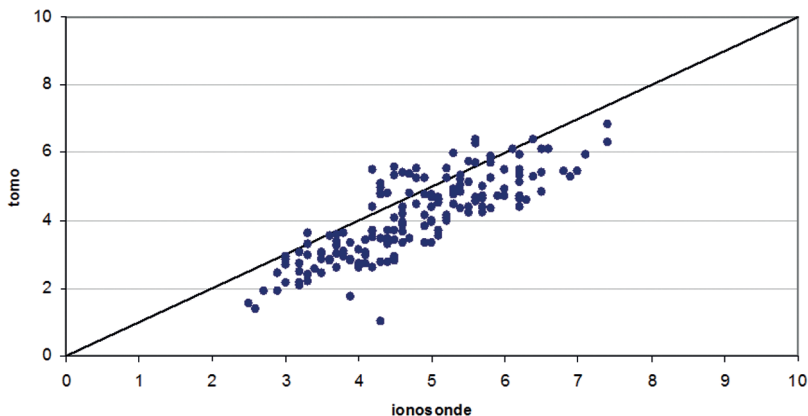
Измерения, полученные на основе анализа сигналов системы GPS, также неплохо согласуются с моделью IRI2007 и несколько хуже с данными ионозонда и томографии в ночное время. В дневное время измерения по данным систем ГЛОНАСС/GPS существенно смещены в область более высоких критических частот, что, по-видимому, связано с возросшей ошибкой расчёта ПЭС по «кодовым» данным в силу усиливающегося шума сигналов из-за влияния солнечной активности на ионосферу Земли.

Проиллюстрируем картину соответствия данных ионозонда Вакканай и критических частот, рассчитанных из томографических реконструкций, более наглядно (рисунок 112, см. с. 201). Средняя невязка (среднее различие) составила 15 %,  $\delta_2 = 0,13$ . Коэффициент корреляции между двумя рядами данных  $R = 0,84$ . То есть результаты определения  $f_oF_2$  двумя различными способами, непосредственными измерениями и решением обратной задачи, хорошо соответствуют друг другу.

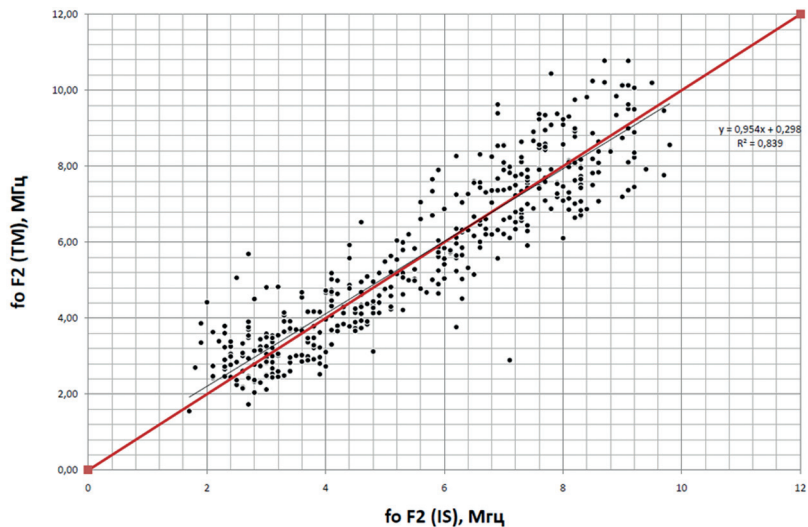


На рисунке 112 видно, что значения критической частоты, полученные на основе томографических реконструкций, лежат в области более низких критических частот, чем данные ионозонда. Следует отметить, что сравниваемые данные могут изначально несколько отличаться друг от друга в силу следующих причин. Во-первых, далеко не всегда время сеанса радиопросвечивания совпадает со временем измерения ионозондом, поэтому почасовые данные  $foF2$ , получаемые ионозондом, были предварительно интерполированы.

Во-вторых, ИСЗ редко проходит над приёмными установками точно в зените. В большинстве случаев проекция его орбиты и, соответственно, область просвечивания слоя максимума электронной концентрации в ионосфере лежит в нескольких десятках или сотнях километров к западу или востоку приёмных установок, в то время как ионозонд измеряет значения критической частоты в зените.



**Рисунок 112.** График сравнения критических частот (в МГц) полученных над Вакканаем по данным ионозонда и томографическим реконструкциям электронной концентрации ионосферы



**Рисунок 113.** График рассеяния для измерений критической частоты  $fo$  максимума слоя  $F2$ , полученных с помощью ионозонда MO155 и томографического мониторинга

Не следует забывать также о погрешностях измерения ионозонда, поскольку значения критической частоты и высоты максимума ионосферы могут быть измерены с существенной ошибкой в силу рефракции сигнала ионозонда на неоднородностях слоя максимума. Кроме того, ошибки могут быть вызваны и несовершенством алгоритмов подбора начального приближения при восстановлении томограмм.

Аналогичные результаты получены при сравнении томографической информации и данных ионозонда ИЗМИРАН МО155 в европейской части Российской Федерации (рисунок 113, см. с. 201).

Из графика видно, что данные по-прежнему достаточно хорошо коррелируют. Средняя невязка составляет 0,79 МГц, а её дисперсия 0,39 МГц.

## 6.4 ПРОЕКТ PRE-EARTHQUAKE

Появление аномальных пространственно временных сигнатур геофизических параметров, предшествующих землетрясениям (от нескольких недель до нескольких дней до наступления события), часто исследуются в литературе в последние годы. Например, ПЭС в ионосфере, которое измеряется плотной сетью специализированных приёмников, реагируя на прохождение акустно-гравитационной волны, генерируемой в процессе подготовки сильного землетрясения, может кратковременно возрастать над регионом подготовки события [125].

Перемещение жидкостей и/или газов, вызванное тектонической активностью, в частности может приводить к геохимическим аномалиям ( $\text{CO}_2$ , радона и др.) и к генерации соответствующих электромагнитных сигналов (изменение электрического поля и сопротивления в среде, ОНЧ/УНЧ (очень-низкочастотное/ультра-низкочастотное) электромагнитное излучение и т.д., например [126]). Заявленные связи между аномальными сигналами и сейсмической активностью долгое время рассматривались научным сообществом с некоторой настороженностью. В основном это происходило вследствие недостаточности данных для валидации, а также наличием других факторов, не связанных с сейсмической активностью (например, метеорологических), которые могли бы привести к возникновению сходных аномалий в исследуемых параметрах.

Тем не менее, сравнительно недавно появилась физическая модель, называемая LAIC (Lithosphere Atmosphere Ionosphere Coupling) [126], в рамках которой предложено связать в единую цепь физических процессов различные геофизические/геохимические параметры (например, тепловые и атмосферные аномалии с сейсмо-ионосферными аномалиями). В этой модели аномальные сигналы в измерениях нескольких различных параметров (например, термоаномалии на поверхности Земли, температура и относительная влажность приземного воздуха, аномальные потоки скрытой теплоты, аномальная облачность, аномалии уходящего длинноволнового излучения, аномалии электронной концентрации ионосферы и т.д.) могут быть объяснены как следствие физических процессов, связанных с подготовительными этапами землетрясения [127].

Тем не менее, до сих пор ни один измеряемый параметр, ни один метод наблюдения не продемонстрировал достаточную надёжность и эффективность для того, чтобы использоваться в системе оперативного предсказания землетрясений. Интеграция различных наблюдений/параметров совместно с совершенствованием методов анализа данных может улучшить фактические знания о подготовительных этапах землетрясений и их возможных предвестниках, снизить количество ложных «срабатываний» и повысить надёжность и точность (в терминах пространства – времени) при диагностировании и оценке сейсмического риска.

В этом контексте проект PRE-Earthquakes (Processing Russian and European Earth Observations for Earthquake Precursors Studies) был поддержан Европейским Союзом в рамках Седьмой рамочной программы в целях:

- значительного улучшения нашего понимания о различных подготовительных фазах землетрясения и его возможных предвестниках;
- обоснования необходимости включения всемирной системы наблюдения землетрясений (Earthquakes Observation System — EQuOS) в качестве одной из специализированных компонент глобальной системы систем наблюдения Земли (Global Earth Observation Satellite System of Systems — GEOSS);
- разработки и предложения международному научному сообществу интеграционной платформы (Pre-Earthquakes Geoportal — PEG) для совместного использования и кросс-валидации различных новых независимых измерений, методик обработки информации, направленных на исследования предвестников землетрясений.

Основная научная цель проекта состояла в исследовании и демонстрации, до какой степени систематическая интеграция независимых наблюдений может улучшить (возможно, до предоперационного уровня точности и надёжности) возможности краткосрочной оценки сейсмического риска, которая в настоящее время базируется в основном на однопараметрических методах наблюдения [127].

Стратегия проекта основывалась на трёх следующих направлениях:

- 1) координация и получение систематических данных, создание продуктов в заранее определённых (стандартизированных) выходных форматах;
- 2) определение и реализация единой интеграционной платформы, где разнородные входные данные могут быть ассимилированы, организованы и подвергнуты сравнению;
- 3) развитие методов сравнения, проверки и совместного анализа данных в целях дальнейшего расширения ряда одновременно наблюдаемых параметров и улучшения качества сбора и анализа данных.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА

Наблюдения 18 различных спутниковых систем (ЕКА и «Роскосмос») с более 100 наземных станций были использованы для изучения аномальных вариаций параметров поверхности и атмосферы (включая ионосферу) Земли, которые в последнее время считаются вероятными предвестниками землетрясений (рисунок 114, см. с. 204) [127].

В начальной фазе проекта разные параметры (от литосферных до ионосферных), измеряемые с помощью различных технологий наблюдений и анализируемые при помощи различных методов, сравнивались для отдельных землетрясений, произошедших в последние годы в Италии (М6.3, Абруццо, 6 апреля 2009 г.), Турции (М6.1, Элазиг, 8 марта 2010 г.) и в России (М6.2, Невельск, 2 августа 2007 г.) (рисунок 115, см. с. 205). Вышеперечисленные регионы были выбраны в качестве районов первоначального тестирования на фазе обсуждения заявки проекта. Недавние землетрясения, которые произошли в Японии (Тохоку) и Турции (Ван) были также включены в перечень исследуемых событий проекта [127].

В рамках проекта были полностью реализованы технологии автоматизированной обработки данных и создания тематических продуктов (см. рисунок 114) для семи наблюдаемых параметров с использованием 20 независимых технологий наблюдений, 11 методологий анализа данных для трёх тестовых

регионов и для 24 различных тестовых временных периодов. Таким образом, база знаний проекта включает в себя набор из 3000 различных комбинаций параметров, технологий измерения, методов анализа данных, а также районов и периодов исследований, что отражает текущие возможности мониторинга предвестников землетрясений. Потенциал интеграции анализа различных параметров продемонстрирован на примере более 1700 различных сравнений, выполненных с использованием всевозможных параметров, измерительных технологий и методов анализа данных.

	Параметры	Инструменты	Источник	Методология - Партнер	Продукты	
Ионосфера	ПЭС (Полное электронное содержание)	Метеор-М/ТГАК	Роскосмос	Алгоритм корреляции [4, 5, 6] - ИПГ	Карты магнитосферной плазмы и ионосферные аномалии ПЭС	
		GPS	IGS ESA	PKC		Дифференциальный алгоритм [6] - ИЗМИРАН
			IGS ESA			Алгоритм вычисления ПЭС по данным GPS [7] - DLR
			IGS ESA	PKC		Алгоритм восстановления вертикального ПЭС [8]; Алгоритм создания карт ПЭС; Алгоритм дифференциального преобразования; Алгоритм расчета ГЭС [9]; Алгоритм расчета волнового возмущения [10]; Числовое моделирование - ИЗМИРАН
		ГЛОНАСС	Роскосмос	Алгоритм дифференциального преобразования; Алгоритм расчета ГЭС [9]; Алгоритм расчета волнового возмущения [10]; Числовое моделирование - ИЗМИРАН		
		GALILEO и EGNOS	ESA			
	FORMOSAT-3/ COSMIC	UCAR	Алгоритм анализа профилей системы COSMIC - ИЗМИРАН	Вертикальные профили электронной концентрации ионосферы		
	CHAMP	GFZ Potsdam	Радиозатменное зондирование [11, 12, 13] - DLR			
	GRACE	NASA GFZ Potsdam				
	Космос 2407 Космос 2414 Космос 2429 Космос 2454	Роскосмос	Технология восстановления вертикального распределения электронной концентрации ионосферы [14] - РКС			
Приповерхностная низкая атмосфера	Солнечная отраженное, ИК излучение Земли	Метеор-М/МСУ-МР	Роскосмос	Алгоритм обнаружения облаков. Визуальный контроль - РКС	Идентифицированные аномалии облачных структур	
	MW тепловое излучение	Метеор-М/МТВЗА	Роскосмос	Методики обратного преобразования - ИПГ	Профили температуры и влажности	
	ИК излучение Земли	MSG/SEVIRI	ESA	RST технология [1, 2, 3] - UNIBAS	Карты RETIRA индекса, теплового инфракрасного излучения	
		EOS/MODIS	NASA			
Визуальные-околоинфракрасные спектральные характеристики	Ресурс-ДК/Геотон-1	Роскосмос	Визуальное определение, экспертная и не экспертная классификации - UNIBAS	Карты земной поверхности		
Литосфера	Концентрация земного радона	Станции определения радона	TUBITAK MAM-EMSI NETWORK	Анализ временных рядов данных [15] - TUBITAK MAM	Аномалии концентрации радона	
	Магнитные и электрические поля, электрическое удельное сопротивление	Постоянные станции	UNIBAS IMAA-CNR	Анализ временных рядов данных [16] - UNIBAS	Профили электрического удельного сопротивления 0-10 км.	

Рисунок 114. Перечень инструментов и наблюдаемых параметров в рамках проекта PRE-Earthquakes [127]

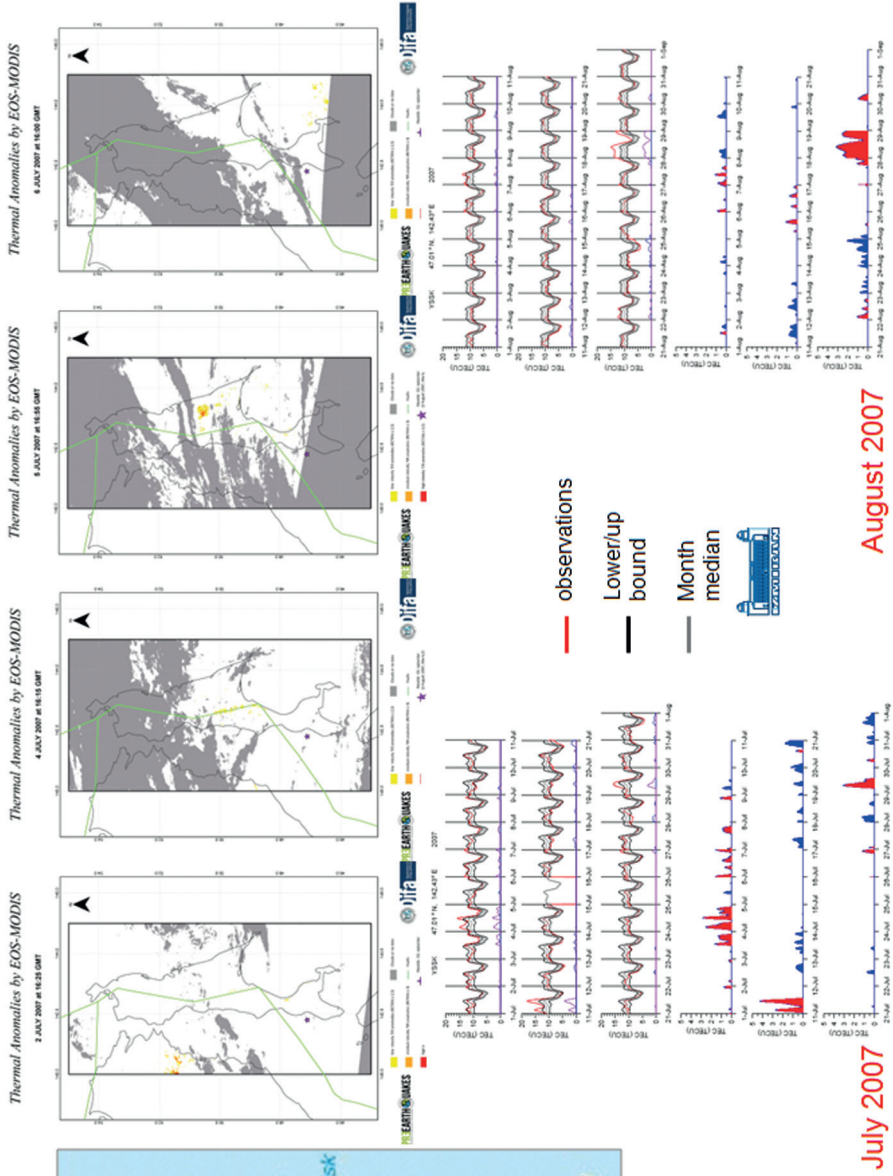
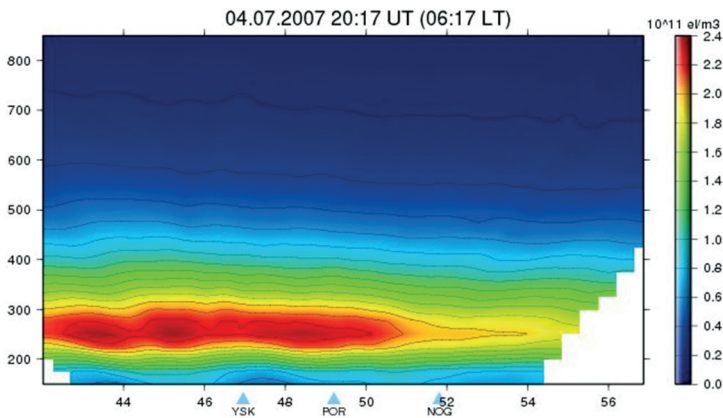


Рисунок 115. Совместный анализ информации для события на о. Сахалин в 2007 г.

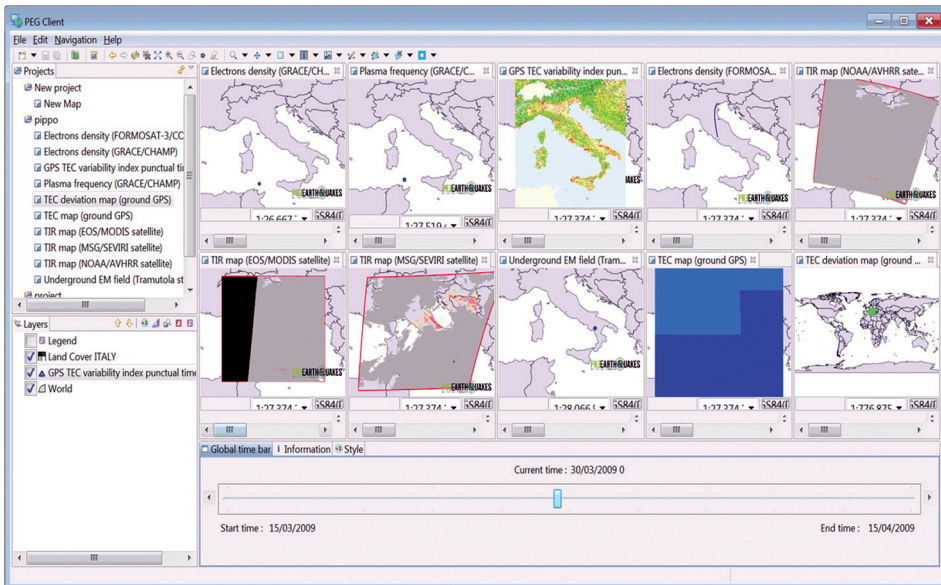


Пример реконструкции высотного распределения электронной концентрации в ионосфере, применяемого в рамках проекта, представлен на рисунке 116. Соответствующая база данных распределений была сформирована в рамках PEG.

PEG — общая платформа (рисунок 117), предназначенная для обмена, сравнения и кросс-валидации независимых наблюдений, технологий и методик обработки и анализа информации, была разработана и внедрена в процесс научной поддержки интерпретации разнородных продуктов, которые формируются членами исследовательского консорциума проекта. Исследовательский консорциум не ограничивается первоначальными членами проекта PRE-Earthquakes, он также включает себя новых участников, присоединившихся к проекту в рамках инициативы EQuOS (система наблюдения землетрясений).



**Рисунок 116.** Пример вертикального распределения электронной концентрации ионосферы над о. Сахалин (Россия). По горизонтали: географическая долгота (в град), по вертикали высота (в км)



**Рисунок 117.** Пример интерфейса платформы PEG [127]



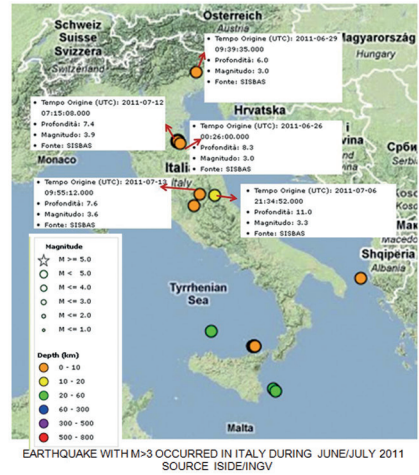
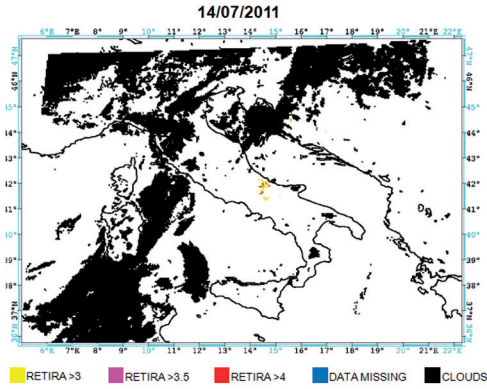


Рисунок 118. Пример анализа предвестников землетрясений перед событием в Италии в 2011 г. [127]

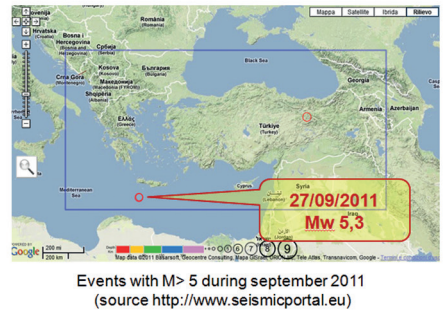
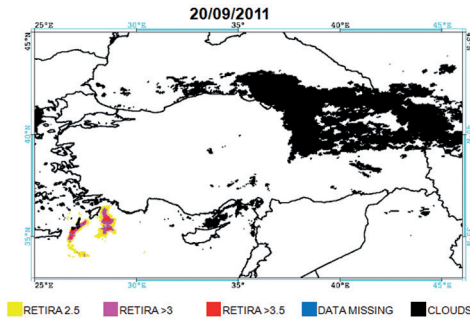


Рисунок 119. Пример анализа предвестников перед событием в Средиземном море в 2011 г. [127]

На последнем этапе реализации PRE-Earthquakes был проведён эксперимент по мониторингу предвестников землетрясений в реальном масштабе времени с использованием всех технологических возможностей проекта. Области первоначальных исследований были значительно расширены на территории Греции и Турции в Европе, а также на п-ов Камчатка и Японию в Азии (рисунки 118 и 119).

## ГЛАВА 7

# ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЗ

Прежде чем приступить к изучению основных методов улучшения качества изображений, получаемых системами ДЗ, сделаем несколько важных замечаний, помогающих лучше понять суть изучаемого раздела. В сущности, основная цель применения рассматриваемых ниже процедур обработки изображений сводится к повышению интерпретируемости конкретного снимка ДЗ. В первую очередь, это нацелено на обеспечение возможностей более качественного восприятия изображения человеческим глазом. Методики, используемые при этом, зависят от нескольких обстоятельств:

- Собственно имеющихся в наличии ДДЗ (изображений спутников SPOT (Systeme Probatoire d'Observation de la Terre), Landsat, NOAA, ERS, Sentinel и т. д.). При этом ещё до выполнения процедур обработки необходимо точно знать характеристики спутникового прибора, которым эти данные получены (количество спектральных диапазонов, их границы, пространственное разрешение, геометрия съёмки и т. п.).
- Целей обработки — например, выделения резких границ в изображении для идентификации конкретных явлений, которые впоследствии могут быть отобраны в качестве обучающей выборки в процедурах классификации. Подобная операция может потребовать применения различных процедур, уменьшающих количество используемых спектральных диапазонов. Как уже было показано выше, априорное знание спектральной информативности объектов на подстилающей поверхности позволяет грамотно выбрать подходящий спектральный канал для ДЗ, значительно уменьшив объём обрабатываемых данных. Необходимо также иметь чёткое представление об окончательном виде желаемого информационного продукта до того, как выполняются процедуры обработки.
- Ваших ожиданий — что вы предполагаете обнаружить в конечном информационном продукте.
- Вашего предшествующего опыта — опыта аналитика, выполняющего обработку изображений.

В данном разделе будут представлены и кратко обсуждены некоторые основные понятия и базовые процедуры обработки данных ДЗ, представленные в программных продуктах интерактивной обработки информации ДЗ.

### 7.1

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Изображение — это двумерное представление объектов, существующих в реальном мире. Изображения ДЗ — двумерные плоские представления частей земной поверхности так, как они видятся из космоса. В зависимости от способа получения изображения ДЗ могут быть *аналоговые* или *цифровые*. Аэрофотографии представляют собой примеры аналоговых изображений, в то

время как спутниковые снимки, получаемые электронными датчиками — примеры цифровых изображений.

Цифровое изображение (рисунок 120) представляет собой двумерное множество индивидуальных элементов отображаемой картины, называемых пикселями, упорядоченных в строках и столбцах. Каждый пиксель отображает некоторую площадь на поверхности Земли и характеризуется значением интенсивности и адресом местоположения в двумерном изображении.

*Интенсивность* каждого пикселя оцифровывается и записывается в память компьютера как определенное число, представляемое набором двоичных цифр, кратных  $2^N$ . Количество разрядов — бит квантования  $N$  определяет *радиометрическое разрешение* изображения. Например, любое 8-разрядное число расположится в диапазоне от 0 до 255 (т.е.  $2^8 - 1$ ). Зарегистрированное приёмником значение интенсивности должно быть масштабировано и квантовано так, чтобы по возможности заполнить весь этот диапазон. В *радиометрически калиброванном* изображении из цифрового значения пикселя может быть получено фактическое значение его интенсивности.

*Адрес* каждого пикселя задаётся координатами конкретных строк и столбцов изображения.

Для создания двумерного изображения при ДЗ используется пространственное сканирование — последовательный просмотр исследуемой яркостной сцены на подстилающей поверхности чувствительными приёмниками излучения. В случае одноэлементной регистрирующей системы, когда в качестве чувствительного детектора используется одноэлементный фотоприёмник, сканирование осуществляется системой зеркал механически. При этом вращение зеркала обеспечивает развёртку изображения поперёк трассы полёта. Сканирование по направлению полёта осуществляется перемещением спутника по орбите (см. рисунок 45).

Способ сканирования подстилающей поверхности многоэлементной линейкой приёмников, когда вся строка изображения экспонируется всеми приёмными элементами линейки одновременно, показана на рисунке 121.

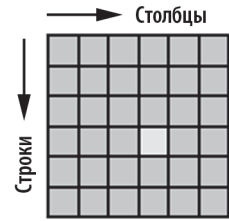


Рисунок 120. Структура цифрового изображения

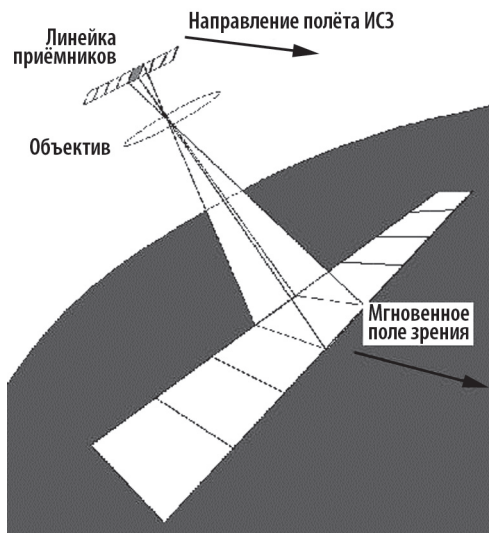
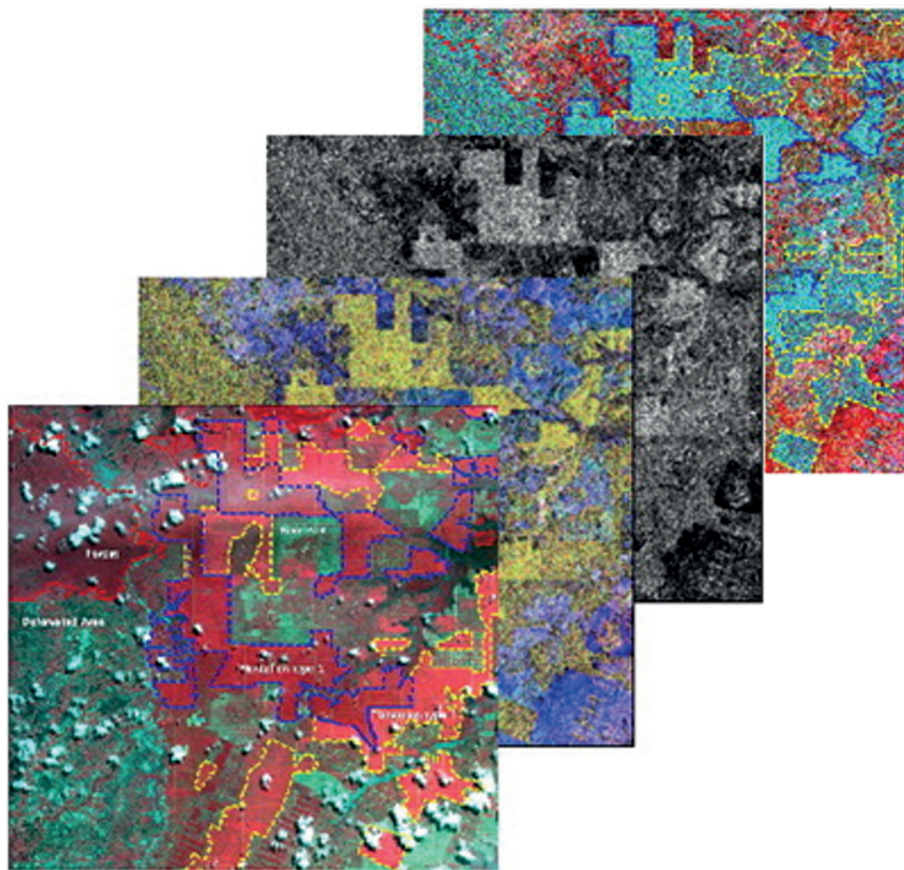


Рисунок 121. Сканирование линейкой многоэлементных приёмников

От участка наблюдаемой поверхности, накрытого единственным пикселем, могут быть получены одновременно несколько измерений в различных спектральных каналах. Каждое независимое измерение формирует образ, несущий вполне определённую информацию относительно отображаемой области. «Сложением» таких изображений от одной и той же области вместе может быть сформировано *многослойное изображение* (рисунок 122), где каждое составляющее изображение представляет собой отдельный слой.



**Рисунок 122.** Иллюстрация многослойного изображения, состоящего из пяти составляющих слоёв

Например, датчик HRV (High Resolution Visible) спутника SPOT, работавший в мультиспектральном режиме, регистрировал излучение в трёх спектральных каналах: зелёном (500...590 нм), красном (610...680 нм) и NIR (790...890 нм). Таким образом, любая мультиспектральная сцена SPOT состояла из трёх изображений различной интенсивности, измеренных в трёх спектральных каналах. В этом случае каждый пиксель сцены имел три значения интенсивности, соответствующие трём спектральным каналам.

Многослойные изображения могут быть сформированы и внутри ГИС объединением изображений, полученных не только от различных спутниковых датчиков, но и из других вспомогательных источников данных. Например, многослойное ГИС изображение может состоять из трёх слоёв различных океанографических параметров: слоя изображения спутника NOAA с ТПО, слоя



изображения радара с синтезированной апертурой Sentinel-1 и, возможно, слоя, состоящего из карты динамической топографии морской поверхности, полученной по данным спутникового альтиметра Sentinel-3.

## РАЗРЕШЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЗ

*Разрешение* — это достаточно многозначный термин, обычно используемый для описания различных характеристик и свойств изображений. Для адекватного представления ДДЗ необходимо дать определение, по меньшей мере, четырёх типов разрешения [128]:

*Спектральное* — задающее специфические интервалы длин волн, регистрируемые спутниковым сенсором ДЗ.

*Пространственное* — определяет площадь на земной поверхности, отображаемую каждым пикселем изображения.

*Радиометрическое* — отображается числом бит, на которые разделена зарегистрированная спутниковым прибором энергия. Однозначно определяет возможное количество данных в цифровом файле, содержащем данные каждого спектрального диапазона.

*Временное* — характеризует частоту, с которой спутниковый датчик ДЗ получает изображение одной и той же заданной области наблюдения.

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Термин *пространственное разрешение* относится к размеру наименьшего объекта, который может быть обнаружен на изображении поверхности Земли. В цифровом изображении пространственное разрешение ограничено *мгновенным полем зрения* сенсора, отображающим площадь на земной поверхности, наблюдаемую отдельным элементом приёмного устройства в данный момент времени. Часто пространственное разрешение отождествляют с мгновенным полем зрения датчика, хотя оно не всегда представляет площадь одного пикселя, например, при сканировании соседних строк с перекрытием.

Определённое таким образом разрешение может быть ухудшено различными факторами, в частности «размытием» изображения из-за плохой фокусировки оптической системы, влиянием атмосферы или движением наблюдаемого объекта.

Из оптики известно, что минимальный угловой размер объекта  $\theta$ , разрешаемый фокусирующей оптической системой, зависит от диаметра объектива  $D$ , длины волны собираемого излучения  $\lambda$  и задаётся соотношением:

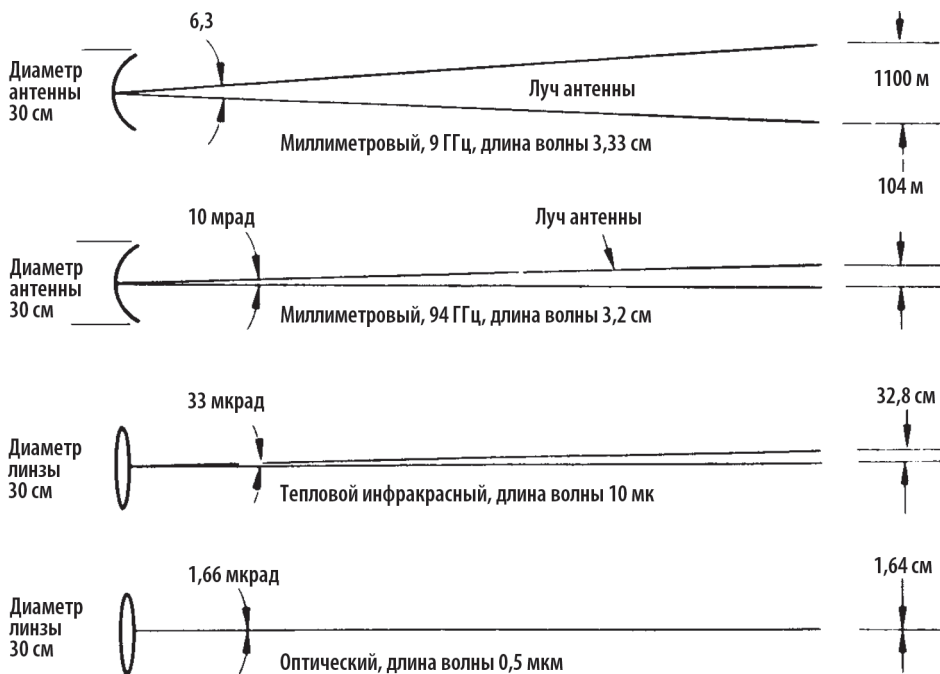
$$\theta = \frac{\lambda}{D}. \quad (64)$$

На рисунке 123 (см. с. 212) представлены размеры минимальных элементов разрешения, получаемых фокусирующими системами ДЗ в различных диапазонах спектра электромагнитного излучения при одинаковом диаметре фокусирующих устройств с расстояния 10 км. Видно, что при одинаковом геометрическом размере фокусирующей системы лучшее пространственное разрешение обеспечивается в оптическом диапазоне, а худшее в микроволновом.

Понятие *изображение высокого разрешения* относится к снимку с малым размером пикселя. В таком изображении могут быть различимы самые мелкие детали.

С другой стороны, *изображение низкого разрешения* характеризует снимок с большим размером пикселя, в котором могут наблюдаться только самые грубые особенности.

Три изображения, представленные на рисунках 124–126, иллюстрируют обсуждённые выше понятия. Первое изображение 10-метрового разрешения — панхроматическое изображение спутника SPOT с размером пикселя 10 м. Затем это изображение обработано так, что разрешение было ухудшено при сохранении того же самого размера пикселя. Следующие два изображения — смазанные версии с худшим размером элемента разрешения, но с тем же самым размером пикселя 10 м.



**Рисунок 123.** Зависимость минимального элемента разрешения от длины волны



**Рисунок 124.** 10-метровое разрешение, размер пикселя 10 м



**Рисунок 125.** 30-метровое разрешение, размер пикселя 10 м





**Рисунок 126.** 80-метровое разрешение, размер пикселя 10 м

Следующие снимки (рисунки 127–130) иллюстрируют влияние размера пикселя на визуальное качество изображения. Первый снимок — панхроматическое изображение SPOT с размером пикселя 10 м. Последующие снимки показывают влияние оцифровки той же самой области с большим размером пикселя.



**Рисунок 127.** Размер пикселя 10 м. Ширина изображения 160 пикселей, высота 160 пикселей



**Рисунок 128.** Размер пикселя 20 м. Ширина изображения 80 пикселей, высота 80 пикселей



**Рисунок 129.** Размер пикселя 40 м. Ширина изображения 40 пикселей, высота 40 пикселей



**Рисунок 130.** Размер пикселя 80 м. Ширина изображения 20 пикселей, высота 20 пикселей

## РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Термин *радиометрическое разрешение* относится к наименьшему изменению в уровне интенсивности, которое может быть обнаружено спутниковой системой детектирования сигнала. Свойственное системам ДЗ радиометрическое разрешение зависит от отношения сигнал/шум приёмного устройства датчика. При этом уровень шума, как правило, определяет минимальную регистрируемую интенсивность сигнала. В цифровом изображении радиометрическое разрешение ограничено количеством дискретных уровней квантования, использованных при оцифровке непрерывного аналогового значения интенсивности, превышающего уровень шумов.

Снимки на рисунках 131–136 иллюстрируют влияние количества уровней квантования на качество зрительного восприятия цифрового изображения. Первый снимок — панхроматическое изображение SPOT, отображает 8-разрядное квантование (т. е. 256 уровней) в пикселе. Последующие снимки представляют влияние ухудшения радиометрического разрешения, обусловленное меньшим количеством уровней квантования.

Необходимо отметить, что использование малого числа уровней квантования не очень затрагивает визуальное качество изображения. Даже оцифровка с четырьмя разрядами (16 уровней) кажется вполне приемлемой. Однако если изображение предполагается быть подвергнутым цифровому анализу, точность анализа при таком квантовании будет очень низка.

Количество цифровых данных в мультиспектральных снимках потенциально может быть достаточно большим, поскольку отображаемая этими снимками область одновременно покрыта данными в нескольких диапазонах спектра электромагнитных волн.



**Рисунок 131.** 8-разрядное квантование (256 уровней)



**Рисунок 132.** 6-разрядное квантование (64 уровня)



**Рисунок 133.** 4-разрядное квантование (16 уровней)





Рисунок 134. 3-разрядное квантование (8 уровней)

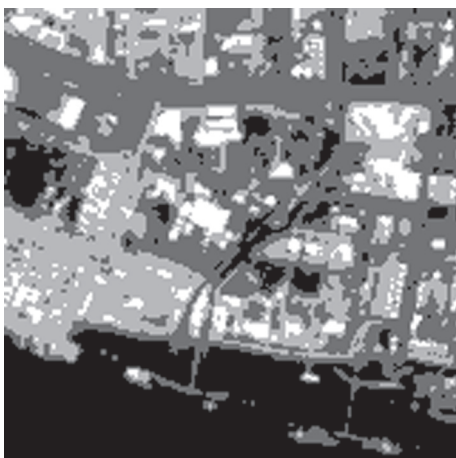


Рисунок 135. 2-разрядное квантование (4 уровня)

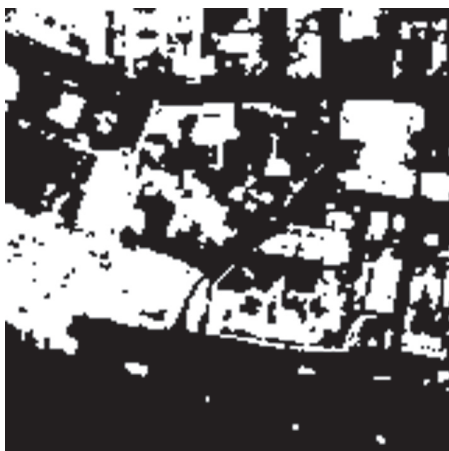


Рисунок 136. 1-разрядное квантование (2 уровня)



Например, трёхканальное мультиспектральное изображение спутника SPOT охватывает область на поверхности Земли площадью приблизительно  $60 \times 60$  км с размером пикселя 20 м. Следовательно, в таком изображении имеется приблизительно  $3000 \times 3000$  пикселей. Интенсивность каждого пикселя в каждом спектральном канале задаётся 8-разрядным кодом (1 байт), что приводит к общему объёму данных в одном изображении порядка 27 Мбайт.

Для сравнения, панхроматический режим имеет только один спектральный канал и обычно обеспечивает более высокое пространственное разрешение, чем многоспектральный. Данное обстоятельство объясняется существенно большей энергией, регистрируемой в широком спектральном диапазоне, по сравнению с энергией узких спектральных каналов.

С другой стороны, использование нескольких спектральных каналов даже при ухудшенном пространственном разрешении увеличивает количество регистрируемых данных. Например, панхроматический снимок SPOT имеет такое же пространственное покрытие  $60 \times 60$  км, что и многоспектральный, но размер пикселя 10 м и общее количество данных порядка 36 Мбайт на сцену. Если мультиспектральное изображение SPOT также оцифровать при размере пикселя 10 м, объём данных составил бы 108 Мбайт.

Изображения, получаемые системами ДЗ, передаются на Землю по каналам связи. Полоса частот телекоммуникационного канала задаёт ограничение на объём передаваемых данных. В зависимости от решаемой задачи высокое пространственное разрешение может стать серьёзным ограничением при одновременном использовании нескольких спектральных каналов. Уменьшение числа используемых спектральных каналов при сохранении необходимого отношения сигнал/шум позволяет повысить пространственное разрешение в изображениях ДЗ.

## 7.2 ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В последние годы разработано множество методов обработки и анализа изображений ДЗ, позволяющих улучшить их интерпретацию и иметь возможность извлекать всю полезную информацию. Выбор определённых методов или алгоритмов зависит от конкретных целей и решаемых задач. В данном разделе мы кратко проанализируем только некоторые процедуры, обычно используемые при анализе и интерпретации изображений ДЗ.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА И УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Прежде чем приступить к анализу полученных данных ДЗ, сначала обычно выполняется *предварительная обработка* «сырых» данных, направленная на исправление любых искажений, обусловленных как характеристиками системы получения изображения, так и условиями, при которых они получены. Под «сырыми» понимается телеметрический поток данных в том виде, в каком они получены по каналу связи наземной станцией приёма.

Основные процедуры предварительной обработки включают *радиометрическую* и *геометрическую* коррекции. Изображение также может быть преобразовано в определённую картографическую проекцию. Более того, если должно быть известно точное географическое местоположение исследуемой области на изображении, для преобразования изображения в точную карту (*геокодирования*) используются опорные наземные контрольные точки.

*Радиометрическая коррекция* направлена на исправления изменений в интенсивности пикселя, которые не присутствуют в сканируемой яркостной сцене на земной поверхности, а являются следствием проявления некоторых свойств детектирующего устройства датчика ДЗ. К таким свойствам относятся:

- неоднородность чувствительности или неправильная работа фотоприёмников;
- влияние атмосферы.

*Геометрическая коррекция* применяется для устранения ошибок, связанных с относительным положением пикселей в изображении. Подобные ошибки включают:

- геометрию зондирования сенсора;
- вариации кривизны земной поверхности.

Для улучшения визуальной интерпретации зрительное проявление объектов в изображении может быть улучшено различными методами *повышения качества изображения* типа *контрастирования* или *пространственной фильтрации*.

При компьютерной обработке улучшение визуального качества изображения тесно связано с задачей извлечения информации из изображения. Пусть, например, процедура улучшения качества производит подчёркивание границ объектов в исследуемом изображении путём высокочастотной фильтрации. Обработанное изображение затем вводится в компьютер, который уже автоматически прослеживает контуры объекта, определяет его форму и размеры [129].

Каждое новое поколение датчиков дистанционного зондирования обладает улучшенными техническими характеристиками, что приводит к улучшению качества получаемого изображения ДЗ по сравнению с предыдущими прототипами. Вместе с тем, некоторые технические несовершенства остаются даже в новейших разработках и, следовательно, их необходимо устранять применением соответствующих математических методов. Пространственные искажения, в частности связанные с кривизной и вращением Земли, также приводят к ухудшению качества изображения и требуют коррекции.

Поскольку механизмы рассматриваемых типов коррекции различаются для пассивных оптических и активных радиолокационных сенсоров, соответствующие алгоритмы будут рассмотрены отдельно друг от друга.

## РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Полосатость* — проявляется в изображении из-за неоднородности чувствительности соседних фотоприёмников в многоэлементном детекторе, приводящей к тому, что яркость изображения, формируемая однородной сценой, создаёт различный по уровню электрический сигнал в разных фотоприёмниках.

К сожалению, полосатость не является систематической погрешностью, и переменный отклик фотоприёмников представляет собой сложную функцию регистрируемых яркостей. Основными процедурами коррекции подобных искажений являются построчное выравнивание, высокочастотная фильтрация и итерационное преобразование методом главных компонент.

Другое распространённое искажение, возникающее в изображениях ДЗ — *пропадание строк*, что является следствием неисправности одного или нескольких элементов многоэлементного фотоприёмника. Обычно подобное искажение корректируется заменой плохой строки на комбинацию предыдущей и последующей строк изображения.

Строго говоря, *влияние атмосферы* — это не ошибка ДДЗ, поскольку атмосферные эффекты дают вклад собственно в яркостный сигнал, регистрируемый

системой ДЗ. Тем не менее, устранение влияния атмосферы — очень важная процедура радиометрической коррекции, особенно для мультиспектральных изображений.

В последнее двадцатилетие разработано множество алгоритмов коррекции атмосферного пропускания. Рассмотрим четыре основных типа:

- вычитание уровня чёрного;
- преобразование излучения в отражательную способность;
- регрессионный анализ (линейная регрессия);
- использование моделей атмосферы.

## ВЫЧИТАНИЕ УРОВНЯ ЧЁРНОГО

Физический смысл алгоритма заключается в том, что элемент изображения минимальной яркости должен иметь нулевое цифровое значение, и, следовательно, ненулевой уровень интенсивности такого элемента обусловлен вкладом атмосферы в реальный сигнал яркостной сцены, рассматриваемый как аддитивная погрешность. Затем, вычитая из интенсивности каждого элемента изображения ненулевую интенсивность элемента с минимальной яркостью, проводится атмосферная коррекция. Вместе с тем, в ряде работ разных исследователей отмечается, что подобное предположение не совсем верно и этот метод может приводить к ухудшению качества изображения вместо его улучшения.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОТРАЖАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ

Для проведения данного преобразования необходимо знать точное значение отражательной способности по крайней мере двух целей в изображении. Это можно сделать либо прямым измерением на подспутниковом полигоне, либо использованием табличных значений, если материал, из которого состоит цель, может быть идентифицирован по изображению. Затем экстраполяцией или интерполяцией рассчитываются значения отражательной способности остальных элементов изображения. Таким образом, фактически одновременно проводится абсолютная калибровка соответствующих физических величин — коэффициентов отражения и, соответственно, устранение влияния атмосферы.

## РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ (ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ)

В используемых на практике алгоритмах атмосферной коррекции применяются также различные методы регрессионного анализа. В частности, строится график зависимости интенсивности пикселей в двух спектральных диапазонах в предположении, что положение каждого пикселя на графике зависит от освещённости. Затем методом наименьших квадратов проводится регрессионная прямая, наклон которой приравнивается к относительной отражательной способности для двух спектральных диапазонов. При нулевой освещённости регрессионная прямая должна проходить через нуль. Любое смещение прямой от нуля представляет собой аддитивный вклад влияния атмосферы, является систематической погрешностью и, следовательно, может быть учтено.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

Коэффициент пропускания атмосферы может быть рассчитан эмпирически по моделям, учитывающим влияние поглощения и рассеяния электромагнитного излучения различными компонентами как газовыми, так и аэро-

зольными. Данный метод требует больших затрат компьютерного времени, прямо зависящих от спектрального разрешения. Наиболее известны модели LOWTRAN (Low resolution atmospheric transmittance) или MODTRAN (Moderate resolution atmospheric transmittance) [130]. В качестве входных данных для таких моделей используются реальные атмосферные профили (давление, температура, содержание водяного пара, озон и т.п.), типы аэрозоля, рельеф подстилающей поверхности, солнечный зенитный угол и геометрия зондирования датчика ДЗ.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ

Как уже отмечалось, геометрическая коррекция применяется к сырым данным для устранения погрешностей, связанных с кривизной Земли и движением датчика ДЗ. Сегодня некоторые из этих ошибок устраняются прямо на наземных приёмных станциях. Для архивных же данных эти коррекции необходимо проводить заново.

Многие сенсоры ДЗ осуществляют визирование яркостной сцены не в надир, а под углом к местной вертикали. Для ряда применений, таких как создание стереопар или цифровых моделей рельефа, подобная геометрия представляет существенные преимущества. Для других — это мешающий фактор.

Более того, даже в случае визирования вертикально вниз реально в надире находится только центральная часть сцены. Другие пиксели, особенно на периферии снимка, визируются не в надир. Для радиометров типа AVHRR, полоса захвата которых составляет примерно 3000 км, это становится значимой проблемой. Так, размер пикселя, обусловленный рассмотренной причиной, изменяется от  $1,1 \times 1,1$  км в центре сцены до примерно  $3,3 \times 4,4$  км на краю.

Одним из главных недостатков систем механического сканирования является наличие геометрических искажений наблюдаемых объектов из-за инерционности механики и отличающейся геометрии визирования на краю и в центре скана.

Геометрические искажения, возникающие при механическом сканировании различных объектов на подстилающей поверхности, иллюстрируются на рисунке 137. Видно, что за счёт перемещения спутника и конечного времени развёртки различные пространственные объекты искажаются по-разному.

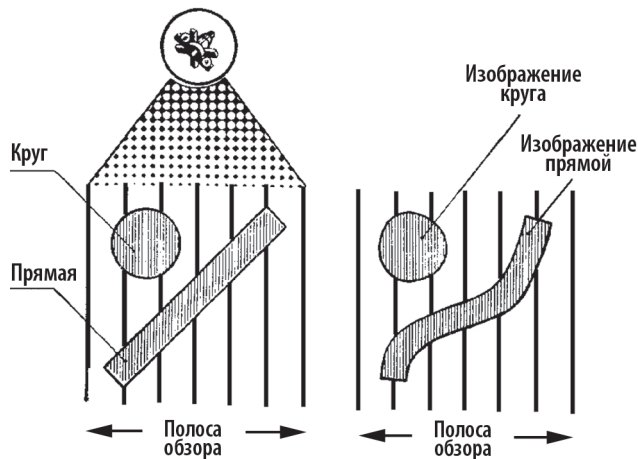
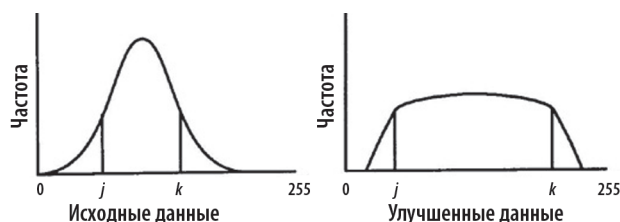


Рисунок 137. Геометрические искажения изображения, обусловленные механическим сканированием

Процедуры радиометрического улучшения качества изображения производятся с каждым индивидуальным пикселем изображения. Этим алгоритмы радиометрического улучшения качества принципиально отличаются от алгоритмов пространственного улучшения качества, в которых учитывается влияние соседних элементов изображения. Необходимо отметить, что алгоритмы радиометрического улучшения качества изображений, применённые к пикселям одного спектрального канала, не всегда подходят для других спектральных каналов того же самого изображения. Таким образом, радиометрическое улучшение качества многоспектрального изображения ДЗ принято рассматривать как последовательность независимых, одноканальных процедур, которые не сохраняют контраст каждого пикселя в исходном изображении. После применения процедур улучшения визуального качества для некоторых пикселей изображения контраст может быть потерян, а для некоторых усилен.

На рисунке 138 видно, что диапазон исходных данных, заданный интервалом  $j$  и  $k$  на левой гистограмме, составляет одну треть всего диапазона исходных данных. Когда к этому интервалу данных применена процедура радиометрического улучшения качества изображения, диапазон данных между  $j$  и  $k$  может расшириться. За счёт этого у пикселей между  $j$  и  $k$  контраст усилится и разницу в яркостях этих пикселей станет различать легче. Вместе с тем пиксели вне рассматриваемого диапазона станут сгруппированы сильнее, чем в исходной гистограмме. Контраст между этими пикселями будет потерян.



**Рисунок 138.** Гистограммы данных до (слева) и после (справа) радиометрического улучшения качества изображения

## РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

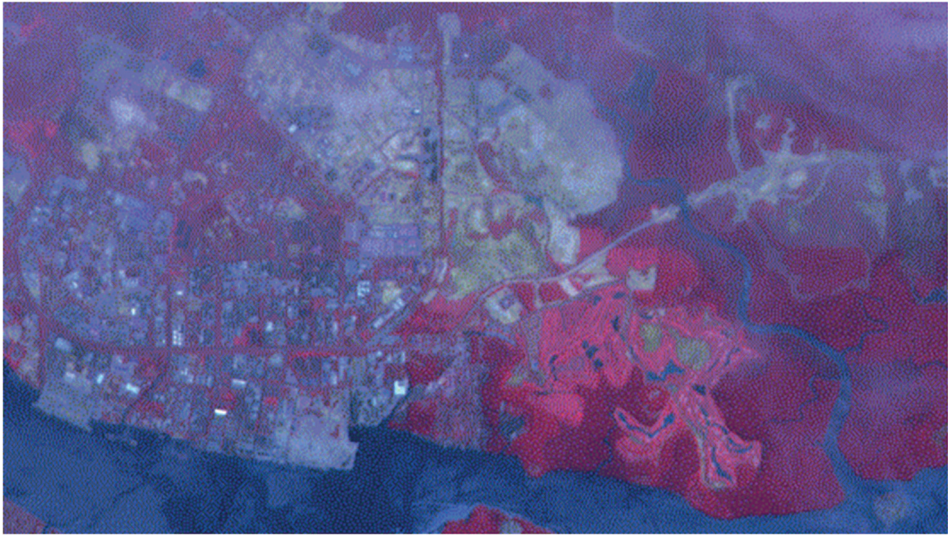
В данном разделе кратко рассмотрим следующие методы радиометрического улучшения качества изображений:

- контрастное растяжение — линейное, нелинейное и кусочно-линейное;
- гистограммную эквализацию — перераспределение значений пикселей в заданном диапазоне;
- гистограммное соответствие — поддиапазонное согласование значений гистограмм;
- инверсию изображения — создание изображения, контраст которого противоположен контрасту исходного изображения.

Слабый контраст — наиболее распространённый дефект в исходных «сырых» изображениях ДЗ. Далее мы объясним причину возникновения подобного дефекта, а сначала рассмотрим формальные алгоритмы изменения контраста в цифровом изображении.

На всём снимке (рисунок 139) может быть замечен белёсый оттенок, производящий эффект затуманивания. Это обусловлено рассеянием солнечного света атмосферой в поле зрения датчика. Этот же эффект ухудшает контраст между различными типами земных покровов.

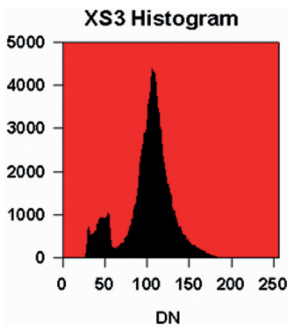




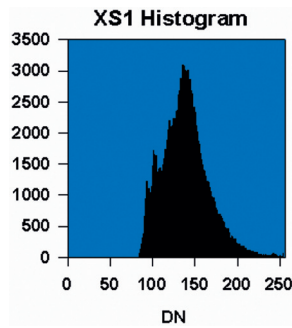
**Рисунок 139.** Мультиспектральное изображение области, показанной в предыдущем разделе, но снятой спутником SPOT позднее. На нём выполнена радиометрическая и геометрическая коррекция. Изображение преобразовано в стандартную картографическую проекцию (UTM) и отображено без каких-либо дополнительных обработок

## ГИСТОГРАММНЫЙ АНАЛИЗ

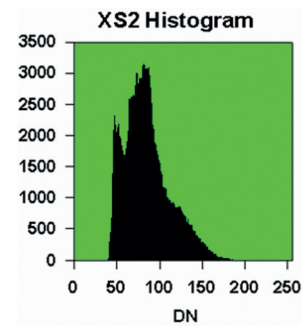
Перед выполнением любого алгоритма улучшения качества изображения полезно исследовать *гистограмму* изображения. *X*-ось гистограммы — диапазон доступных чисел от 0 до 255. *Y*-ось — количество пикселей в изображении, соответствующих данному цифровому значению. На рисунках 140–142 показаны гистограммы трёх спектральных диапазонов этого изображения.



**Рисунок 140.** Гистограмма XS3 (БИК полоса)



**Рисунок 141.** Гистограмма XS2 (красная полоса)



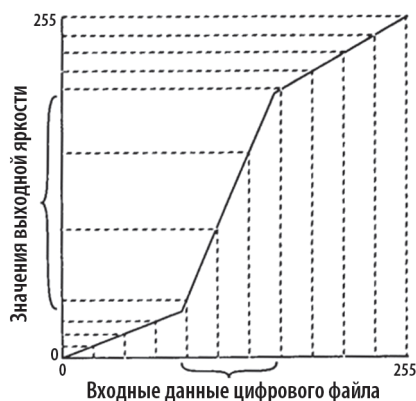
**Рисунок 142.** Гистограмма XS1 (зелёная полоса)

Обратите внимание, что минимальный цифровой номер (Digital Number — DN) на каждом рисунке не ноль и все гистограммы смещены вправо на некоторую величину. Данный сдвиг обусловлен компонентой атмосферного рассеяния, добавленной к фактическому излучению, отражённому от Земли. При этом максимальный сдвиг проявляется на гистограмме полосы XS1 из-за более высокого вклада рэлеевского рассеяния на коротких длинах волн.

Максимальный цифровой номер каждой спектральной полосы также не 255, поскольку коэффициент усиления датчика был отрегулирован так, чтобы предотвратить возможность насыщения приёмников облучением от очень ярких объектов. Следовательно, большинство пикселей в изображении имеет цифровые номера значительно ниже максимального значения 255.

## КОНТРАСТИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При выполнении процедуры радиометрического улучшения контраста на видеоконтрольном устройстве — дисплее, преобразование исходных цифровых данных из файла в яркость экрана производится с помощью так называемых *просмотровых таблиц* (Look Up Table — LUT), что иллюстрируется рисунке 143. На данном графике соответствующая просмотровая таблица усиливает контраст из средней части исходных данных, заключённых в скобку. Отметим, что входной диапазон данных в скобке узок, в то время как выходная яркость для тех же пикселей растягнута на более широкий диапазон. Такой процесс называется контрастированием растяжением.



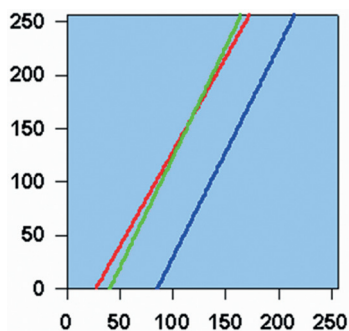
**Рисунок 143.** График просмотровой таблицы



**Рисунок 144.** Линейная, нелинейная и кусочно-линейная просмотровые таблицы

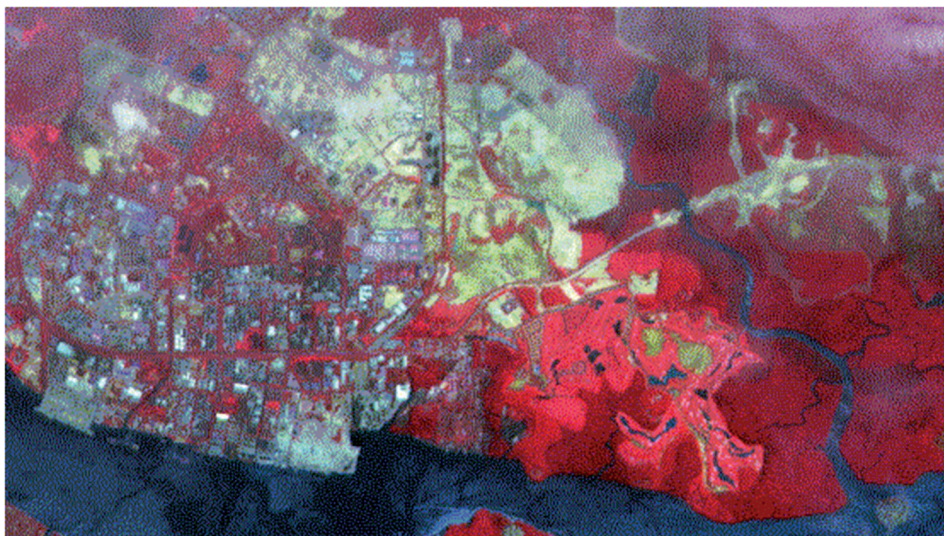
Термины *линейная* и *нелинейная* при описании типов радиометрического улучшения качества изображения относятся к функции, описывающей форму просмотровой таблицы, используемой для улучшения. Кусочно-линейное растяжение использует функцию, состоящую из нескольких отрезков, что позволяет повысить контраст диапазонов изменения в разных разделах входных данных, как это показано на рисунке 144.

Таким образом, визуальное качество изображения может быть улучшено *простым линейным растяжением уровней серых полутонов*. При этом величина начального порогового уровня выбирается так, чтобы все цифровые значения пикселей ниже этого порога были обнулены. Верхний же порог выбран так, чтобы все значения пикселей выше этого порога были приравнены к 255. Все промежуточные значения пикселей линейно интерполированы в диапазоне между 0 и 255. Наименьшие и наивысшие пороги обычно выбираются так, чтобы соответствовать минимальному и максимальному значениям гистограмм пикселей изображения. Таблица преобразования уровней серого представлена на графике (рисунок 145, см. с. 225).



**Рисунок 145.** Таблица преобразования уровней серого для выполнения линейного растяжения уровней серых полутонов для трёх спектральных полос изображения. 1 — XS3-полоса; 2 — XS2-полоса; 3 — XS1-полоса. Входные данные — ось абсцисс, выходные — ординат

Результат применения метода контрастирования линейным растяжением показывается в следующем изображении (рисунок 146). Обратите внимание, что туманное проявление вообще исчезло, за исключением некоторые части ближе к верхнему правому краю снимка. Контраст изображения был улучшен.



**Рисунок 146.** Мультиспектральное изображение SPOT после улучшения визуального качества процедурой простого линейного растяжения градаций серого

## ГИСТОГРАММНОЕ УРАВНИВАНИЕ

Данный подход представляет собой процедуру *нелинейного растяжения контраста*, которая перераспределяет пиксели так, чтобы каждому значению яркости в выбранном диапазоне яркости соответствовало приблизительно одинаковое количество пикселей. Результат применения данного метода аппроксимируется плоской гистограммой (рисунок 147, см. с. 226), приводящей к улучшению контраста пикселей, расположенных в пике, и ухудшению контраста тех, которые размещались в крыльях исходной гистограммы.

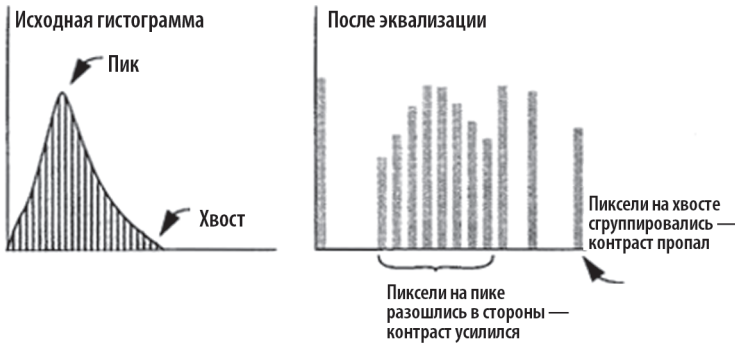


Рисунок 147. Гистограммное уравнивание

Если во всём широком диапазоне яркости присутствуют всего несколько выходных значений, гистограммное уравнивание может рассортировать все пиксели изображения по отдельным группам, соответствующим именно этим значениям. Визуальный эффект применения данной процедуры проявляется в грубой классификации пикселей.

При осуществлении процедуры гистограммного уравнивания полный исходный диапазон значений яркости пикселей в изображении (либо цифровых данных в файле) переопределяется фиксированным числом выборок, в которых просто пересчитаны исходные наборы пикселей. После этого пиксели получают новые значения яркости в соответствии с выборками, к которым эти пиксели были отнесены.

При этом вводятся следующие параметры:

- $N$  — количество выборок, в которые переопределены пиксели. Если в итоге получается много выборок или пикселей с одинаковыми значениями, некоторые из них могут быть пустыми;
- $M$  — максимальное число диапазона выходных значений, который изменяется от 0 до  $M$ .

Общее количество пикселей, поделённое на число выборок, равно количеству пикселей на выборку:  $A = T/N$ , где  $T$  — общее количество пикселей в изображении,  $A$  — уравненное количество пикселей на выборку.

Затем пиксели соответствующей входной гистограммы перераспределяются по выборкам так, чтобы количество пикселей в каждой новой выборке было предельно близким к  $A$ . Поясним данный алгоритм с помощью рисунка 148.

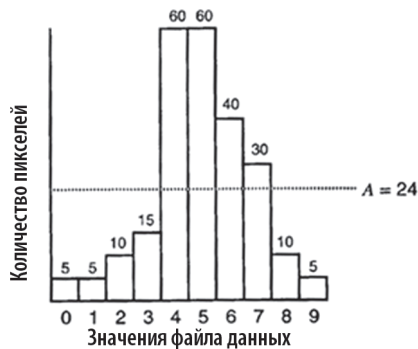


Рисунок 148. Пример гистограммного уравнивания



Приведённая на нём гистограмма отображает 240 пикселей, сгруппированных в 10 наборов пикселей. Чтобы уравнять данную гистограмму, в 10 новых выборках должно быть по 24 пикселя на выборку:  $240 \text{ пикселей} / 10 \text{ выборок} = 24 = A$ .

Для распределения пикселей по выборкам используется следующее уравнение:

$$B_i = \text{int} \left[ \frac{\left( \sum_{k=1}^{i-1} H_k \right) + \frac{H_i}{2}}{A} \right], \quad (65)$$

где  $H_i$  — количество значений с величиной  $i$  (гистограмма); int — операция выделения целой части числа, округляющая реальные числа до целого;  $B_i$  — номер выборки для пикселей со значениями  $i$ .

Десять новых выборок перемасштабированы к новому диапазону от 0 до  $M$ . В данном примере выбрано значение  $M = 9$ , поскольку входные величины изменяются от 0 до 9. Это сделано для наглядности, чтобы облегчить сравнимость уравненной гистограммы и исходной. После перегруппировки пикселей выходная *эквализованная* гистограмма будет выглядеть так, как это представлено на рисунке 149.

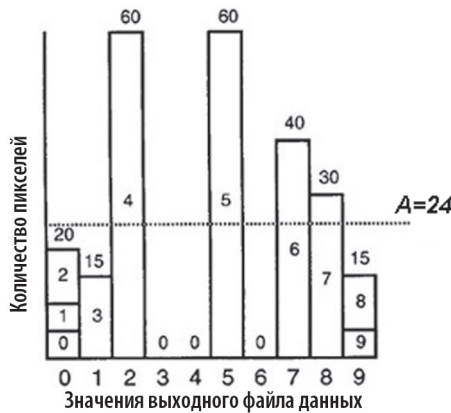


Рисунок 149. Эквализованная гистограмма

Сравнивая исходную гистограмму с уравненной можно видеть, что в обработанном изображении усилен контраст в пике исходной гистограммы — например, входной диапазон от 3 до 7 исходной гистограммы растянулся на диапазон от 1 до 8. Вместе с тем данные в хвостах исходной гистограммы сгруппировались вместе — все входные значения от 0 до 2 стали иметь значение 0, а входные значения 8 и 9 превратились в 9. Таким образом, контраст в хвостовых пикселях, обычно имеющих минимальную и максимальную яркость, был потерян.

Результирующая гистограмма не совсем плоская, так как пиксели могут быть сгруппированы в выборки с равным числом пикселей достаточно грубо.

### ГРУППИРОВКА ПО УРОВНЯМ ЯРКОСТИ

Процедура группировки пикселей по уровням яркости по сути аналогична гистограммному уравниванию в том смысле, что она также разделяет данные

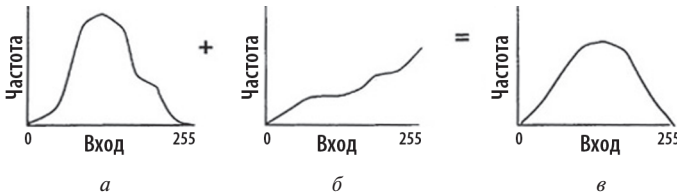


на равные по количеству пикселей группы. Для выполнения данной процедуры используется просмотрная таблица с функцией, по форме напоминающей лестницу. Влияние такой просмотрной таблицы на данные проявляется в том, что данные входного файла группируются вместе через равные интервалы на конечное число уровней яркости (по количеству ступенек), яркость каждого уровня одинакова для всех пикселей группы, соответствующих выбранной ступеньке просмотрной таблицы.

Для выполнения группировки пикселей по уровням яркости необходимо задать диапазон значений выходной яркости и количество уровней, после чего и формируется «лестничная» просмотрная таблица с соответствующим числом ступенек.

## ГИСТОГРАММНОЕ СООТВЕТВИЕ

Данная процедура определяет процесс создания просмотрной таблицы преобразованием гистограммы одного изображения для переопределения гистограммы второго (рисунок 150). Согласование гистограмм полезно при объединении данных изображений одной и той же или соседних сцен, полученных в разные съёмочные дни, или немного отличающиеся по геометрии визирования и атмосферным условиям съёмки. Данная процедура особенно полезна при создании мозаичного изображения.



**Рисунок 150.** Согласование гистограмм: *а* — исходная гистограмма; *б* — сложенная с просмотрной таблицей; *в* — аппроксимирует модельную гистограмму

Для достижения хорошего гистограммного соответствия два исходных изображения должны иметь аналогичные характеристики:

- общая форма гистограмм должна быть похожей;
- относительные яркостные свойства изображений должны совпадать;
- для ряда применений необходимо также совпадение пространственного разрешения изображений;
- относительное распределение земных покровов также должно совпадать или хотя бы быть похожим даже если согласуемые сцены не есть одна и та же сцена. Если одно изображение содержит облачность, а другое свободно от облаков, необходимо перед согласованием гистограмм удалить облака из первого изображения.

При согласовании гистограмм просмотрные таблицы создаются математически и являются функцией преобразования одной гистограммы в другую, как это показано на рисунке 150.

## ИНВЕРСИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Функции инверсии позволяют создавать такие изображения, у которых контраст противоположен контрасту исходного снимка. Тёмные детали ста-

новятся светлыми, а светлые — тёмными. Подобные процедуры также используются для превращения негатива в позитив. Различают два типа инверсии изображений: собственно инверсию и реверс. Обе возможности преобразуют весь диапазон входного цифрового файла (обычно 0–255) в диапазон 0–1,0. Минимаксное переобозначение данных применяется для мгновенного растяжения изображения и обработки любого входного двоичного формата. Выходное изображение получается в формате с плавающей точкой и, соответственно, минимаксное растяжение применяется для преобразования выходного изображения в 8-битный формат.

Инверсия особенно полезна в тех случаях, когда необходимо подчеркнуть те детали изображения, которые могли бы быть потеряны как самые тёмные пиксели. Данная функция применяет следующий математический алгоритм:

$$DN_{\text{вых}} = 1,0, \quad \text{если } 0 < DN_{\text{вх}} < 0,1,$$

$$DN_{\text{вых}} = 0,1/DN_{\text{вх}} \quad \text{если } 0,1 < DN_{\text{вх}} < 1.$$

Реверс — это линейная функция, которая просто расставляет значения  $DN$  в обратной последовательности:

$$DN_{\text{вых}} = 1,0 - DN_{\text{вх}}.$$

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

В то время как радиометрическое улучшение качества изображения осуществляется с каждым индивидуальным пикселем изображения независимо, *пространственное улучшение* изменяет значение интенсивности каждого пикселя в зависимости от интенсивности окружающих его пикселей. Пространственное улучшение качества изображения в большинстве случаев влияет на *пространственную частоту*, представляющую собой разницу между максимальным и минимальным значениями пикселей в изображении. Дж. Р. Дженсен (J. R. Jensen) [131] определяет её как величину изменений в значениях яркости на единицу расстояния для любой заданной части изображения.

Для пространственного улучшения качества изображения в основном используются различные алгоритмы *пространственной фильтрации*, т. е. воздействия на определённую пространственную частоту в изображении.

В данном разделе кратко познакомимся со следующими процедурами пространственного улучшения качества изображений:

- усреднение, улучшение чёткости и адаптивная фильтрация;
- слияние разрешения.

*Усредняющая фильтрация* — процесс осреднения малых наборов пикселей по всему изображению, используемый для изменения составляющих его пространственных частот.

*Усредняющее ядро* — цифровая матрица, используемая для осреднения значений каждого пикселя совместно со значениями окружающих пикселей определённым образом. Числа в матрице служат для взвешивания этого среднего значения по отношению к некоторым пикселям. Эти числа часто называют коэффициентами, поскольку они используются аналогично коэффициентам математических уравнений.

*Фильтрация* — достаточно широкое понятие, используемое для изменения пространственных или спектральных характеристик с целью улучшения визуального качества изображения. Усредняющая фильтрация — один из

наиболее распространённых методов пространственной фильтрации изображений. Рассмотрим алгоритм усредняющей фильтрации на конкретном примере. Чтобы понять, как усредняется каждый единичный пиксель, представим, что усредняющее ядро перекрывает значения файла данных изображения таким образом, чтобы пиксель, подлежащий усреднению, находился в центре усредняющего окна.

Рисунок 151 показывает, как усредняющее ядро размером  $3 \times 3$  применяется к пикселю, находящемуся в третьей колонке третьего ряда выборки данных (данный пиксель соответствует центру ядра). Для расчёта выходного значения этого пикселя после усреднения каждая цифра усредняющего ядра умножается на значение пикселя изображения, накрываемое этой цифрой.

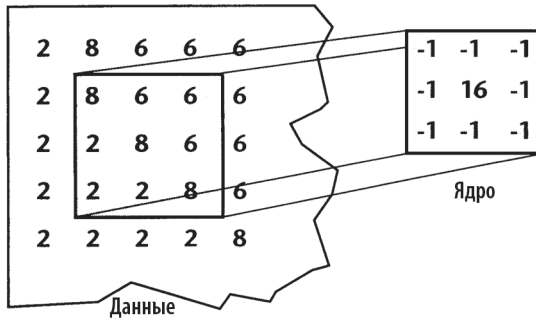


Рисунок 151. Применение усредняющего фильтра

Полученные произведения суммируются и делятся на сумму значений усредняющего ядра, как показано далее:

$$\begin{aligned} & \text{Integer} \left( (-1 \times 8) + (-1 \times 6) + (-1 \times 6) + (-1 \times 2) + (16 \times 8) + (-1 \times 6) + \right. \\ & \left. + (-1 \times 2) + (-1 \times 2) + \frac{-1 \times 8}{(-1) + (-1) + (-1) + (-1) + 16 + (-1) + (-1) + (-1) + (-1)} \right) = \\ & = \text{int} \left( \frac{128 - 40}{16 - 8} \right) = \text{int} \left( \frac{88}{8} \right) = 11. \end{aligned}$$

После применения аналогичной процедуры ко всем центральным пикселям окна  $3 \times 3$  рассматриваемого примера можно увидеть, что относительно небольшие значения стали ещё меньше, а более высокие значения возросли, увеличив пространственную частоту изображения. Поэтому ядро, рассмотренное в примере, называют высокочастотным усредняющим ядром. В соответствии с вышеизложенным можно получить формулу усреднения для центрального пикселя изображения:

$$V = \left[ \frac{\sum_{i=1}^q \left( \sum_{j=1}^q f_{ij} d_{ij} \right)}{F} \right], \quad (66)$$

где  $f_{ij}$  — коэффициент усредняющего ядра в положении  $i, j$  (в ядре);  $d_{ij}$  — цифровое значение пикселя, соответствующего  $f_{ij}$ ;  $q$  — размерность квадратного ядра (для  $q = 3$  ядро представляет собой матрицу  $3 \times 3$ );  $F$  — либо сумма коэффициентов ядра, либо 1, когда сумма равна 0;  $V$  — выходное значение пикселя.

В случае если  $V < 0$ , значению пикселя приписывается 0.

*Усредняющие ядра с нулевой суммой* представляют собой «детектор контуров», обычно сглаживающий или обнуляющий области низких пространственных частот и создающий резкие контрасты в области высоких пространственных частот, присутствующих на границах между однородными группами пикселей. Результирующее изображение при этом часто состоит только из контуров и нулей.

*Высоочастотные ядра* после применения приводят к увеличению пространственной частоты в исходном изображении. Они также служат детекторами контуров. Но в отличие от ядер с нулевой суммой, они только подчёркивают контуры, не уничтожая других особенностей изображения.

*Фильтр чёткости* увеличивает резкость всего изображения без искажения внутренних изменений между пикселями. Эта процедура очень полезна, если изображение размыто атмосферной дымкой, беспорядочными качаниями сенсора ДЗ или широкой функцией рассеяния точки оптической системы сенсора.

Алгоритм, используемый для этого, состоит:

- 1) из расчёта собственных векторов мультиспектрального входного изображения;
- 2) свёртки первого собственного вектора с суммарным фильтром;
- 3) переопределения в пространстве RGB.

Логика алгоритма заключена в том, что первый собственный вектор по допущению содержит информацию об освещённости всей сцены. Другие собственные векторы представляют изменчивость внутри обрабатываемого изображения. Таким образом, увеличив чёткость только первого собственного вектора, для улучшения качества исходного изображения затем осуществляется заново пересчёт остальных собственных векторов. При этом резкость изображения повышается, а изменчивость сохраняется прежней.

## СЛИЯНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ

Как уже было показано ранее, термин разрешение может для одного и того же датчика относиться к радиометрическому, пространственному, спектральному или временному разрешению.

Известно, что сенсоры ТМ спутника Landsat имели семь спектральных каналов с пространственным разрешением 28,5 м. В панхроматическом режиме спутник SPOT имеет один широкий спектральный канал с очень хорошим пространственным разрешением — 10 м. Комбинация мультиспектрального и панхроматического изображений одной и той же яркостной сцены создаёт семиканальные данные с разрешением 10 м, что взаимно улучшает характеристики двух различных приборов.

Для подобного сложения изображений было разработано несколько алгоритмов. Для трёх спектральных каналов наиболее был применим рекурсивный алгоритм Уэлша и Эхлера [132], преобразующий формат RGB (Red, Green, Blue) в IHS с заменой I (из преобразованных данных ТМ) данными панхроматического канала SPOT.

В работе [133] применялось рекурсивное преобразование собственных векторов изображений SPOT, заменяя первый собственный вектор.

В обоих рассмотренных методах предполагается, что компонента интенсивности (первый собственный вектор) спектрально эквивалентна панхроматическому изображению SPOT, а вся спектральная информация содержится в других собственных векторах. Поскольку данные SPOT не перекрывают всего спектрального диапазона данных Landsat ТМ, подобное предположение не очень корректно. Например, совершенно неприемлемо делать подобные

процедуры с изображением инфракрасного канала (ТМ6), основываясь только на данных видимого панхроматического канала SPOT.

## СПЕКТРАЛЬНОЕ УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

При реализации процедур, применяемых для спектрального улучшения качества изображения, используются ДДЗ, измеренные в нескольких спектральных каналах. Подобные процедуры позволяют:

- сжимать диапазоны аналогичных данных;
- выявлять новые диапазоны данных, лучше интерпретируемые глазом;
- применять математические преобразования и алгоритмы;
- отображать расширенную изменчивость информации в трёх условных цветах (RGB).

Далее кратко познакомимся с одним из основных методов спектрального улучшения ДДЗ — анализом принципиальных компонент (АПК), часто используемым для сжатия данных. Он позволяет более компактно представить излишние данные за счёт уменьшения размерности данных. Диапазоны данных, подвергшихся обработке методом АПК, некоррелированы и независимы, а также часто лучше интерпретируемы, чем исходные данные.

Данная процедура легко объясняется графически на примере данных двух спектральных каналов. На рисунке 152 приводится пример двухдиапазонной функции рассеяния, которая отображает зависимость данных, соответствующих двум спектральным каналам. Значения файла данных одного канала представлены напротив файла данных другого. Если данные обоих каналов распределены нормально, результирующая функция имеет форму эллипса.

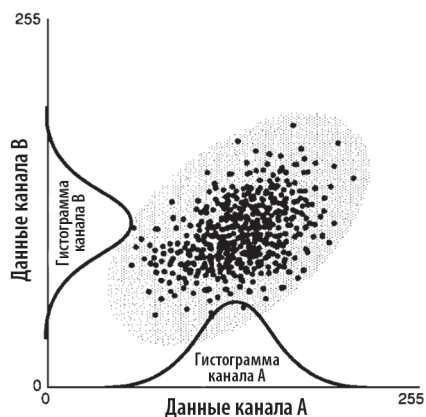


Рисунок 152. Двухканальная функция рассеяния

Чтобы провести анализ собственных векторов оси спектрального пространства повернуты так, что новые координатные оси параллельны осям эллипсоида. Это, в свою очередь, изменяет координаты каждого пикселя спектрального пространства, а также данные исходных файлов.

Длина и направление сечения эллипса по широкой оси рассчитывается с помощью матричного исчисления. Сечение, соответствующее главной (длинной) оси эллипса, называется первой принципиальной компонентой данных. Его направление называют первым собственным вектором, а длину — первым собственным значением.



Таким образом, новая ось спектрального пространства определяется первой принципиальной компонентой. Точки исходной функции рассеяния получают теперь новые координаты, соответствующие этой новой оси. Таким образом, как ось в спектральном пространстве, первая принципиальная компонента измеряет наивысшую изменчивость имеющихся исходных данных.

## РАЗБИЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ФРАГМЕНТЫ И СОЗДАНИЕ МОЗАИКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

### Первый собственный вектор

На рисунке 153 легко видеть, что первое собственное значение всегда будет больше, чем диапазоны изменчивости исходных данных двух каналов, поскольку оно является гипотенузой прямоугольного треугольника, которая всегда длиннее катетов.



Рисунок 153. Диапазон первой принципиальной компоненты

### Следующие принципиальные компоненты

Вторая принципиальная компонента получается сечением эллипса в наиболее широкой его части перпендикулярно первой принципиальной компоненте. Как таковая, вторая принципиальная компонента описывает максимальное значение изменчивости данных, которая не описывается первой собственной компонентой. В двумерном анализе вторая принципиальная компонента соответствует меньшей оси эллипса (рисунок 154, см. с. 234).

Для большого числа спектральных каналов количество принципиальных компонент соответствует этому числу. Каждая последующая принципиальная компонента представляет собой сечение по наиболее широкой части эллипса перпендикулярно предыдущей принципиальной компоненте и отражает уменьшающуюся изменчивость данных. Тогда в  $n$  измерениях будут представлены  $n$  принципиальных компонент. Наиболее важным элементом АПК является то, что всего несколько первых принципиальных компонент описывают практически полностью существующую изменчивость исходных данных — в некоторых случаях почти 100 %. Таким образом, становится понятным, почему АПК так полезен и приводит к сжатию данных всего до нескольких каналов.

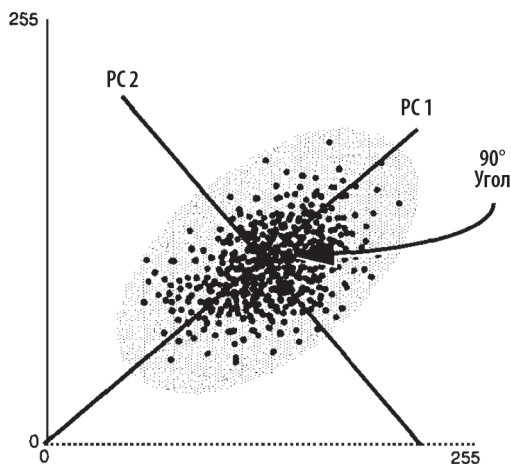


Рисунок 154. Вторая принципиальная компонента

Часто файл изображения содержит отображение области, много большей по размеру, чем область реального интереса. В таких случаях полезно уменьшить размер исследуемого изображения, ограничившись только областью повышенного интереса. Подобная процедура не только убирает лишние данные из файла, но и ускоряет обработку за счёт уменьшения количества обрабатываемых данных. Подобный приём особенно важен при обработке многоспектральных изображений, поскольку приводит к значительной экономии времени обработки.

С другой стороны, изучаемая область может занимать несколько файлов данных и тогда требуется объединять данные из разных файлов в общее изображение. Такая процедура называется созданием мозаики изображений.

## 7.3 ОБЩАЯ И ТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

### СПОСОБЫ ОРГАНИЗАЦИИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ СПУТНИКОВОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Данные ДДЗ, полученные сенсором на спутнике, затем должны быть переданы на Землю или записаны на борту для передачи в более удобный момент времени. Таким образом, различаются два режима передачи данных с ИСЗ: режим непосредственной передачи и задержанной записи — сброса. В первом режиме на Землю постоянно передают данные, полученные от просмотра подстилающей поверхности, над которой пролетает спутник в конкретный момент времени. Очевидно, что второй режим необходим в тех случаях, когда спутник не находится в зоне прямой радиовидимости наземной приёмной станции.

Принятые наземной станцией данные подвергаются первичной обработке, когда осуществляется калибровка и геометрическая коррекция данных, затем данные географически привязываются. После этого могут быть применены процедуры улучшения зрительного восприятия, анализа информационного содержания, архивация с присвоением даты, времени и района съёмки. После чего сырые данные превращаются в полезную информацию.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ПРИЁМА И ОБРАБОТКИ АНАЛОГОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Структурная схема цикла представлена на рисунке 155. Далее приведём краткое описание только тех элементов технологии, при реализации которых использованы оригинальные авторские разработки.



**Рисунок 155.** Технологический цикл обработки аналоговых ДДЗ при создании карт ТПО по данным ИСЗ NOAA

### РАСЧЁТ ВРЕМЕНИ НАЧАЛА СЕАНСА СВЯЗИ С ИСЗ

Ширина полосы захвата радиометрических датчиков спутников серии NOAA около 2900 км соответствует 1050 элементам изображения в строке для реализованного алгоритма ввода КИ в ПЭВМ. При этом полный объём информации за сеанс связи составляет около 2,5 Мбайт. Для многих задач океанографии и рыбопромысловой разведки возможно использование информации только с части площади космического снимка. Следовательно, необходимо реализовать подход, связанный с выбором из всей передаваемой информации только той части, которая относится к требуемому району.

Подобная организация процесса приёма позволяет снизить требования к необходимому объёму оперативной памяти ПЭВМ (персональная электронная вычислительная машина), предназначенной для обработки информации, а также упростить ряд процедур, связанных с географической привязкой и выделением необходимых фрагментов на изображении. Подробно разработанный алгоритм представлен в работе [134]. Суть его состоит в том, что можно представить предполагаемый район съёмки в виде многоугольника с заданными географическими координатами его вершин — шириной  $f_i$  и длиной  $l_i$ , где  $i = 1, N_r$  и  $N_r$  — количество вершин многоугольника.

Для каждого витка спутника, для которого район полностью попадает в полосу обзора, определяется время начала просмотра района  $T_{\text{нач}}$  с момента

прохождения спутником восходящего узла. Для этого определяются номера строк  $n_i$ , в которые попадают вершины многоугольника, а  $T_{\text{нач}}$  определяется как время, соответствующее началу строки с минимальным номером. Затем каждой вершине многоугольника ( $f_i, l_i$ ) ставится в соответствие элемент изображения ( $m_i, n_i$ ),  $m_i$  — номер элемента в строке  $n_i$ . Таким образом, в пространстве изображения мы получим многоугольник с вершинами ( $m_i, n_i$ ).

Переход от географических координат — широты  $f$  и долготы  $l$  точки на поверхности Земли к координатам на изображении производится по итерационной процедуре, описанной в работе [135]

При расчётах времени записи выбранного района по приведённому алгоритму возникает погрешность, связанная с неточностью задания инкремента долготы и периода обращения ИСЗ вокруг Земли. Это обусловлено тем, что параметры мерной орбиты, передаваемые в телеграмме APT PREDICT, ежедневно уточняются, а в судовых условиях не всегда возможно получать ежедневно новую телеграмму. Неточность задания долготы восходящего узла приводит к тому, что прогноз только на одни сутки вперёд имеет погрешность по долготе около  $0,15^\circ$  (15 км) и по времени — 0,4 с.

Был предложен алгоритм уточнения величины инкремента долготы восходящего узла и периода обращения спутника с помощью двух телеграмм APT PREDICT, разнесённых друг от друга на несколько суток. Период обращения спутника определяется как время, прошедшее между восходящими узлами мерных орбит, указанных в телеграммах, поделённой на количество сделанных за это время витков. Аналогично определяется инкремент долготы. Расчёты показывают, что использование телеграмм, разнесённых на 3–5 сут, позволяет определить на 30 дней вперёд долготу восходящего узла с точностью  $0,05\dots 0,09^\circ$  и время с погрешностью 14 с. На 10–20 дней —  $0,02^\circ$  и 5 с соответственно. Работоспособность алгоритма была экспериментально проверена при приёме космической информации над различными акваториями, при этом объём информации, записываемой в ЗУ (запоминающее устройство) компьютера для последующей обработки, уменьшился на порядок.

## ВВОД СИГНАЛА В ПЭВМ

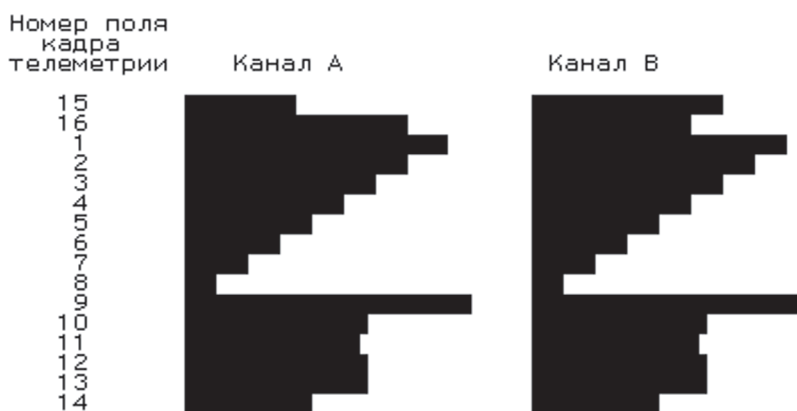
На основе данных, полученных на предыдущем этапе, программа приёма выбирает из сигнала телеметрическую и ИК информацию, соответствующую заранее выбранному району съёмки. При этом, в отличие от некоторых аналогичных комплексов, временная синхронизация приёма сигнала по радиоканалу осуществляется не аппаратно, а программным выделением синхросерии из исходного аналогового сигнала, передаваемого со спутника. Предложен простой и надёжный алгоритм, смысл которого заключается в поиске максимума корреляции между эталонной маской, соответствующей импульсной последовательности синхросерии в сигнале, и реальной сигнальной последовательностью.

Поскольку процедура осуществляется в реальном масштабе времени, подобный приём позволяет существенно упростить аппаратную реализацию комплекса технических средств, предназначенного для приёма космической информации. Подробно данный алгоритм представлен в работе [136].

Для обеспечения правильной работы программы радиометрической коррекции приём телеметрии начинается за 64 с до начала прохождения района съёмки и заканчивается через 64 с после окончания записи полезной информации. Это обусловлено тем, что информация со спутника передаётся кадрами по 128 строк и, следовательно, время передачи одного кадра составляет 64 с. В то же время, требуемый район съёмки может начинаться в любом месте текущего кадра и поэтому во избежание потери необходимой телеметрической информации необходимо страховать.

## ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРИНЯТОЙ ИНФОРМАЦИИ

При автоматизированном вводе информации в ПЭВМ встаёт вопрос о качестве принятой информации, так как в процессе радиоприёма могут иметь место помехи и сбой. Для этого целесообразно иметь наглядное изображение принятой телеметрии двух спектральных каналов, а также полутонное изображение, соответствующее принятой информации, чтобы можно было судить о географическом местоположении района, данные о котором были записаны на диск во время сеанса связи. Телеметрическая информация в рассматриваемом режиме передачи КИ представлена 16 полями телеметрического клина (рисунок 156), расшифровка которых позволяет идентифицировать данные, рассортировать их по соответствующим спектральным каналам, провести радиометрическую калибровку и т.д. Каждому полю телеметрии соответствует определённый аппаратурный или калибровочный параметр в соответствии с таблицей 16.



**Рисунок 156.** Структура телеметрической информации режима АРТ

**Таблица 16.** Калибровочные параметры в кадре телеметрии

ИМ = 10,6 % 1	ИМ = 21,5 % 2	ИМ = 32,4 % 3	ИМ = 43,5 % 4	ИМ = 54,2 % 5	ИМ = 65,1 % 6
ИМ = 0 % 9	Температура ПТС 1 10	Температура ПТС 2 11	Температура ПТС 3 12	Температура ПТС 4 13	Температура диафрагмы 14
ИМ = 76,0 % 7	ИМ = 87,0 % 8				
Излучение АЧТ 15	Идентифи- катор канала 16				

Примечание: ПТС — платиновый резистор.

В левом нижнем углу каждого поля телеметрического кадра приведён его номер, идентичный номеру рисунка 103. Полям с 1-го по 9-й соответствуют 10%-е приращения уровней сигнала в видимом канале, описываемые так называемым индексом модуляции (ИМ). Разница полей 8-го и 9-го отображает



максимальную разницу яркостей от уровня «чёрного» до уровня «белого» видимого канала спутникового радиометра. Поля 10–13 содержат калибровочную информацию о температуре платиновых резисторов, контролирующей температуру бортового АЧТ радиометра. В поле 14 передаётся калибровочная информация, соответствующая излучению холодного космоса, а в поле 15 — излучению бортового АЧТ. Поле 16 позволяет установить, информация каких спектральных каналов радиометра принята в данном телеметрическом кадре.

Имея изображение телеметрической информации, оператор наземной станции проводит визуальную оценку качества принятого сеанса связи по следующим критериям:

- изображение телеметрии по структуре должно соответствовать изображению, приведённому на рисунке 156;
- ступени телеметрического клина должны иметь чёткие границы;
- на гистограмме должно наблюдаться 8 ступеней градаций по амплитуде;
- допускается наличие не более трёх сбоев (выбросов на гистограмме, превышающих 10 % по амплитуде) для каждой ступени телеметрического клина.

Целесообразность входного контроля качества принятого сигнала именно на этом этапе обусловлена ещё и тем, что невыполнение перечисленных выше требований приводит к бессмысленности выполнения остальных этапов ввиду невозможности восстановления значений ТПО по таким исходным данным.

На этапах определения радиационной температуры, выделения безоблачных участков и радиационной коррекции влияния атмосферы реализованы типовые алгоритмы, применяемые при тематической обработке данных. Поскольку данные режима ART часто зашумлены при радиоприёме, необходимо проводить фильтрацию помех на полученном изображении. В работе [137] рассмотрены различные методы цифровой фильтрации изображений режима ART. Показано, что наиболее оптимальным является использование взвешенного медианного и экстремального фильтров, поскольку другие алгоритмы обычно устраняют шумы, но наряду с этим сглаживают также и резкие градиенты в изображении.

## ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ПРИВЯЗКА И СОВМЕЩЕНИЕ ДАННЫХ С РАЗНЫХ ВИТКОВ

Используется методика географической привязки по баллистическим данным, подробно изложенная в работе [138]. Разработке быстрого алгоритма автоматизированной географической привязки изображений спутника NOAA посвящена работа [139]. В рассматриваемой нами технологии применяется двухуровневая географическая привязка, использующая как орбитальные данные спутника, так и интерактивный режим с использованием метода *оторных точек*. Для этого используется точная навигационная карта, с которой взяты координаты береговой линии или любого легко узнаваемого на изображении элемента подстилающей поверхности. После приёма изображения и запоминания его в ЗУ компьютера осуществляется интерактивное совмещение точной контурной карты с полученным изображением до тех пор, пока совпадение не станет наилучшим. Подобный метод географической привязки позволяет произвести привязку с точностью до размера одного элемента изображения, т. е. 4×4 км в случае обработки данных режима ART. Если несколько витков спутника обеспечивают информацией один и тот же район, то совмещение данных, полученных с разных витков, осуществляется арифметическим усреднением данных.

## ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ИЗОТЕРМ

Построение карт осуществляется как непосредственно по исходным данным (без фильтрации), так и с предварительной фильтрацией поля температур медианным фильтром  $3 \times 3$  точки, что позволяет получать генерализованные (сглаженные) карты ТПО. Выбор режима построения определяется характером поля температуры (большая или меньшая его изменчивость), масштабом рисунка, а также задачами, стоящими перед пользователем.

Масштаб карты определяется автоматически, так чтобы карта поместилась на стандартном листе бумаги формата А4 (размер рисунка приблизительно  $5,5 \times 8,5''$ ). Перед построением изолиний проводится предварительное сглаживание считанного массива. Если диапазон значений температуры меньше  $12^\circ\text{C}$ , то изолинии будут автоматически строиться через  $1^\circ$ , если же диапазон значений больше, то шаг проведения изолиний устанавливается интерактивно.

Следует подчеркнуть, что форма представления итоговой карты может быть легко изменена по требованиям заказчика, поскольку специалистам-океанологам не всегда чисто субъективно нравится вид проведения изолиний методами машинной графики. Отметим, что карты, распространяемые для рыбаков США, являются географически привязанными полутоновыми изображениями, на которых хорошо просматривается текстура температурных аномалий и приведены значения температуры, соответствующие полутонам на изображении, а изолинии как таковые не проводятся вообще [140].

## ГЛАВА 8 МАЛОРАЗМЕРНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ — ПРОРЫВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, МЕНЯЮЩАЯ МИРОВУЮ ЭКОНОМИКУ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В работе [141] отмечается, что в последние годы в связи с очевидным прогрессом, достигнутым в ряде наукоёмких отраслей (микроэлектроника, мехатроника, робототехника, связь, навигация и др.), являющихся основными поставщиками базовых элементов и технологий для мировой ракетно-космической индустрии, значительно сократились сроки постановки продукции на серийное производство.

В работе [142] показано, что темп достижения качественно нового уровня характеристик создаваемой космической аппаратуры (минимальный размер пространственного разрешения на поверхности Земли, скорость передачи информации по радиолиниям «борт – земля», объём памяти бортовых запоминающих устройств и др.) подчиняется закону Мура, также как нарастание количества элементов в электронных интегральных схемах. Следствием данного обстоятельства явилось то, что многие КА, раньше относившиеся к большим, переместились в категории мини-, микро-, нано- и пикоспутников. При этом доля нано- и пикоспутников за последнее десятилетие значительно увеличилась и продолжает расти (рисунок 157).

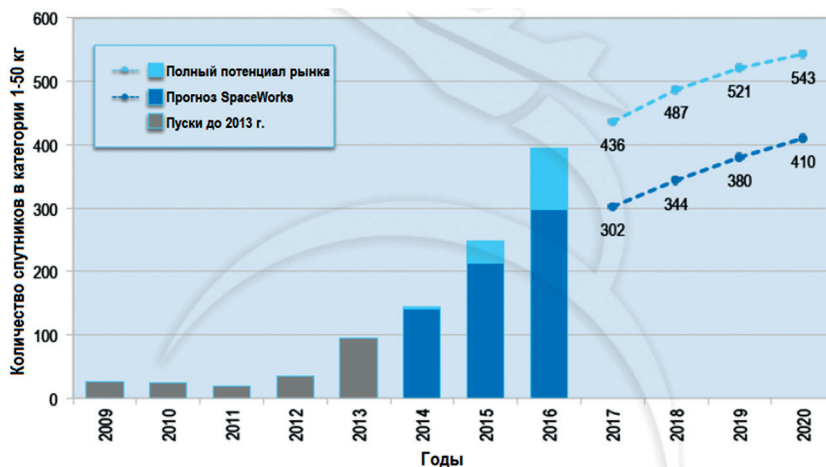


Рисунок 157. Количество запусков микро-, нано- и пикоспутников [143]

Ожидаемое количество микро- и наноспутников с 2014 по 2020 г. составит от 2000 до 2750. На приведённом рисунке полный рыночный потенциал оценивается по аналитическим материалам, опубликованным в разнообразных рекламных материалах, и прогнозным характеристикам. Прогноз компании SpaceWorks представляет собой наиболее вероятную оценку.

По-прежнему перспективным остаётся использование таких малых космических аппаратов (МКА) для решения задач ДЗЗ и связи. В обзоре специалистов SSTL представлено изучение компромиссов, влияющих на проектирование малых спутников ДЗЗ высокого пространственного разрешения. Рассматривается ряд технологических и физических ограничений, которые должны быть учтены и понимание которых для корректного использования получаемых данных является ключевым при проектировании и принятии правильных решений по выбору компромиссов. Зависимость дифракционно ограниченного пространственного разрешения микро- и наноспутников от фокусного расстояния объектива и апертуры представлено на рисунках 158, 159 [144].

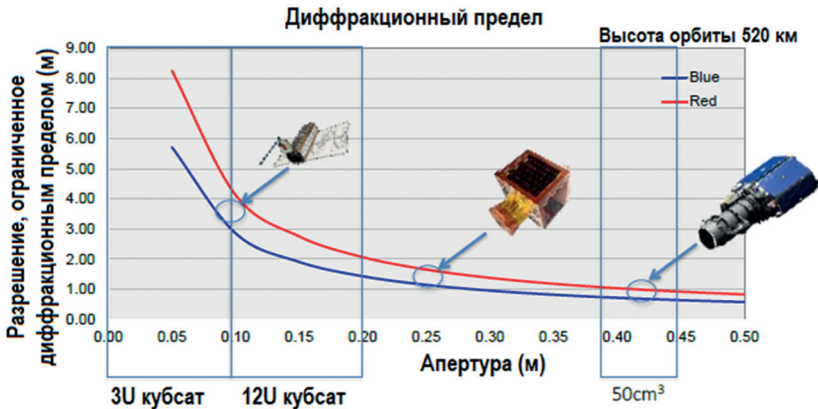


Рисунок 158. Влияние функции рассеяния точки на качество изображения

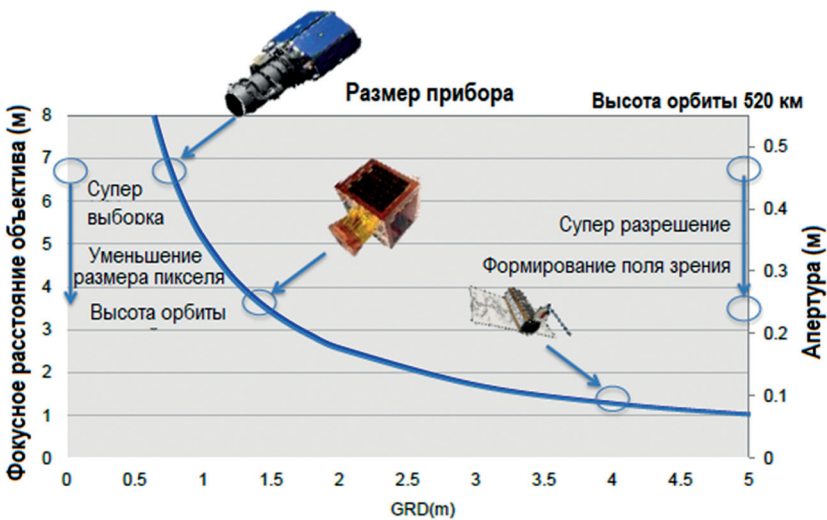


Рисунок 159. Тенденции уменьшения разрешения в зависимости от размеров апертуры и фокусного расстояния объектива

Хотя основным параметром аппаратуры высокого пространственного разрешения, устанавливаемой на КА ДЗЗ, по-прежнему является геометрическое пространственное разрешение на земной поверхности (Ground Resolvable Distance — GRD), при проектировании КА ДЗЗ необходимо рассматривать

и некоторые другие характеристики. Отметим, что параметры GRD и размер пикселя на земной поверхности (Ground Sampling Distance — GSD) эквивалентны для правильно спроектированной оптической аппаратуры.

Выбор GRD-миссии может оказаться достаточно субъективным, что представлено на рисунке 159, где отражены результаты моделирования разных GRD для одной и той же наблюдаемой сцены, показывающее, что при априорном знании сцены GRD не является настолько важным, каким это представлялось изначально.

Некоторые другие факторы, например отношение сигнал/шум и функция передачи модуляции (Modulation Transfer Function — MTF) также оказывают очень сильное влияние на интерпретируемость изображений, получаемых из космоса. Специалисты по анализу изображений иногда используют такую характеристику, как национальная шкала интерпретируемости изображений (National Imagery Interpretability Rating Scale — NIIRS), позволяющую классифицировать возможность интерпретации изображений в зависимости от GSD, SNR и MTF.

Видно, что даже для КА размером 3U и 12U CubeSat при разумных размерах оптической апертуры в 10 или 20 см уже достижимы пространственные разрешение в 4 или 2 м с умеренных высот орбит в 520 км.

Интересным представляется и изменение функционального состава задач, решаемых перспективными малыми космическими аппаратами ДЗЗ. Так, микроспутники Carbonite-1 и -2, запущенные в 2015 и 2018 гг. обеспечивают передачу цветных видеоизображений с высоким пространственным разрешением высокой чёткости, представляющих новые возможности дистанционных наблюдений земной поверхности совместно с аналитикой «больших данных». Поскольку один единственный КА, обладающий указанными возможностями, имеет весьма ограниченное применение, напрашивается создание группировок из многих сверхдешёвых КА. В настоящее время изготавливаются две подобных пилотных миссии, коммерческая эксплуатация которых планируется с 2020 г. Главным преимуществом разрабатываемых группировок МКА с возможностью получения видеоданных перед традиционно используемыми является то, что статические изображения имеют серьёзные ограничения, особенно при мониторинге чрезвычайных ситуаций и оперативном сборе новостной информации [145].

Возникновение в последние годы множества концепций многоспутниковых супергруппировок обусловило потребность в проектировании и производстве КА под конкретный заказ, что требует от космической индустрии создания дополнительных возможностей производства, поскольку ручное изготовление замедляет технологические процессы и удерживает высокую стоимость изделий, что делает серийное производство спутников экономически невыгодным.

Проведём далее анализ современных подходов, позволяющих выйти на качественно новые показатели проектирования спутниковых информационных систем при сохранении, а иногда и превышении достигнутого уровня потребительских характеристики.

## 8.1 МАЛОРАЗМЕРНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Запуском первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. была открыта новая эра развития человечества, которая привела к появлению огромного количества прорывных технологий, позволяющих успешно решать многие вопросы, связанные с освоением околоземного космического пространства, а также и вполне земные задачи социально-экономического развития. Вес пер-



вого космического аппарата (КА) не превышал 100 кг и на тот момент времени это было обусловлено возможностями существовавшей космической техники. Однако по мере её совершенствования масса выводимых на орбиту КА, а также сложность решаемых задач непрерывно нарастали и в 1970–1980 гг. прошлого столетия вес спутников стал превышать 1000 кг.

В первую очередь указанное обстоятельство было обусловлено тем, что используемые оптические материалы, размер апертуры оптических элементов, элементная база целевой аппаратуры, а также служебных систем, включая системы энергообеспечения и ориентации, имели значительные массогабаритные характеристики и большое энергопотребление. Требование обеспечения высокой надёжности космической техники приводило к необходимости дублирования критических узлов бортовой аппаратуры, что в свою очередь повышало её сложность. В конечном итоге перечисленные причины и длительные сроки разработки привели к тому, что, по выражению О. Брауна (Owen Brown), менеджера программ Агентства передовых оборонных исследовательских проектов США DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США), главный недостаток существующих больших КА состоит в попытке решать задачи завтрашнего дня с помощью вчерашних технологий [146].

С целью сокращения сроков разработки современных КА несколько небольших частных компаний попытались создать малоразмерные КА с использованием существующих на рынке микроминиатюрных устройств различного назначения. За прошедшие 20 лет эволюционного развития размеры и массогабаритные характеристики КА претерпели значительные изменения в сторону уменьшения.

В таблице 17 приведена существующая градация КА по массе, цене и сроку активного существования [142].

**Таблица 17.** Классификация КА

	Масса, кг	Цена, млн евро	Время, лет
Большие	>1000	>300	>10
Малые	<1000	100	3–5
Мини	500	30	2
Микро	50	10	1,5
Нано	1–10	1	1
Пико	0,1	>0,1	~1

Однако сегодня данная таблица уже может быть дополнена новой категорией сверхмалых КА, так называемых фемтоспутников, массой от 10 до 100 г. На их основе создаются «спутники на кристалле» или «спутники в интегральной микросхеме» [147].

В работе основоположника малоразмерного спутникостроения профессора Сюррейского университета (University of Surrey, Великобритания) М. Свитинга (M. Sweeting) [142] показано, что эффективность действующих КА определяется набором таких его характеристик, как масса, время создания, стоимость и функциональные возможности.

Также убедительно продемонстрировано, что в области оптического ДЗЗ достигнутые характеристики малоразмерных КА практически уже ни в чём не уступают большим КА. Более того, создана и успешно эксплуатируется первая коммерческая система оптического дистанционного зондирования Rapid

Еще на основе пяти малых КА с элементом пространственного разрешения на земной поверхности, ранее достижимым только военными разведывательными спутниками. Кроме того, разработана и успешно функционирует группировка оптических КА в интересах мониторинга чрезвычайных ситуаций DMC (Disaster Monitoring Constellation). Эволюция данной системы на ближайшую перспективу приведена на рисунке 160.

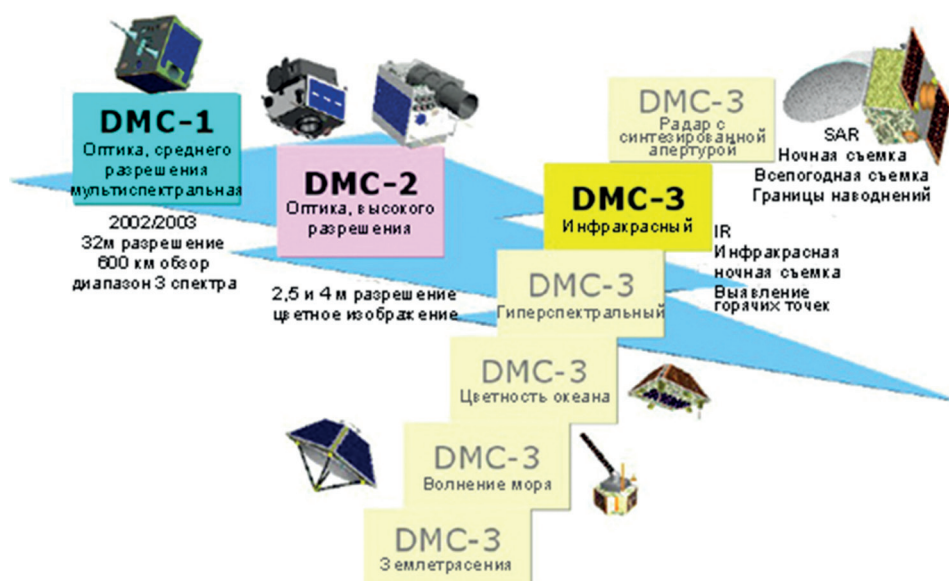


Рисунок 160. Модифицирование спутников DMC

В работе [148] предложена концепция малоразмерного КА, где полезной нагрузкой является радар с синтезированной апертурой. Спутник NovaSAR-1 был запущен в конце 2018 г., это позволяет рассчитывать, что в скором времени малоразмерные КА смогут занять значимую нишу в классе спутников круглосуточного всепогодного наблюдения с высоким пространственным разрешением.

Причём все вышеперечисленные КА относились к классу малых КА с массой около 100 кг. К числу наиболее важных достижений в указанных разработках следует отнести существенное сокращение сроков проектирования и создания спутников (около трёх лет), что позволяет обеспечить применение в разработках самых современных комплектующих. Кроме того, за счёт использования коммерчески доступных критических элементов конструкции КА существенно уменьшаются кооперация организаций, участвующих в его создании, и инфраструктура, необходимая для проведения монтажных и испытательных работ. По существу, функция создания КА превращается в функцию создания электронного прибора, выполняющего роль полезной нагрузки, а сам спутник превращается в «прибор в космосе».

Очень интересна и тенденция отношения крупных предприятий мировой космической индустрии к данному направлению деятельности. Если с самого начала малоразмерное спутникостроение было в основном делом технических университетов и малых коммерческих фирм, то сегодня в этом участвуют практически все основные игроки данного рынка: Boeing, Lockheed Martin, Orbital Science и EADS [149]. Так, EADS после объединения с компанией Airbus и превращения в Airbus Defence and Space поглотила компанию SSTL в 2009 г. путём присоединения.

В начале 2000 г. американское агентство прорывных исследований в интересах министерства обороны — DARPA объявило конкурс на создание программы университетских наноспутников различного целевого назначения, в рамках которой были поддержаны предложения ряда ведущих университетов США. При этом главная задача состояла в том, чтобы в короткие сроки предложить принципиально новый механизм создания дешёвых малоразмерных КА из коммерчески доступных элементов силами студентов и аспирантов. Именно в рамках этой программы профессором Стэнфордского университета (Leland Stanford Junior University, США) Б. Твиггсом (B. Twigg) [150] был предложен стандарт пикоспутников, названный CubeSat, унифицирующий основные элементы конструкции и служебных подсистем.

На протяжении последних лет спутники сверхмалого класса (общей массой до 10 кг) из средства обучения студентов основам проектирования КА в технологических университетах, а также управления проектами в сфере космической деятельности превратились в мощный инструмент решения различных целевых задач.

В 2005 г. был запущен первый в России КА нанокласса ТНС-0 (технологический наноспутник), разработанный в ОАО «Российские космические системы» и предназначенный для отработки принципиально новой концепции управления КА [151]. В настоящее время на предприятии разработано целое семейство космических платформ нанокласса для решения спектра различных задач: дистанционного зондирования (ТНС-1), геофизического мониторинга ионосферы, автоматической идентификационной системы судов (ТНС-0 № 2) и др. [152].

На базе наноспутников развивается множество проектов, направленных на решение геофизических задач, в частности на изучение геомагнитного и электрического полей (CubeSTAR, Firebird, RAX), мониторинг электромагнитных предвестников землетрясений (QuakeSat). Появилась информация о создании наноспутников, основным предназначением которых является решение задач ДЗЗ с высоким пространственным разрешением от 1,5 до 6 м (KestrelEye, MISC-1), передачи текстовых сообщений (Space and Missile Defense Command — SMDC), мониторинга подвижных объектов и т. д. [153].

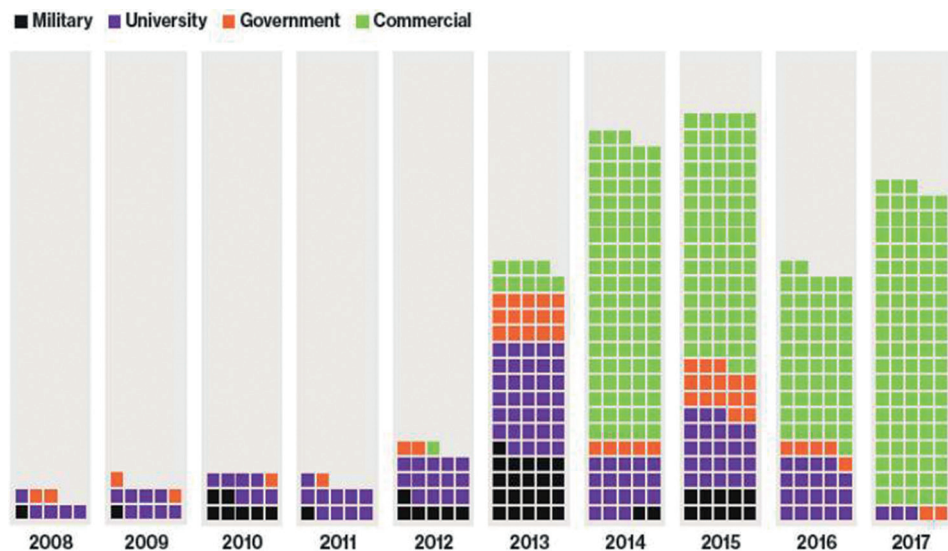


Рисунок 161. Распределение запусков CubeSat в 2008–2017 гг.

Анализ развития рынка показывает, что мировое космическое приборостроение выходит на следующий виток развития, направленный на миниатюризацию полезной нагрузки и спутниковых платформ для решения традиционных задач, стоящих перед космической отраслью в части коммерциализации космической деятельности.

В работе [154] представлена диаграмма изменения рынка малых спутников типа CubeSat за последние 10 лет (рисунок 161, см. с. 245). Видно, что в 2008–2013 гг. преобладали CubeSat для военных применений и университетские CubeSat, но начиная с 2014 г. осуществлён практический переход от фундаментальных исследований к коммерциализации CubeSat.

Катализатором данного процесса стало появление на коммерческом рынке стандарта КА сверхмалого класса — CubeSat, а также основных элементов спутниковой платформы этого стандарта (каркас платформы двух типоразмеров, бортовой компьютер, аккумуляторные батареи с контроллером питания, солнечные батареи, система ориентации и управления и пр.). Срок поставки компонент платформы CubeSat составляет 6–8 недель без учёта сроков проведения таможенной очистки, а стоимость максимальной номенклатуры комплектации — около 120 000 евро без учёта таможенных сборов.

В 2009 г. стали коммерчески доступны платформы спутников сверхмалого класса (MISC-1, -2), совместимые со стандартом CubeSat 3U (10×10×30 см), поставляемые на заказ и обеспечивающие средние энергетические характеристики из расчёта 20...30 Вт за виток. Появление коммерчески доступной стандартизированной спутниковой платформы позволило сформулировать новую концепцию космического приборостроения — «спутник — прибор», делая её реализацию коммерчески привлекательной.

Отмечается также, что технологическим драйвером будущего станет интернет вещей (Internet of Things — IoT). Так, до 2020 г. ожидается создание 25 млрд узлов, включая составляющую, не покрываемую оптическим волокном и требующую использования космического сегмента — космического интернета (Internet of Space — IoS), активно продвигаемого институтом инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE).

В условиях сложной системы проектного управления, сложившейся в аэрокосмической отрасли, системный инжиниринг целевых систем «под ключ» на базе аппаратов малого и сверхмалого классов мог бы стать одной из основных парадигм дальнейшей деятельности приборостроительных предприятий. В рамках данной магистральной линии можно выделить два наиболее перспективных направления развития.

Первое направление состоит в разработке и серийном изготовлении микроминиатюрных полезных нагрузок, обеспечивающих требуемые характеристики решения целевой задачи при условии малого энергопотребления: сканер видимого и инфракрасного диапазонов, ретранслятор автоматической идентификационной системы судов (АИС), специализированные приборы геофизического назначения и пр. Но, что более важно для выхода на коммерческий рынок, разрабатываемая полезная нагрузка должна быть *жёстко унифицирована* с платформой CubeSat по массогабаритным характеристикам и электрическим интерфейсам.

Второе направление состоит в разработке специального программного обеспечения, включая программы управления отдельными элементами платформы спутника, наземного сегмента управления кластером КА, приёма и обработки информации или решения всей целевой задачи (например, решения топографической задачи мониторинга ионосферы). Разрабатывая специальные программные продукты, можно создавать практически произвольную добавленную стоимость к стандартным компонентам платформы, доступным

на коммерческом рынке. В качестве примера можно привести подход к ценообразованию своих продуктов компании IntelliTech Microsystems: комплект микроминиатюрных магнитных катушек можно заказать за 20 000 евро, тогда как система ориентации и управления на их базе стоит 45 000 евро. Основным отличием этих продуктов является программа управления гироскопами, позволяющая упростить процесс реализации алгоритмов управления спутниковой платформой.

Сравнительно небольшая стоимость спутников сверхмалого класса, а также сравнительно короткие сроки их разработки и изготовления позволяют решать многие задачи сегодняшнего дня при помощи технологий дня завтрашнего. Уже сегодня предполагается оперативное развёртывание группировок сверхмалых спутников для решения на протяжении небольшого периода времени определённых задач видовой разведки или обеспечения передачи коротких сообщений. Примером такой системы может стать система наноспутников SMDC (USASMDC/ARSTRAT — программа министерства обороны США, направленная на демонстрацию технологий наноспутников тактической связи). Указанная программа включает разработку и запуск 10 спутников SMDC-ONE весом 4 кг, предназначенных для получения лётной квалификации. Запуск первого КА размером 10×10×32 см состоялся в 2010 г. Предлагаемые КА предназначены для сбора данных от наземных центров управления и контроля и передачи их в штабы. Срок создания не превысил 1 год. Стоимость менее 1 млн долл. за один спутник [155].

Запуск группировок и кластеров сверхмалых КА позволяет существенно повысить оперативность наблюдения земной поверхности за счёт увеличения частоты просмотра одного и того же участка на земной поверхности, а также в перспективе преодолеть фундаментальное физическое ограничение — размер оптической апертуры прибора наблюдения путём синтеза апертур с нескольких КА в кластере.

Следовательно, микроминиатюрный КА, кластер или система малых спутников, *как целостная система*, решающая конкретную целевую задачу, из категории штучного, а потому не выгодного для разработки товара, переходит в категорию *мелкосерийного изделия*. Данное обстоятельство открывает возможность эффективной коммерциализации конкурентоспособных тематических разработок.

## 8.2 ИНФОРМАЦИОННЫЙ СЕТЕВОЙ ОБМЕН В КОСМОСЕ — ВИРТУАЛЬНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ

В 2007 г. тактический технологический офис DARPA объявил конкурс на концепцию создания системы F6 (Future, Fast, Flexible, Fractionated, Free-Flying Spacecraft united by Information eXchange (System F6)) [156]. В переводе на русский язык название системы звучит следующим образом: перспективная, быстроформируемая, гибкая, разделяемая на части система свободно летающих КА, объединённых посредством информационного обмена.

Данная концепция предполагает разделение единого монолитного КА с интегрированным набором различных функций на кластер независимых малоразмерных КА, каждый из которых в отдельности выполняет какую-либо функцию из этого набора. Главное достоинство предлагаемого подхода состоит в том, что надёжность системы в целом значительно возрастает, поскольку в случае выхода из строя какого-либо из КА его функция может быть мгновенно продублирована любым КА из состава кластера. Кроме того, становится



возможным оперативная замена вышедшего из строя модуля, что ведёт к существенному увеличению срока активного существования системы в целом.

В подобной системе возможно, наконец, перейти и к оперативной замене программного обеспечения, поскольку распределённый кластер КА представляет собой аналог наземной локальной вычислительной сети, каждый узел которой и является малоразмерным КА. Ещё одним весьма ценным качеством является то, что при реализации данного подхода сроки формирования системы не попадают в жёсткую зависимость от задержки с созданием какой-либо специфической полезной нагрузки. Сдвиг сроков её готовности не приводит к задержке развёртывания системы, поскольку отсутствующий элемент может быть запущен позже по мере готовности.

В 2008 г. DARPA провела конкурс на создание концепции, который выиграла компания Orbital Science. В октябре 2010 г. был объявлен новый конкурс на создание ключевых элементов System F6. Следует отметить, что DARPA меняла парадигму, в соответствии с которой в конкурсах могли принимать участие только компании — резиденты США. Теперь в конкурсе могут участвовать любые международные компании. При этом, как и ранее, общий срок реализации выигранного конкурса не может превышать трёх лет и должен обязательно заканчиваться действующим образцом, получившим лётную квалификацию в реальном космическом полёте.

Создав System F6, DARPA собирается продемонстрировать возможность декомпозиции большого монолитного спутника на группу элементов или узлов, соединённых каналами беспроводной связи. Каждый из узлов выполняет специфическую функцию большого КА, например, один может быть компьютерным узлом, в то время как другой — передатчиком или «умным» датчиком. Эти узлы, функционируя совместно, создают единый распределённый «виртуальный» КА.

Разделяя тяжёлый монолитный космический аппарат на части в соответствии с функционалом, можно увеличить надёжность полученной распределённой системы, а также внедрять новые гибкие принципы проектирования и сборки. Например, возможно физически изолировать полезные нагрузки от остальных частей системы.

Технические принципы реализации System F6 включают сетевую организацию, беспроводной обмен данными и энергией, распределённые полезные нагрузки и вычисления, кластерную архитектуру и разумную эконометрику. Сетевая организация представляет собой самоорганизующуюся, надёжную, легкодоступную, устойчивую и защищённую сеть узлов с уникальными адресами. Беспроводная связь и обмен энергией обеспечивают совместную эксплуатацию модулей, поддержание конфиденциальности, интеграцию и электромагнитную совместимость, внутри- и внешнюю передачу энергии, а также ориентацию по Солнцу. Распределённые полезные нагрузки и вычисления формируют независимые требования к полезным нагрузкам и распределённый вычислительный ресурс, включённый в составные модули. Кластерная архитектура поддерживает автономную совместную работу, «сближение» и поддержание межспутниковых расстояний во избежание столкновений, а также маневрирование при угрозах. Эконометрика обеспечивается рискоустойчивой методологией конструирования, основанной на достижении значимого результата и правильном учёте, что приводит в конечном итоге к структурной гибкости и надёжности.

Реализация подобного подхода позволит, по мнению специалистов DARPA, достигнуть принципиально нового уровня требований к проектированию, развёртыванию и эксплуатации космических информационных систем, в первую очередь военного назначения. Для таких требований уже придуман новый термин — спутник по запросу.

При этом на этапе проектирования время, затрачиваемое на разработку, создание и испытания космической техники, сокращается с сегодняшних 2–10 лет до 6–9 месяцев. Время, необходимое для установки на ракетоноситель, запуска и развёртывания космической системы, с сегодняшних 3–12 месяцев сокращается до нескольких часов от момента получения запроса на поддержку (в случае готовности инфраструктуры космодрома и РН).

На этапе эксплуатации время, необходимое для доставки информационного продукта конечному потребителю, сегодня в зависимости от назначения системы обычно составляет от нескольких часов до нескольких дней. По требованиям оперативно адаптируемых космических средств (Operative Response Space — ORS) результаты применения космических систем в ближайшей перспективе должны быть доступны практически в реальном времени в соответствии с темпом изменения ситуации на поле боя (непрерывно/секунды) [157].

В результате проведённого анализа нами сформулированы перспективные направления развития мировой ракетно-космической отрасли. Бесспорно, малоразмерные КА в настоящее время не способны заменить собой большие и сложные системы, но определённые шаги и смещение тренда в сторону упрощения и миниатюризации КА наблюдаются в литературе уже сейчас.

Можно выделить следующие предпосылки для изменения парадигмы создания космических систем:

1. Закон Мура прогнозирует для малых КА быстрое уменьшение стоимости и времени создания за счёт регулярного обновления широкодоступных элементов при постоянном наращивании функциональных возможностей, а это значит, что основу базовых элементов перспективных космических систем будут обеспечивать коммерчески доступные технологии.
2. Меняется концепция самого КА — теперь это «прибор в космосе» или «спутник на кристалле/печатной плате».
3. «Созвездия» и «Рои», т. е. кластеры малоразмерных КА создают реальные преимущества при создании новых космических систем на базе «виртуальных» КА (локальную компьютерную сеть в космосе) с возможностями большого КА.
4. Малоразмерные КА становятся основным направлением развития космической компоненты наблюдения системы «литосфера — океан — атмосфера — ионосфера», а в скором времени и ДЗЗ.

Безусловно, рассмотренные концептуальные вопросы не являются чётко сформулированной программой действий. Более того, многие аспекты могут быть подвергнуты серьёзной критике специалистами. Однако нельзя не отметить и привлекательности предлагаемых подходов, поскольку, на первый взгляд, их реализация может действительно привести к прорыву при создании перспективных космических информационных систем.

### 8.3 СТАНДАРТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ МАЛЫХ СПУТНИКОВ

Несмотря на то, что классификация отнесения спутников к той или иной категории уже давно устоялась, появление стандарта CubeSat позволило добавить в существующее распределение кроме категории массы ещё и объёмные характеристики. На рисунке 162 (см. с. 250) представлено уточнение классификации КА из работы [158]. Видно, что к категории наноспутников относятся 3-6U CubeSat до 30 кг, в то время как раньше ограничение массы для этой категории составляло 10 кг.

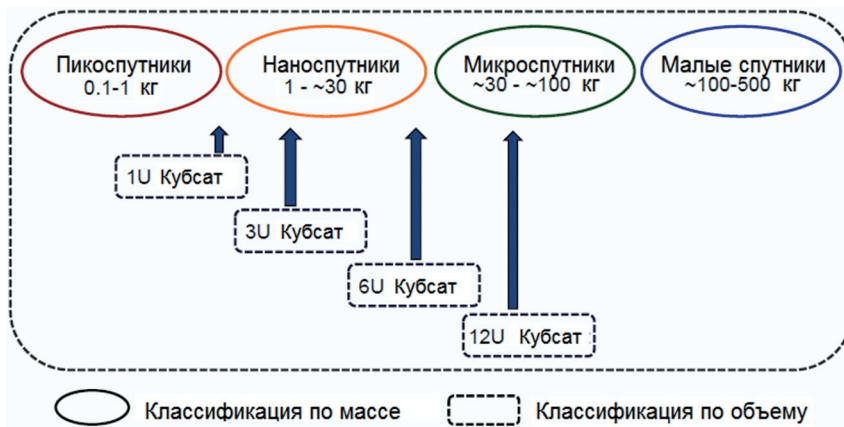


Рисунок 162. Уточнённая номенклатура малых спутников

До недавнего времени основными производителями спутников класса нано/пико оставались университеты. Однако анализ эффективности создаваемых университетами спутников показал, что надёжность КА, разрабатываемых и создаваемых студентами, крайне низка. Это в первую очередь было связано с отсутствием единых стандартов разработки, а также недостаточным вниманием к процедурам верификации и испытаний создаваемой продукции.

В настоящее время в сообществе производителей космической техники активизированы работы по разработке международных стандартов производства малоразмерных космических аппаратов. Общая координация таких работ проводится рабочей группой 4.18 Международной академии астронавтики, начало работы которой было посвящено формулированию более корректного названия рассматриваемого класса космических аппаратов, так как ни размер, ни вес спутника не служат отражением философии его разработки, производства, выполняемой миссии и управления программой создания системы.

Предложено называть спутники термином *Lean satellite* [159]. Буквальный перевод термина “lean” на русский язык не имеет однозначного толкования (рисунок 163) и в общем виде представляет собой логистическую концепцию менеджмента, сфокусированную на оптимизации бизнес-процессов разработки и производства спутника с максимальной ориентацией на рынок и с учётом мотивации каждого работника.

Другими словами, *lean*-спутник использует нетрадиционные рискованные подходы к разработке, обеспечивающие достижение низкой стоимости и быстрой поставки продукции при минимальной численности создателей продукции. При этом упоминание малости спутника в меньшей степени относится к его размерам, а в большей соотносится с результатами применённых подходов разработки, изготовления и испытаний спутника в максимальной степени адаптированных к предъявляемым требованиям и обеспечивающим максимальную эффективность для Заказчика.

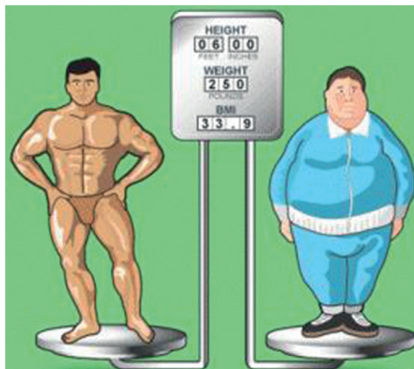


Рисунок 163. *Lean* — это не «тощий» или «жирный», а тот, у кого нет ничего лишнего

Рассмотрим далее процесс создания международного стандарта разработки lean-спутника. Стандарты, имеющие отношение к космической деятельности, обсуждаются в технических комитетах ISO/TC20/SC13 или ISO/TC20/SC14. При этом подкомитет SC13 рассматривает вопросы сбора данных и информационные системы передачи данных. Подкомитет SC14 имеет дело с космическими системами и их эксплуатацией. Функцию секретариата SC14 выполняет институт AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics).

Процедура принятия стандарта ISO (International Organization for Standardization) до публикации включает три этапа голосования. По мере продвижения рассматриваемый документ изменяет название от рабочего проекта (Working Draft — WD) к проекту комитета (Committee draft — CD), далее проекту международного стандарта (Draft International Standard — DIS) и, наконец, к международному стандарту (IS).

До недавнего времени в ISO/TC20/SC14 рассматривались три проекта международных стандартов, относящихся к lean спутникам:

1. ISO/DIS/17770 Space Systems — CubeSats.
2. ISO/DIS/19683 Space Systems — Design Qualification and Acceptance Tests of Small Spacecraft and Units.
3. ISO/CD/20991 Space Systems — Requirements for Small Spacecraft.

Первый стандарт представляет собой ISO версию стандарта CubeSat Калифорнийского политехнического университета (California State Polytechnic University, США). Процесс его рассмотрения завершён, он опубликован как международный стандарт в июне 2017 г.

Второй документ относится главным образом к испытаниям. Из-за некоторого недопонимания терминологии его разработка затормозилась примерно на 1 год. В итоге после последовательного изменения названия «малоразмерных спутников» на «lean-спутники» и затем на «малоразмерные космические аппараты», он был представлен на итоговое голосование в ноябре 2016 г. Итоговое положительное голосование состоялось 17 июля 2017 г.

Третий документ был внесён в ISO/TC20/SC14 в 2015 г. В нём описан минимальный набор требований к любому космическому аппарату независимо от его размеров, миссии, полезности, возможностей или чего-либо ещё. В декабре 2015 г. различные концепции lean-спутников и стандарта ISO/WD/20991 были обсуждены в ходе международной рабочей группы по стандартизации университетских спутников и CubeSat. Голосование по комитетскому проекту стандарта состоялось в сентябре 2016 г. Окончательная публикация стандарта произошла летом 2018 г.

## ISO/DIS/19683 SPACE SYSTEMS — DESIGN QUALIFICATION AND ACCEPTANCE TESTS OF SMALL SPACECRAFT AND UNITS

Настоящий стандарт описывает минимальные требования и методы испытаний, необходимые для получения проектной и производственной квалификации коммерческих малых космических аппаратов и их составных частей, а также для приёмки конечной продукции. Стандарт уделяет особое внимание достижению надёжности космического аппарата после его запуска при сохранении низкой стоимости и обеспечении малых сроков поставки изделия.

Замысел данного стандарта охватывает различные категории: мини, микро, нано, пико и фемто. Таким образом, для удобства изложения термин МКА (малые космические аппараты) использован в данном документе как универсальный термин. Стандарт охватывает и CubeSat, поскольку при их разработке

также используются нетрадиционные процессы. В тоже время он не распространяется на механизмы выведения, такие как POD, а также на испытания программного обеспечения. Данный стандарт также не включает требования по обеспечению безопасности и уменьшению количества космического мусора.

Требования к испытаниям МКА вытекают из общей философии верификации. В приложении А стандарт уделяет значительное внимание прояснению разницы между традиционными спутниками и МКА в терминах характеристик проектирования и стратегии верификации.

## ISO/CD/20991 SPACE SYSTEMS — REQUIREMENTS FOR SMALL SPACECRAFT

Данный стандарт описывает минимальные требования для МКА, которым должен удовлетворять любой КА, независимо от философии разработки. Указанный стандарт исчерпывающе выражает такие требования и полностью соответствует существующим и уже применяемым стандартам. В этом смысле стандарт служит стандартом верхнего уровня, покрывающим минимальные требования к разным *стадиям жизненного цикла* создания системы МКА, особенно акцентируясь на этапах проектирования, запуска, развёртывания, эксплуатации и утилизации. Приведённый стандарт адресован разработчикам МКА, поставщикам диспенсеров и операторам пусковых услуг.

Активность по разработке стандарта началась в 2014 г. в подкомитете ISO/TC20/SC14. Несмотря на то, что изначально он предназначался для коммерческих спутников, его применение может распространяться и на научные, и на образовательные спутники. Сегодня высоко востребованными являются запросы общества к стандартизации разработки и создания малых спутников, особенно университетами и развивающимися странами. Учитывая возникающие обстоятельства, в 2016 г. Международная академия астронавтики (МАА) учредила новую исследовательскую группу 4.18, которая призвана провести экспертизу определений малых спутников и разграничить требования, которым должен удовлетворять каждый спутник, независимо от его размеров, и малый спутник в отдельности от традиционных спутников, сохраняя изначальную цель обеспечения дешевизны и быстрой поставки. Итоговый отчёт группы был представлен в МАА в марте 2016 г. [160].

Исследовательская группа обобщила опыт 18 экспертов в *lean*-спутниках из 15 стран. Требования разделены на несколько категорий, связанных с уменьшением космического мусора, радиочастотной координации, регистрации спутников в каталогах ООН, безопасности, деактивации перед утилизацией, внешним взаимодействиям, экспортному контролю и др. Показано, что многие аспекты являются общими. Основываясь на рекомендациях исследовательской группы, были сформулированы требования, нашедшие отражение в итоговой версии стандарта ISO/CDC/20991.

В сборнике международных стандартов *CubeSat Standards Handbook* изложены основные принципы построения и взаимодействия космического комплекса, протоколы информационного взаимодействия и логического сопряжения, варианты и принципы схемотехнической реализации.

Разделы, рассматриваемые в *CubeSat Standards Handbook*, включают:

- космическое межсетевое взаимодействие;
- системы управления полётами и информацией;
- обслуживание бортовых устройств космических аппаратов;
- системотехнику;
- перекрёстное взаимодействие подсистем;
- космические линии связи.



## 8.4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ГОТОВНОСТЬ СЛУЖЕБНОЙ И ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ МКА

Переход к использованию технологий шестого технологического уклада в космической деятельности в последнее время становится ведущим трендом, поскольку с их внедрением становятся возможными два важнейших аспекта: переход к созданию спутников на печатной плате и спутников на кристалле, значительно удешевляющих массовое производство МКА.

В книге [16] подробно рассмотрено использование уровней готовности технологий для использования в конкретных прикладных разработках космической техники. С целью координации работ по разработке и внедрению новых технологий в аэрокосмический сектор США в NASA была предложена шкала технологической готовности (Technology Readiness Levels — TRL), разработанная, чтобы помочь системным инженерам смягчить риски, связанные с использованием новых технологий. Более того, стандарты США *запрещают* переходить к использованию новой технологии в разработке, если она не имеет, по крайней мере, *шестого* уровня готовности (TRL 6).

Хотя концепция TRL известна более 30 лет, она всё ещё недостаточно понята и часто интерпретируется неверно. В результате мы нередко осуществляем программы без полного понимания либо готовности ключевых технологий, либо того, что требуется для доведения их до соответствующего уровня. Невозможно понять масштабы и объём разработок программы без ясного понимания исходных данных технологической завершенности всех элементов системы.

Ещё один очень важный аспект развития космической техники заключается в использовании технологий наступившего недавно шестого технологического уклада [161].

В данном разделе рассмотрим уровни готовности технологий служебных систем и целевой аппаратуры МКА по данным работы [162]. Сначала оценим состояние работ по всем основным служебным системам с двух позиций: текущее и ближайшая перспектива.

### ПЛАТФОРМЫ МКА

*Текущее состояние:* в настоящее время МКА стали весьма привлекательны вследствие низкой стоимости разработки и укороченных сроков создания. Безусловно, существует очевидный компромисс между размером КА и его функциональностью, но успехи в развитии микроэлектроники позволяют его успешно преодолеть. Например, миниатюризация микроэлектромеханических систем (Micro-electro-mechanical Systems — MEMS) позволила создать компоненты с размерами микромасштаба (несколько микрон). Кроме небольших размеров приборы, использующие MEMS-элементы, обеспечивают лучшую точность достигаемых характеристик и снижение электропотребления по сравнению с традиционными системами КА. И это несмотря на то, что многие МКА создаются и комплексируются в университетских лабораториях.

*Перспектива:* дальнейший тренд к миниатюризации и более высоким уровням интеграции, особенно заметным для пико- и фемтоспутников. Весьма многообещающими представляются распределённые архитектуры космических миссий.

Современные исследования сфокусированы на снижении стоимости и уменьшении сроков создания и интеграции КА. Это обеспечивается несколькими принципами, в частности более частым применением COTS, а так-

же электронных компонент индустриального уровня качества, для которых уже сегодня достигнуты высокая миниатюризация и интеграция. Технология сборки по принципу конструктора (Plug-and-play) из унифицированных модулей позволяет значительно ускорить сборку КА в любой необходимой потребителю конфигурации. Применение быстрого прототипирования методами 3D-печати конструктивных элементов, компонент и даже достаточно сложных подсистем представляет существенно более гибкие возможности ускорения производственных процессов. Минимальный предел массы в будущем может быть обеспечен стандартизованными спутниками на кристалле (ChipSats), интегрирующими все требуемые компоненты спутника на едином кристалле [163].

## ЭНЕРГЕТИКА

*Текущее состояние:* Современные МКА используют улучшенные технологии генерации и хранения электроэнергии с 29 % КПД для солнечных элементов на тройном переходе, лёгких по весу ( $85 \text{ мг/см}^2$ ), а также литиево-ионные аккумуляторные батареи с высокой удельной мощностью (в среднем  $200 \text{ Вт}\cdot\text{ч}\cdot\text{кг}^{-1}$ ). Ускоренное внедрение плоских полимерных литиевых батарей для космической индустрии уникально само по себе из-за повышенного риска их использования разработчиками миссии, а также более строгих требований по массе и объёму. Системы управления распределением электроэнергии сегодня надёжны и устойчивы к условиям космического пространства даже в случае единичных поставок. Все системы КА могут получать реальные преимущества за счёт усовершенствования технологий и миниатюризации компонент на рынке промышленной электроники. Характеристики и статус TRL элементов солнечных батарей соответствуют уровню 9, а батарей питания — уровню 6.

*Перспектива:* в настоящее время при разработке новых концепций размещения солнечных батарей рассматриваются гибкие солнечные ячейки. Ещё одна перспективная технология для использования в CubeSat — радиоизотопный тепловой генератор (Radioisotope Thermal Generator — RTG), пока имеет уровень технологической готовности TRL 2, т. е. эти разработки ещё не вышли из стадии фундаментальных исследований.

## ДВИГАТЕЛИ

*Текущее состояние:* двигатели для МКА быстро развиваются, хотя в настоящее время представляют пока несовершенный технологический домен. Наиболее распространены двигатели на холодных газах с удельным импульсом порядка  $I_{sp} = 70 \text{ с}$ , твёрдотельные двигатели с  $I_{sp}$  порядка 270 с и импульсные плазменные двигатели ( $I_{sp}$  порядка 830 с). В скором времени ожидается появление на рынке экологических монотопливных систем с  $I_{sp}$  порядка 300 с. Двигатели малой тяги на холодном газе уже обладают уровнями TRL 7–9, а химические двигатели — TRL 6–9.

*Перспектива:* в ближайшие 5 лет прогнозируется развитие как химических, так и электрических двигателей. Также в разработке находятся гидролитические технологии, использующие расщепление воды на водород и кислород, используемые совместно с интегральными первичными реактивными двигателями малой тяги и системами ориентации и стабилизации. Хотя реально такие технологии недавно вышли из стадии фундаментальных исследований, некоторые образцы прошли опытную эксплуатацию на экспериментальных КА следующего поколения.

## СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ

*Текущее состояние:* современные средства ориентации и стабилизации (Attitude Determination and Control System — ADSC) для МКА используют технологии миниатюризации без существенного ухудшения их характеристик. Сегодня миниатюризация внедрена для ряда усовершенствованных технологий, таких как новые фотокамеры, материалы и электронная оснастка. Суммарная точность удержания ориентации типичных мини- и микроспутников для дистанционного зондирования Земли сегодня находится на уровне порядка  $0,1^\circ$ . Более высокая точность может быть достигнута путём включения основного целевого прибора полезной нагрузки миссии в цепь обратной связи системы ориентации и стабилизации. Точность ориентации нано- и пикоспутников, включая CubeSat, на порядок хуже и достигает величины порядка  $2^\circ$ , но очень быстро улучшается благодаря миниатюризации компонент подсистемы ADSC. Ограничивающий фактор для ориентации CubeSat — система управления положением КА; сегодня эта точность достигает уровня  $1,8^\circ$ . Постепенное снижение стоимости разработки программного обеспечения для ADSC будет приводить к повышению экономической эффективности использования МКА. Существующие маховики и приёмники GPS для МКА имеют TRL 7–9.

*Перспектива:* Точность ориентации CubeSat может достигнуть величин ниже  $1^\circ$  за счёт миниатюризации, в первую очередь, звёздных датчиков.

*Технологические проблемы:* для КА легче 100 кг необходима разработка технологии рулевых двигателей для ADSC, особенно при переходе на миссии дальнего космоса на базе малых КА.

## КОНСТРУКТИВЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕХАНИЗМЫ

*Текущее состояние:* коммерческие компании производят конструктивы для широкого спектра миссий на МКА. Лидируют на этом рынке такие компании, как Pumpkin, ISIS (Innovative Solutions In Space) и SSTL. Большинство конструктивов разрабатываются на собственных производствах этих компаний и предназначено для создания мини- и микроспутников. Однако наблюдается постепенное уменьшение выпуска конструктивов собственными силами и разработчики наноспутников стремятся покупать подобные системы в уже готовом виде. Конструктивы CubeSat следуют определённым стандартным требованиям в части их размеров и используемых материалов

Основной материал, используемый для конструктивов малых КА, включая CubeSat — это алюминиевые сплавы, имеющие высокую прочность и надёжность (средняя плотность порядка  $2,8 \text{ г/см}^3$ ). В последние несколько лет стали более часто использоваться для этих целей композитные материалы, но из-за высокой стоимости они пока не нашли широкого применения. Исполнительные механизмы и актуаторы МКА многократно подтвердили свою надёжность, работая в условиях космического пространства. Например, коммерческие компании SSTL или Honeybee Robotics предлагают механизмы развёртывания и ориентации антенн с высокими уровнями технологической готовности.

*Перспектива:* аддитивные технологии трёхмерного прототипирования конструктивов оцениваются как основной метод массового производства платформ МКА.

## СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

*Текущее состояние:* пассивные системы терморегулирования для МКА используют теплоизоляцию в виде многослойной изоляции и бета-ткани, или теплое покрытие из белой и чёрной полиуретановой краски и плёнки.

Перенос тепла гарантированно обеспечивается тепловыми трубками (плоские или петлевые тепловые трубки), задвижками, омывателями, уплотнителями и прокладками. *Пассивное терморегулирование* является дешёвым и низкорисковым, а поэтому представляется надёжным способом именно для МКА.

Системы *активного терморегулирования* имеют более жёсткие проектные требования (в терминах массы и энергии), что существенно усложняет их применение в МКА. Инженеры стараются в первую очередь обеспечить электрическими нагревателями и холодильниками, обеспечивающими поддержание заданной эксплуатационной температуры, температурно чувствительных приборов, например батарей и съёмочных камер. До тех пор, пока не удастся миниатюризировать существующие активные тепловые методы, эффективное применение указанных технологий на МКА представляется маловероятным. При этом существующие технологии пассивного терморегулирования имеют TRL 9.

*Перспектива:* Существует тренд миниатюризации активных систем терморегулирования, устанавливаемых на больших КА, применением MEMS и других наноприборов.

*Технологические проблемы:* наноспутники приближаются в размерах к 6U, что приводит к генерированию количества тепла большего, чем возможно пассивно рассеять существующими технологиями. Необходима разработка новых активных и пассивных систем в формфакторе CubeSat.

## УПРАВЛЕНИЕ КОМАНДАМИ И ДАННЫМИ

*Текущее состояние:* технологии управления командами и данными (Command and Data Handling — C&DH) восприняли многие новшества коммерческой индустрии. Сегодня системы C&DH имеют существенно большие возможности, но при меньшей массе, энергопотреблении и объёмных характеристиках. Данный общий тренд позволил рассмотреть применение МКА в широком наборе разрабатываемых миссий. Энерговооружённость и надёжность, традиционно относящиеся к основным ограничивающим факторам, в МКА претерпели значительные изменения в лучшую сторону вследствие внедрения коммерческих технологий и повышенной устойчивости к рискам. Для ускоренного совершенствования и сокращения времени на получение квалификации многие платформы МКА используют компоненты COTS (Commercial Off-The-Shelf) C&DH. Несмотря на то, что существующий высокий темп инноваций стабилизируется, общее совершенствование технологии C&DH в МКА всё ещё остаётся весьма обещающим. Процессорные компоненты обладают уровнями TRL 7–9.

## УСТРОЙСТВА СВЯЗИ

*Текущее состояние:* современные стратегии передачи спутниковой информации используют VHF-диапазон (Very High Frequency), UHF (Ultra High Frequency), микроволновый, а также видимый/инфракрасный диапазоны спектра электромагнитных волн. Выбор связного частотного спектра зависит от ряда факторов, включающий ожидаемый объём передаваемых данных, имеющийся запас электроэнергии, лимит массы и разрешение на использование соответствующей частоты. Современные технологии обозначают уверенный

тренд в направлении увеличения несущей частоты сигналов, а также повышение скоростей передачи данных. Отметим также требования к повышению несущей частоты, а также мощности излучения передатчиков при снижении их массы. При использовании технологий передачи информации, приемлемых для МКА на низких околоземных орбитах, трансмиттеры UHF/VHF позволяют получить максимальную скорость передачи данных порядка 38 кбит/с, S-диапазона — 10 Мбит/с, X-диапазона — около 500 Мбит/с и для K/Ku/Кa-диапазонов — около 1,2 Гбит/с. Инфракрасная система связи миссии НАСА Ames' LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) продемонстрировала скорость передачи данных порядка 2,88 Гбит/с. Проведён также ряд работ по установке антенн с высоким коэффициентом усиления, позволяющим увеличить объёмы передаваемых данных.

Сегодня уже доступны развёртываемые высокоэффективные антенны для CubeSat с максимальным коэффициентом усиления около 15...20 дБи. Также была продемонстрирована возможность передачи данных на КА через группировку низкоорбитальной связи «Иридиум» (Iridium).

Появление программируемых радиоприёмников (Software Defined Radio — SDR) пока не полностью заменило аппаратно реализованные радиоприёмники. Хотя SDR могут функционировать на различных частотах с сигналами разных типов модуляции просто изменением программного обеспечения и имеет меньшую диаграмму направленности, чем аппаратный радиоприёмник, он обычно потребляет больше электроэнергии, что является серьёзным недостатком CubeSat, имеющих ограниченный энергетический запас. С другой стороны, его преимущество состоит в том, что единственный модуль SDR может работать как набор радиоприёмников на разных частотах и может перепрограммироваться непосредственно в полёте.

Лазерная связь для CubeSat обрела технологию уровня TRL 8, продемонстрированную в космическом полёте в 2016 г. Хотя сами лазеры на борту CubeSat имеют более высокий статус TRL, асимметричная лазерная связь пока обладает более низким TRL из-за того, что лазер располагается на наземной станции. При этом лазерный луч модулирован и пассивно отражается на борту CubeSat обратно на Землю.

*Перспектива:* область сегодняшнего повышенного интереса сосредоточена вокруг возможности лазерной связи для CubeSat. Также исследуются возможности двухсторонней связи с использованием спутниковых систем связи Iridium и Globalstar.

*Технологические проблемы:* необходима разработка технологии связи с МКА в дальнем космосе.



# ГЛАВА 9 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНДУСТРИИ КОСМИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Существует достаточно большое количество определений понятия информационной системы. Например, в соответствии со стандартом ISO/IEC 2382:2015 — это система, предназначенная для хранения, поиска и обработки информации, и соответствующие организационные ресурсы (человеческие, технические, финансовые и пр.), которые обеспечивают и распространяют эту информацию. Можно найти ещё некоторое количество определений информационных систем, которые будут достаточно близки к приведённому, в том или ином виде раскрывая или сужая область рассмотрения.

Применительно к космическим информационным системам данное выше определение следует дополнить словом «создание», т. е. космическая информационная система предназначена не только для хранения, обработки, поиска и распространения информации посредством задействованных ресурсов, но и для её (информации) *создания*.

Бесспорно, за прошедшие десятилетия успешной истории освоения космического пространства космические информационные системы эволюционировали вместе с применяемыми при их создании технологиями. В дальнейшем предполагается рассмотреть современное состояние и тенденции развития основных информационных космических систем, имеющих существенное применение на коммерческом рынке.

## 9.1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИНДУСТРИИ КОСМИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В развитии сегодняшней мировой космической индустрии выявлены пять основных трендов:

- 1) технологические усовершенствования создаваемых космических систем, приводящие к более приемлемым ценам для потребителей и, следовательно, более рентабельной космической деятельности;
- 2) увеличение доли частных инвестиций новых участников космической деятельности;
- 3) рождение глобальной экономики, которая всё более зависима от данных, получаемых космическими и наземными средствами, что приводит к эффектам диверсификации космических возможностей и рынков;
- 4) возрастание широкого взгляда на космос как преобразующую среду человечества, и наконец
- 5) военно-стратегические разработки [164].

Распределение направлений развития и использования космических технологий в глобальной экономике представлено на диаграмме рисунка 164 (см. с. 259) [165]. По оценкам компании Euroconsult, в 2014 г. глобальная

выручка от коммерческого применения космических технологий составляет 99 млрд долл., в то время как по ФКП (Федеральная космическая программа) России — 30 млрд руб./год.

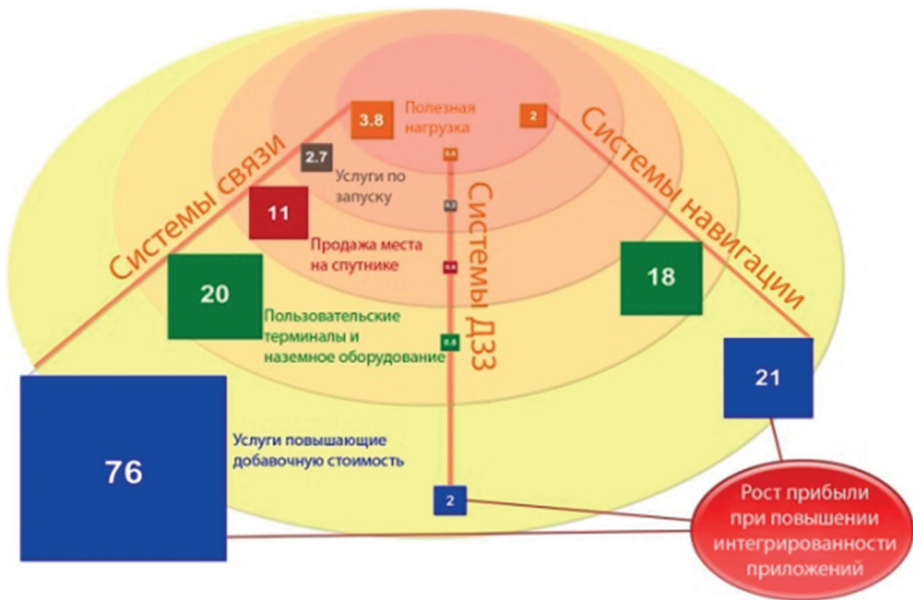


Рисунок 164. Глобальная выручка от коммерческого применения космических технологий

В 2016 г. общий объём выручки глобальной космической индустрии составил 334,5 млрд долл. США. Причём больше половины средств приходится на долю США. Из диаграммы видно, что наиболее востребованными потребителями сегодня являются услуги космической связи, более чем в три раза превышающие услуги спутниковой навигации и более чем в 30 раз услуги ДЗЗ (см. рисунок 164). Отметим, что создание полезных нагрузок, услуги по запуску, продажа мест на спутниках, а также производство пользовательского оборудования в совокупности многократно уступает оказанию услуг конечным пользователям. Это в свою очередь означает, что максимальный потенциальный рост коммерческого применения в ближайшем будущем будет наблюдаться именно в указанных направлениях.

Современное развитие мировой космической индустрии характеризуется активным проведением революционных преобразований. Этому способствует как переход к использованию технологий шестого технологического уклада, вхождением мировой экономики в четвёртую промышленную революцию и, как следствие, переход космической деятельности в эру Space 4.0 [165].

Следует отметить, что эволюция космической деятельности претерпела ряд этапов: от астрономических наблюдений Space 1.0 — через космическую гонку 1950-х гг. прошлого столетия Space 2.0 — к сотрудничеству в космосе с момента падения берлинской стены Space 3.0 — к современному предоставлению услуг обществу Space 4.0. Реформирование космического сектора в новую эру характеризуется появлением новых возможностей, например:

- на рынок выходят частные малые предприятия и стартапы;
- возникают новые модели бизнеса;
- осуществляется децентрализация космической деятельности;

## 9.2. ПЕРЕХОД ОТ ВАЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫРЫХ ДАННЫХ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСЛУГ

- упрощается доступ в космос за счёт появления новых РН;
- создаются инновационные подрывные технологии [166];
- наступает глобальная цифровизация предприятий космической индустрии.

Десять приоритетных технологий четвёртой промышленной революции, которые определяют ближайшее будущее и космической отрасли в порядке ранжирования, проведённого международной рабочей группой Shaping the Future of Production in Russia в октябре 2017 г. в Женеве, представляют собой следующий набор (рисунок 165) [167]:

- 1) цифровое проектирование, имитация и интеграция;
- 2) высокопроизводительные суперкомпьютеры;
- 3) аддитивное производство с использованием 3D-принтеров;
- 4) современные материалы;
- 5) роботизация и искусственный интеллект;
- 6) большие данные и прогнозная аналитика;
- 7) интернет вещей;
- 8) дополненная и виртуальная реальность;
- 9) технологии блокчейна;
- 10) промышленные биотехнологии.



Рисунок 165. Основные компетенции компаний космической индустрии

Соответственно, компетенции современного предприятия космической индустрии также претерпевают значительные изменения в соответствии с велением времени — цифровой перестройкой экономики. При этом основу подобной цифровой платформы предприятий обеспечивают потоки цифровых данных, используемых на всех этапах производства как космической техники, так и продуктов и услуг на основе космической информации [168].

## 9.2 ПЕРЕХОД ОТ ВАЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫРЫХ ДАННЫХ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСЛУГ

Количество спутников различного целевого назначения, функционирующих на орбите, порождает огромное количество геопространственных данных, получаемых из космоса. Однако сами по себе эти данные, не преобразованные

в информационные продукты, пригодные для использования в интересах различных потребителей, не представляют собой особой ценности. Прогноз глобального рынка геопространственных технологий представлен на рисунке 166 [169].

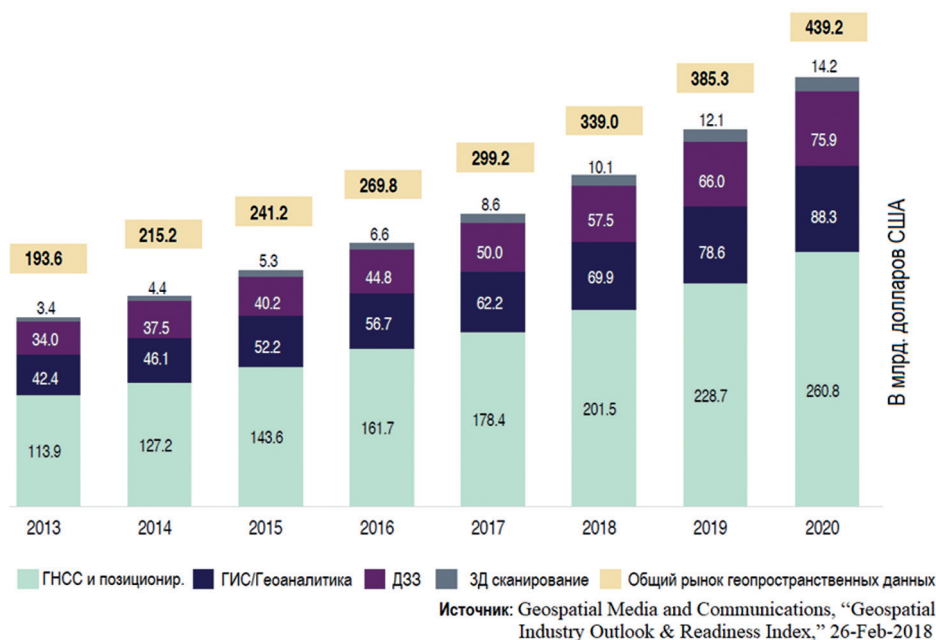


Рисунок 166. Объём глобального рынка геопространственных данных

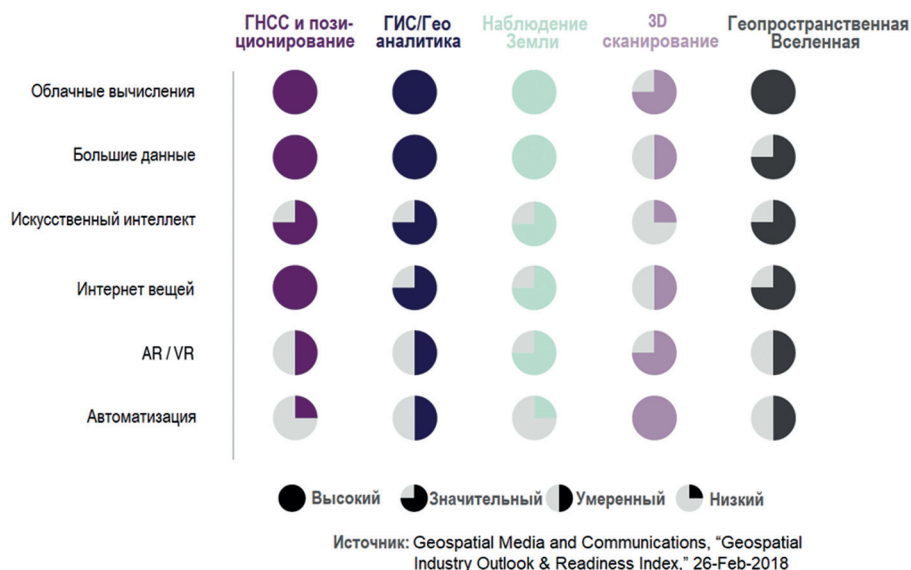
Главное свойство информации, обуславливающее её полезность — возможность оперативной доставки ДДЗ потребителю. До недавнего времени технологии передачи данных включали в себя запись на магнитные ленты или магнитооптические диски, передачу по телефонным каналам, волоконно-оптическим кабелям или спутниковым каналам связи. В перспективных способах доступа к данным ДЗ отмечается применение прямого электронного подключения вместо переноса данных на магнитных и оптических средах, что значительно повышает эффективность их использования.

Распределение значительных обрабатывающих мощностей между персональными компьютерами и рабочими станциями укрепило интерес пользователей по доступу к данным и информации в онлайн-режиме. Чтобы облегчить своим сотрудникам возможности доступа и обработки различных типов данных и информационных продуктов, большинство крупных компаний объединены в локальные вычислительные сети. Кроме локальных сетей обмена данными организуются и глобальные сети, в которых подобный обмен осуществляется на значительных географических площадях.

Всё большее распространение получает возможность получения данных ДЗ по мировому интернету. Естественно, при этом возникает необходимость разработки системы подключения узловых компьютеров к серверам пользователя высокоскоростными волоконно-оптическими линиями связи, что обеспечивает высокую эффективность сетевых структур.

Обновление линий связи на волоконно-оптические очень эффективно, поскольку по сравнению с недавним прошлым стоимость аренды таких каналов существенно уменьшилась.

Постоянное увеличение потоков информации, поступающих с ИСЗ, требуют поиска путей повышения эффективности при обработке получаемых ДДЗ. Чтобы достичь этой цели, учёные и другие пользователи будут требовать создания компьютерных систем, способных управлять, организовывать, сортировать, распределять и манипулировать ДДЗ с приемлемыми скоростями, т.е. создания новых геоинформационных технологий. Ключевые драйверы информационных технологий индустрии геопространственных данных, продвигающие решение указанной проблемы, представлены на рисунке 167 [169].



**Рисунок 167.** Ключевые технологические драйверы геопространственной индустрии

Из диаграммы рисунка видно, что максимальный рейтинг имеют технологии облачных вычислений, больших данных и интернета вещей применительно в ДЗЗ, ГИС и навигации.

На рисунке 168 (см. с. 263) [170] представлены современные технологии оказания услуг в области ДЗЗ, обеспечивающие создание рыночного механизма в Европе, предлагаемые европейской ассоциацией компаний, занимающихся ДЗЗ EARSC (European Association of Remote Sensing Companies) и представляющих около 80 участников из 23 стран ЕС, обеспечивающих всю линейку услуг по созданию добавленной стоимости, включающих коммерческих операторов спутников ДЗЗ, продавцов данных, обработчиков ДДЗ, поставщиков геопространственной информации, систем и ПО, а также консультантов.

Очевидно, что значимость ДДЗ будет напрямую зависеть от методических, технических, организационных и технологических проблем, после решения которых эти данные могут быть превращены в полезную информацию.

Современная европейская аэрокосмическая индустрия акцентирована на трёх ключевых направлениях развития рынка ДЗЗ.

*Гарантированию доступности услуг(и) и инфраструктуры, являющихся основой создания и поддержания рынка услуг в области ДЗЗ.* Данный сервис комбинирует открытые данные и информацию с коммерчески доступными данными и услугами. Данный подход обеспечит конкурентные предложения, а также несколько платформ, представляющих сервисы, призванных обеспечить конкуренцию. Управление инфраструктурой представляется критическим эле-



ментом, поскольку — а) обеспечивает баланс интересов провайдеров услуг ДЗЗ с потребителями информации, заинтересованными в доступе к данным, и б) гарантирует конкуренцию.

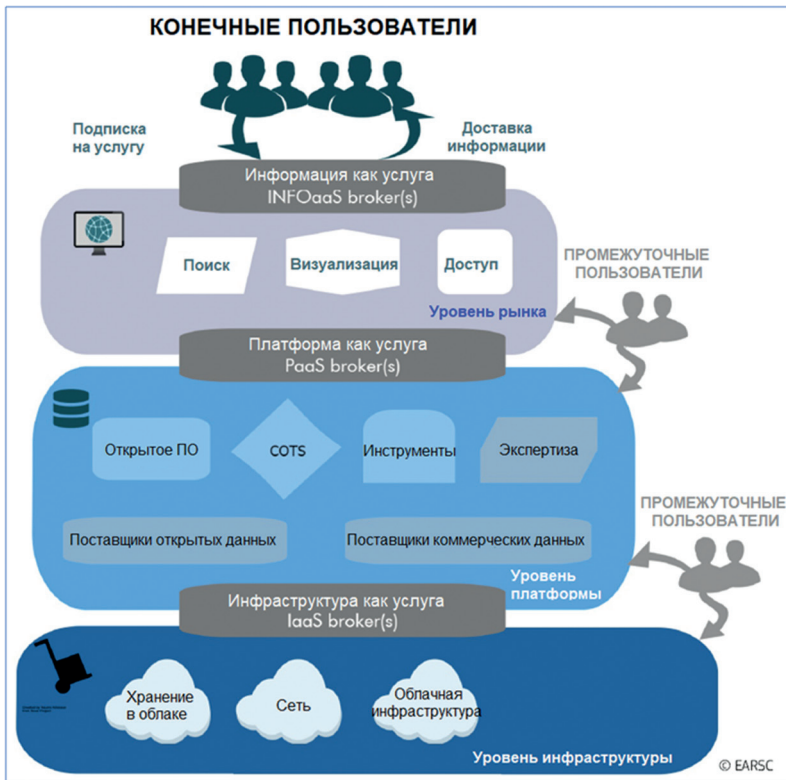


Рисунок 168. Три уровня услуг на основе космических данных

*Созданию в Европе среды для развития частной инициативы.* Это требует чёткого разграничения того, что могут предлагать государство и частный сектор. Руководящим принципом для этого является возможность оказания услуг частным сектором всегда, когда это возможно и разумно. При этом правительства должны только определять свои потребности с позиции перспектив развития сервисов (включая соглашения об уровнях сервисных услуг), оставляя реализацию потребностей частному сектору.

*Поддержке создания рынка.* Рынок услуг ДЗЗ был очень многообещающим, но в конечном итоге не состоялся по разным причинам, несмотря или точнее из-за сильного исторического влияния государства. Доступность разнообразных и надёжных данных всё ещё далека от желаемого, поскольку до сих пор удерживает более 50 % рынка. Для демонстрации значимости оказываемых услуг населению индустрия нуждается в поддержке, она готова действовать, но она не может действовать в одиночку. Сегодня более 50 % рынка услуг ДЗЗ обеспечивается усилиями заказчиками, поддерживающими государственный сектор. Указанное означает, что в перспективе внедрение услуг, порождаемых использованием разнообразных геопространственных данных, будет успешным только при объединении усилий государственного и частного сектора.

В настоящее время в ряде стран создаются национальные информационные системы, использующие потоки спутниковых данных для решения

разнообразных задач, стоящих как перед научным сообществом, так и перед конкретными отраслями производственной деятельности. При этом мир ДЗЗ ускоренно изменяется благодаря успехам в разработке сенсоров и цифровых технологий. В последнее десятилетие произошли экстраординарные изменения в информационных и коммуникационных технологиях, включая интернет, облачные вычисления и хранилища данных, позволившие создать радикально новые способы сбора, распределения и анализа данных о нашей планете. Европа занимает лидирующие позиции в получении ДДЗ за счёт реализации программы Copernicus и создания семейства КА Sentinel.

Кроме того, возникли совершенно новые тренды в использовании результатов космической деятельности, названные «Новый космос» в США и Space 4.0 в Европе, сегодня быстро нарастающие за счёт упрощения использования и коммерциализации. Это обусловлено уменьшением стоимости создания, запуска и обслуживания малых КА, когда новые участники рынка ДЗЗ, включая как стартапы, так и инфокоммуникационные гиганты, продвигают бизнес в массы, создавая новые группировки стандартизованных унифицированных малых спутников. Такие группировки предлагают пользователям новый класс данных о планете Земля с улучшенным пространственным разрешением частотой просмотра. Такой набор ДДЗ существенно улучшается за счёт дополнения в поток данных от миллиардов умных сетей сенсоров, составляющих основу интернета вещей.

Такие потоки динамических данных предоставляют учёным новые возможности по улучшению наших знаний и понимания того, как функционируют и взаимодействуют океан, атмосфера, земная поверхность и криосфера, являющиеся составными частями интегрированной системы Земля. С другой стороны, подобные знания позволяют предпринимателям встраивать большие данные в новые типы информационных сервисов. Вместе с тем, рассмотренные возможности создают новый вызов для учёных, бизнеса, а также поставщиков данных и ПО, которые находят новые приложения таким данным за счёт капитализации вновь возникающих технологий, например, аналитики больших данных [171].

Для работы с получаемыми данными в конце прошлого века в США создана единая информационная система геопространственных данных (схема работы с данными представлена на рисунке 169, см. с. 265), включающая в себя восемь распределённых по территории США активных архивирующих центров (Distributed Active Archive Center — DAAC), взаимодействующих с несколькими зарубежными государствами [172].

Сервис доступа к архивам глобальных изображений GIBS (Global Imagery Browse Services) включает свыше 100 информационных продуктов, отражающих визуализированные научные параметры, получаемые на основе обработки данных спутников EOS. Каждое изображение генерируется с исходным пространственным разрешением источника данных. Работу GIBS поддерживают научные команды, обеспечивающие получение наивысшего качества изображений, предоставляемых научному сообществу. При этом первоначально планируемый суточный объём собираемых данных в 90е гг. прошлого столетия в 1 Тбайт сегодня многократно превышен и только для одного прибора NISAR (NASA Indian SAR) составляет более 85 Тбайт.

Одной из фундаментальных проблем развития современных и разрабатываемых на перспективу систем ДЗЗ является вопрос доступности получаемых данных конечным потребителям. Постоянно увеличивающиеся объёмы собираемых и обрабатываемых данных требуют непрерывного поиска новых методов и средств сбора, обработки и усвоения данных ДЗ.

Начиная с 1958 г., НАСА исследовала Землю и её изменяющуюся окружающую среду за счёт наблюдения за атмосферой, океанами, сушей, льдом

и снегом, а также за их влиянием на погоду и климат. Сегодня уже понятно, что ключ к получению лучшего понимания глобальной окружающей среды заключается в объяснении механизма того, как планетарные системы воздуха, континенты, вода и живые организмы взаимодействуют друг с другом. Такая научная дисциплина, названная на Западе *наукой о Земных системах* ESS (Earth Systems Science) объединяет вместе такие предметные области как метеорология, океанография, геология и биология.

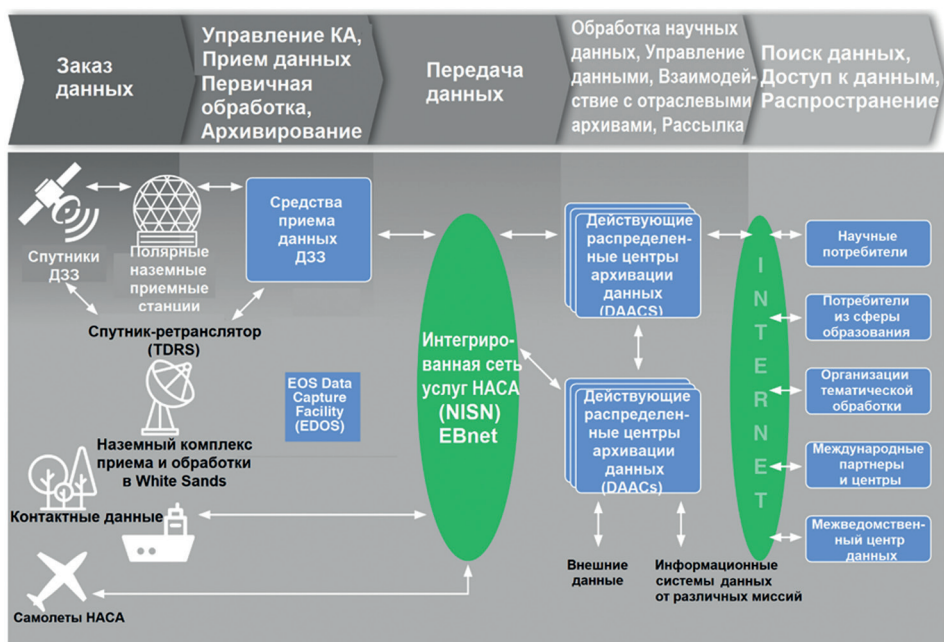


Рисунок 169. Жизненный цикл работы с геопространственными данными в EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System)

В 1991 г. НАСА инициировала всеобъемлющую программу по изучению планеты Земля как интегрированной окружающей среды, которая была названа *инициативой НАСА в науках о Земле* (NASA's ESE). Главной составной частью предложенной программы является *система наблюдения за Землёй* (Earth Observing System (EOS)). Система EOS — это набор спутников, запущенных в последние 30 лет для интенсивного изучения Земли. Реализация данной программы обеспечила расширение нашего понимания того, как природные процессы воздействуют на нас, и как мы могли бы воздействовать на них. Такие исследования улучшили прогнозы погоды, позволили создать новые инструментальные средства для управления сельским и лесным хозяйством, предоставили информацию для рыбаков и местных администраций и, в конечном счёте, обеспечили возможность предсказания климатических изменений в будущем.

В ходе реализации программы НАСА запустило серию спутников EOS, оснащённых 24 различными измерительными датчиками, предназначенными для комплексных геофизических исследований Земли. Дополнительные данные НАСА получает от малых, узкоспециализированных спутников. Очевидно, что количество данных, собираемых, обрабатываемых и распределяемых в системе, беспрецедентно.

Фундаментальной отличительной чертой программы является то, что в рамках созданной информационной системы обеспечен открытый доступ к данным широкой общественности, включая академическое и промышленное сообщества. Можно утверждать, что открытый доступ к данным и их своевременная готовность существенно ускорили прогресс в исследованиях изменений климата. Как следствие, большее количество информации уже доступно лицам, принимающим решения, относящимся к оценкам качества окружающей среды, управлению землепользованием и другим ключевым политическим областям. Кроме того, подобный подход активно развил новые практические приложения, а также коммерческую продукцию и услуги, произведённые с помощью данных программы EOS.

### 9.3 СИСТЕМА E-CORSE — НОВЫЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ДЗ

Безусловно, основное применение малоразмерных КА в ближайшее время ожидается в создании оперативных группировок ДЗЗ оптического наблюдения, позволяющих ускорить процесс коммерциализации рынка ДЗЗ. К сожалению, существующая инфраструктура получения данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения, за исключением военных применений, не позволяет осуществлять просмотр любой заданной территории на земной поверхности в реальном масштабе времени. Это обусловлено, в первую очередь, высокой стоимостью подобных КА, а также существующими ограниченными возможностями по сбору и распространению данных. В работе [173] предложено поменять парадигму организации системы ДЗЗ. По аналогии с развитием системы персональной мобильной связи и позиционирования GPS/ГЛОНАСС отмечается, что существенное снижение цены предоставляемой услуги возможно только после освоения массового рынка.

Понятно, что рынок ДЗЗ сегодня находится на начальной стадии профессионального использования данных ДЗЗ. Для того чтобы эти данные получили максимальное количество потребителей, необходимо, чтобы производство продукции ДЗЗ стало действительно массовым. Именно такая идея и была положена в основу системы e-CORCE (electronic – Continuous Observing system Relayed by Cellular processing Environment), в которой предполагается получать изображения всего земного шара с разрешением 1 м в течение 1 дня. При этом *continuous observing* означает «непрерывно обновляемые снимки поверхности Земли», а *relayed by cellular processing environment* относится к утверждению, что концепция системы основана на тесном взаимодействии трёх сотовых слоёв среды обработки получаемых данных: космического, телекоммуникационного и сетевого (Grid). По существу данный подход означает усовершенствование сервиса Google Earth «я хочу увидеть любое место на земной поверхности в любое время» путём привнесения в него оперативной динамики обновления данных съёмки земной поверхности.

Таким образом, в дополнение к возможности выбора любого элемента Google Earth в статике возникает его динамическая составляющая.

Три полностью интегрированных технических уровня, обеспечивающих единую концепцию e-CORCE, представляют собой:

- космический сотовый уровень, который обеспечивает использование полностью автоматизированной спутниковой группировки оптического наблюдения, постоянно снимающей всю земную поверхность в течение 1 дня с разрешением 1 м (предполагается наличие 100 или более КА);

- телекоммуникационный сотовый уровень. Спутники постоянно передают сильно сжатый (например, в формате \*.jpeg) поток отснятой информации в наземные центры. Телекоммуникационные операции будут автоматизированы и предельно упрощены, что полностью устраняет участие оператора — человека на приёмной станции. Применение IP-адресации создаёт возможность организации общего канала передачи данных для сигналов управления и телеметрии;
- наземный сотовый уровень WAG (Wide Area Grid). Из-за огромного количества информации, собираемой ежедневно, вся обработка будет полностью распределена по всей земной поверхности, обеспечивая приемлемое локальное покрытие данными для каждой наземной станции приёма. Грид-технология способна обеспечить подобную организацию распределённой обработки, учитывая, что земная мозаика никогда не будет централизованно объединяться, приводя к созданию «виртуального глобуса».

Основное достоинство предлагаемого подхода состоит в том, что для распространения конечного информационного продукта не требуется никакого распределения конечных потребителей или головного центра, нигде не создаётся законченная мозаика изображения земной поверхности. При этом конечный продукт распределён логически, но он никогда физически не возникает, поскольку доступен как виртуальный продукт IP-интернет или функционально эмулируется.

По оценкам авторов [174] необходимая общая компьютерная мощность составляет 5000 персональных компьютеров (PC, из них 1000 — в 2012 г.), распределённых по 50—100 приёмно-обрабатывающим центрам, способным генерировать на ежедневной основе глобальную мозаику с разрешением 1 м. Любой узел WAG будет использовать до 20 PC для создания своей локальной мозаики.

Поскольку вся Земля постоянно доступна для обзора, не требуется программирование работы съёмочной оптической аппаратуры, она просто работает непрерывно.

За счёт того, что изображение всей Земли постоянно доступно как «виртуальный глобус» не нужен каталог метаданных, что сильно упрощает управление данными.

Вся система полностью автоматизирована, идеология её работы сильно напоминает сервис коммерческой платформы магазина Amazon.

Хранение данных осуществляется каждым потребителем (для хронологии) и только интересных ему данных, а не системой e-CORCE. Это обусловлено в первую очередь тем, что данные постоянно обновляются и соответственно новые изображения дешевле старых.

Перечисленные достоинства подхода приводят к тому, что стоимость конечной информационной продукции уменьшается на четверть по сравнению с существующими ценами, обеспечивая в случае необходимости новое применение.

## 9.4 ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ УСПЕХА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В заключение главы сформулируем основные критерии успеха для информационной системы исследования Земли.

1. Максимизация количества пользователей и интенсивности использования данных ДЗ. Данный критерий не требует комментариев, поскольку



- только массовое применение КИ может привести к значимому повышению эффективности её использования.
2. Непрерывное улучшение для потребителей доступа к данным и услугам. Очевидно, что только возможность доступа к КИ в реальном или, в худшем случае, в квазиреальном масштабе времени, позволяет в полном объёме использовать преимущества космических данных перед любыми другими.
  3. Максимальное удовлетворение запросов пользователя, что должно выражаться в их поддержке развития системы, т. е. пользователь участвует в разработке системы. Чрезвычайно важный критерий. Это подтверждено многолетней международной практикой — только совместные усилия разработчиков космических систем ДЗ и потребителей информации позволяют обеспечить реальное использование данных ДЗ.
  4. Быстрое внедрение результатов научных исследований для повышения устойчивости работы системы, которые были невозможны на предыдущих технологиях и данных. Этот критерий наиболее полно иллюстрируется возможностями улучшения алгоритмов атмосферной коррекции, существенно повышающими точность восстанавливаемых параметров подстилающей поверхности.
  5. Возможность получения доступа других пользователей к исследовательским базам данных и архивам. Поскольку в экспериментальном режиме отработки оперативных технологий получения и обработки ДДЗ доступ к ним имеет ограниченный круг исследователей, реальный потенциальный пользователь может широко использовать только апробированные алгоритмы. Получение доступа к исследовательским архивам позволяет раньше начинать маркетинг новых типов данных.
  6. Сокращение времени от момента получения экспериментальных данных до опубликования результатов исследования. Более оперативный доступ широкого научного и пользовательского сообщества к новым научным результатам позволяет привлечь внимание к потенциально эффективным и может быть коммерчески прибыльным проектам.
  7. Сокращение пропорции исследовательского времени, затрачиваемого на сбор данных в пользу большего времени на их анализ. Стандартизация видов предварительной обработки и типов данных позволяет перенести существенную часть рутинной обработки ДДЗ на технические средства приёма и предварительной обработки данных. Наиболее квалифицированная и наукоёмкая тематическая обработка сосредотачивается в соответствующих структурах, обеспечивающих научно-методическую поддержку технологий ДЗ.
  8. Ускоренная интеграция результатов использования данных, полученных в выбранной области исследований в любых других областях. Взаимопроникновение новых возможностей позволяет получить новое качество традиционно используемых подходов. В случае океанографического применения ДДЗ это наиболее зримо проявляется в использовании спутниковой информации в качестве входных данных в гидродинамические модели океана, используемые для прогнозов океанографического состояния морской среды.

# ГЛАВА 10

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

### 10.1

#### ОТРАСЛЕВАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГОСКОМРЫБОЛОВСТВА РОССИИ

В последние несколько десятилетий в мире получила бурное развитие принципиально новая технология наблюдения за деятельностью надводных объектов, основанная на использовании космических средств навигации и связи, позволяющая с высокой точностью определять местоположение судов независимо от воли судоводителя.

Подобная технология достаточно активно внедряется в практику мониторинговых работ как европейскими, так и многими другими странами азиатско-тихоокеанского региона.

Идея о необходимости создания отраслевой системы контроля местоположения рыболовных судов России, государств СНГ и судов зарубежных государств, ведущих промысел в исключительной экономической зоне (ИЭЗ) России была впервые сформулирована на заседании Коллегии Роскомрыболовства ещё в декабре 1992 г.

Примечательно, что Совет Европейского экономического сообщества (ЕЭС) в июне 1993 г. принял решение о том, что до 1 января 1996 г. рыболовные суда Сообщества должны быть оборудованы системой непрерывного мониторинга за положением судов, использующей спутниковую связь для передачи данных и основанной либо на наземных, либо на космических средствах слежения. Это решение в 1995 г. было признано обязательным для всех государств, являющихся членами Конвенции о международном сотрудничестве в области рыболовства в северо-западной части Атлантического океана (NAFO), членом которой является и Россия. Однако срок введения системы в эксплуатацию постоянно переносился и в конечном был определён на конец 2001 г.

Концепция ОСМ (Отраслевая система мониторинга) была представлена в работе [175]. Можно с уверенностью констатировать, что создание и внедрение российской системы мониторинга рыболовных судов осуществлялось параллельно с созданием подобных систем рядом государств Европейского союза, а по сравнению с некоторыми из них — со значительным опережением.

На сегодняшний день количество рыболовных судов России, подлежащих мониторингу посредством ОСМ, насчитывает более 4000 единиц, а с иностранными судами, осуществляющими промысел в ИЭЗ России — более 5000 единиц. Аналогичной системы по количеству отслеживаемых судов в мире не существует.

Научная подоплёка создания ОСМ заключается в обеспечении объективной информационной поддержки системы государственного управления водными биологическими ресурсами на федеральном и региональном уровнях.

Решение этой проблемы стало возможным с подключением к традиционным методам сбора, обработки и передачи информации методов космических исследований и современных аппаратно-программных систем связи и навигации, а также измерительных информационных технологий.

Главное достижение, реализованное разработчиками ОСМ, состоит в том, что в созданной российской системе, в отличие от других мировых аналогов, реализован не только позиционный контроль за местоположением судов, а обеспечена интеграция всей совокупности мониторинговых данных по алгоритму «объект – среда – промысел».

Данное обстоятельство позволило замкнуть работы по научному обеспечению оценки общедопустимого улова (ОДУ); распределению ОДУ между регионами; средне- и краткосрочному прогнозу состояния промысла в зависимости от вида; наделению и выборке квот по различным объектам, а также оперативному учёту деятельности флота и предприятий в режиме суточных судовых донесений, декадной и квартальной статистической отчётности. Можно с уверенностью констатировать, что российские учёные и специалисты являются пионерами данной идеи.

Дополнительные преимущества созданной системе обеспечило комплексное использование различных технологий позиционирования судов, использующих как спутниковые системы связи, так и традиционные радиоканалы за счёт цифрового избирательного вызова.

Обеспечение задач особого периода и мобилизационной готовности судов флота рыбной промышленности поддерживается за счёт использования отечественных технологий позиционирования и связи ГЛОНАСС и НССС (низкоорбитальная система спутниковой связи) «Гонец».

Впоследствии данная работа сыграла существенную международную роль. Она способствовала широкому развитию и успеху мониторинга как российских, так и иностранных судов, осуществляющих промысел в ИЭЗ России и сопредельных государств, входящих в международные рыбохозяйственные организации, такие как ИКЕС (Конвенция о международном совете по исследованию моря, ICES — International Council for the Exploration of the Sea), НАФО (Конвенция о международном сотрудничестве в области рыболовства в Северо-западной части Атлантического океана, NAFO — Northwest Atlantic Fisheries Organization) и НЕАФК (Международная конвенция о рыболовстве в северо-восточной части Атлантического океана, NEAFC — North-East Atlantic Fisheries Commission). Подтверждением этому факту стало высказывание исполнительным директором Европейского союза во время посещения и знакомства с работой Национального центра системы мониторинга и связи в Москве предложения об использовании идей, реализованных в ОСМ, для мониторинга рыболовства Европейского союза в целом.

Начавшиеся в 1990-е гг. экономические реформы существенно изменили ранее существовавшую структуру информационного обеспечения рыбопоисковых исследований, а также управления всем рыбохозяйственным комплексом в целом. С учётом сложившихся экономических реалий была разработана оптимальная структура мониторинга, обеспечивающая в составе первой очереди работу двух региональных центров мониторинга в Мурманске и Петропавловске-Камчатском.

В проблеме разработки и создания ОСМ разработчиками решены три чрезвычайно важных аспекта: рыбохозяйственный, экономический и экологический.

По экспертным оценкам, экономический эффект от внедрения ОСМ только на Дальнем Востоке России в первый год эксплуатации составил более 3 млрд руб.

Ход работы, её последовательные этапы широко освещались в научных изданиях и обсуждались научной общественностью на многочисленных

Всесоюзных и Всероссийских научных и научно-производственных совещаниях, Коллегии бывшего Роскомрыболовства и Госкомрыболовства России в том числе (Южно-Сахалинск — 1996 г.; Мурманск — 1996, 1997 гг.; Санкт-Петербург — 1996, 1997 гг.; Москва — 1994–2000 гг.), а также на рабочих группах научных комитетов международных рыболовных организаций (ICES, 1997 г.; NAFO, 1996–2001 гг.; NEAFC, 1997–2000 гг.).

Только авторами разработки опубликовано более 200 работ в различных изданиях, включая академические. Внедрение обеспечено нормативно-технологической документацией по всем разделам эксплуатируемых информационных технологий. Разработки ОСМ многократно демонстрировались на международных и отечественных выставках, в частности международных выставках «Инрыбпром» и CeBIT (Centrum der Büro- und Informationstechnik). Предложенные разработки неизменно получали поддержку как научной общественности, так и рыбопромышленников.

Основные итоги исследований и их внедрения отражались в центральной и местной периодической печати, популярных изданиях. Они также отражены в нескольких телевизионных сюжетах, демонстрировавшихся по каналам Центрального телевидения России.

Таким образом, разработка и создание отраслевой системы мониторинга водных биоресурсов, наблюдения и контроля за деятельностью промысловых судов признана ярким проявлением отраслевого научно-технического прогресса. Благодаря ей рыбное хозяйство России изменилось и поднялось на качественно новый уровень. Данная разработка дала толчок к активизации исследований в ряде смежных дисциплин: навигации, картографии, дистанционном зондировании океана космическими средствами наблюдения, информатике, спутниковой океанографии и др.

Использование спутниковых средств связи, дистанционных методов оценки параметров океана с самолётов и спутников в сочетании с промышленной отчётностью направлено на совершенствование системы управления сырьевыми ресурсами.

Научно-технические наработки и определённый опыт практической эксплуатации обусловили выпуск постановления Правительства Российской Федерации от 26.02.1999 № 226 «О создании отраслевой системы мониторинга водных биологических ресурсов, наблюдения и контроля за деятельностью промысловых судов».

Этим постановлением Государственному комитету Российской Федерации по рыболовству поручалось на основе использования космических средств (систем «Аргос», «Инмарсат», «Гонец», «Курс», «Глонасс», «Навстар», других космических систем) и современных информационных технологий создать отраслевую систему мониторинга водных биологических ресурсов, наблюдения и контроля за деятельностью промысловых судов — российских и иностранных, ведущих промысел (поиск и вылов (добычу) водных биологических ресурсов, приёмку, обработку, транспортирование, хранение продукции, её перегрузку, снабжение промысловых судов и установок топливом, водой, продовольствием, тарой и другими материалами) и морские ресурсные исследования во внутренних морских водах, в территориальном море, на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне Российской Федерации, в Каспийском и Азовском морях, а также российских судов, осуществляющих промысел водных биологических ресурсов и морские ресурсные исследования в открытой части Мирового океана и в экономических зонах иностранных государств.

В настоящее время все российские суда длиннее 24 м оснащены техническими средствами, обеспечивающими постоянную автоматическую передачу информации о местоположении судна и позволяющими передавать другие,

касающиеся рыболовства данные, определяемые Государственным комитетом Российской Федерации по рыболовству.

В марте 2000 г. ведомственной комиссией был принят в эксплуатацию Камчатский центр связи и мониторинга, обеспечивающий наблюдение за всеми промысловыми судами, осуществляющими добычу (вылов) водных биоресурсов на дальневосточном бассейне.

В 2001 г. в Москве на базе «Нацрыбресурс» был создан и сдан в опытную эксплуатацию Национальный центр системы мониторинга рыболовства и связи (НЦМС) как головной центр ОСМ. Настоятельная необходимость такого шага обусловлена тем, что по мере реализации постановления Правительства Российской Федерации от 26 февраля 1999 г. № 226 выявилась потребность в едином отраслевом исполнительном органе, а также способном на качественно новом организационном уровне обеспечить работы по поддержанию функционирования созданных региональных центров мониторинга. Структура ОСМ представлена на рисунке 170.

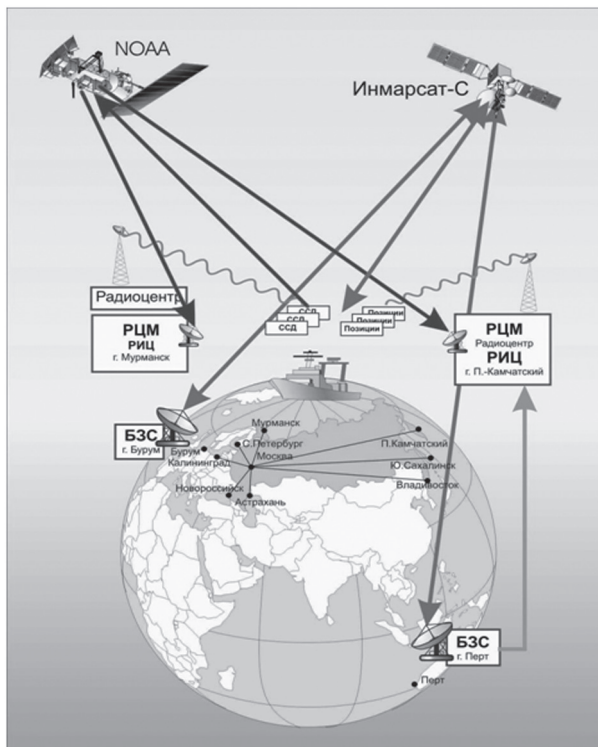


Рисунок 170. Структурная схема ОСМ Госкомрыболовства России

Основными задачами центра определены: координация работ региональных центров, обеспечение информационной поддержки принятия управленческих решений центральным аппаратом Госкомрыболовства России, а также межведомственное информационное взаимодействие.

Постановка проблемы создания ОСМ налагала на инициаторов и исполнителей большую ответственность по выбору оптимальных технологий мониторинга, поскольку в мире уже существовало чёткое разделение между основными производителями информационных технологий и технических средств мониторинга.



Основное достижение, реализованное разработчиками ОСМ, состоит в том, что в созданной российской системе, в отличие от других мировых аналогов, осуществлён не только позиционный контроль за местоположением судов, а обеспечена интеграция всей совокупности мониторинговых данных по алгоритму «объект – среда – промысел».

Данное обстоятельство позволило замкнуть работы по научному обеспечению оценки общедопустимого улова; распределению ОДУ между регионами; средне- и краткосрочному прогнозу состояния промысла в зависимости от вида; наделению и выборке квот по различным объектам, а также оперативному учёту деятельности флота и предприятий в режиме суточных судовых донесений, декадной и квартальной статистической отчётности.

Внедрение ОСМ имеет большое практическое значение и обеспечивает решение следующих задач:

- повышение экономической безопасности России;
- значительное предотвращение ущерба России от незаконного промысла биоресурсов в национальных водах;
- сбалансированное развитие экономики рыбного хозяйства;
- сохранение водных биологических ресурсов внутренних морских вод, территориального моря, континентального шельфа, исключительной экономической зоны Российской Федерации, Каспийского и Азовского морей;
- повышение эффективности научных исследований и достоверности оценки состояния запасов водных биоресурсов, а также среды их обитания, оперативного усвоения и использования полученных результатов;
- независимое позиционирование, наблюдение и контроль за промысловой деятельностью российских и иностранных судов рыбопромыслового флота;
- информационное взаимодействие отрасли на международном и национальном уровнях.

Несомненно, что на базе проведённых исследований и опыта народно-хозяйственного внедрения разработок, роль мониторинга природных ресурсов и производственных объектов в перспективе будет расти. Альтернативы данному пути развития для информационной инфраструктуры рыбного хозяйства России не существует.

## 10.2 ПЕРСПЕКТИВНАЯ МНОГОЦЕЛЕВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «АРКТИКА»

Существующая на протяжении уже более 40 лет российская национальная космическая метеорологическая система «Арктика» включает в себя спутниковый низкоорбитальный космический комплекс «Метеор-М» и спутниковый метеорологический комплекс «Электро-Л» на геостационарной орбите. При этом информация с низкоорбитальных спутников «Метеор-М» собирается дискретно, а от геостационарного спутника «Электро-Л» поступает непрерывно. Однако известная проблема геостационарной орбиты, а именно отсутствие возможности просмотра полярных регионов земного шара, существенно снижает эффективность использования данного типа спутников по целевому назначению.

Данное обстоятельство связано ещё и с тем, что в последнее время существенно возрос народно-хозяйственный интерес к освоению арктического региона. Поскольку глобальное потепление климата привело к значительному

уменьшению площади полярных льдов, то климатологи сделали долгосрочный прогноз, что начиная с 2016 г. Северный морской путь будет открыт для круглогодичного судоходства. Сокращение поверхности ледового покрытия в Арктике способствует повышению активности транспортных потоков в данном регионе. Активизация движения судов по северному морскому пути обуславливается необходимостью освоения богатейших природных ресурсов данного региона.

Для проведения надёжного метеорологического и экологического мониторинга территории Российской Федерации и особенно арктического региона была предложена концепция новой системы спутникового метеорологического мониторинга, включающей наряду с полярными и геостационарными спутниками космические аппараты на высокой эллиптической орбите.

Преимущество использования высокоэллиптических КА состоит в том, что для непрерывного мониторинга арктических широт Российской Федерации с орбит типа «Молния» достаточно применения двух космических аппаратов.

Многоцелевая космическая система «Арктика» предназначена:

- для качественного повышения уровня анализа и прогноза погоды, гелиогеофизической обстановки в околоземном пространстве, условий полёта авиации над арктическим регионом России;
- мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного происхождения и мониторинга климатических изменений;
- обеспечения сбора и ретрансляции информации с наблюдательных платформ наземного, морского и воздушного базирования;
- обеспечения подвижной и фиксированной связи, приёма и передачи цифровой информации, непосредственного спутникового телевизионного и радиовещания.

Предлагаемый состав многоцелевой космической системы «Арктика» включает ракетно-космический комплекс в составе:

- два гидрометеорологических КА «Арктика-М» на высокоэллиптических орбитах типа «Молния» с многоспектральными сканирующими устройствами, гелиогеофизическим и радиотехническим комплексами;
- три космических аппарата связи «Арктика-МС» на высокоэллиптических орбитах типа «Тундра»;
- два КА «Арктика-Р» на низких орбитах с многофункциональными многорежимными радиолокаторами бокового обзора X-диапазона и радиометрами;
- средства подготовки к запуску и выведения КА с наземной инфраструктурой:
  - наземный комплекс приёма, обработки и распространения данных;
  - наземный комплекс управления КА;
  - наземный сегмент системы связи.

Орбитальное построение многоцелевой космической системы «Арктика» представлено на рисунке 171 (см. с. 275).

Возможности многоцелевой космической системы «Арктика» представлены на рисунке 172 (см. с. 275).

Комплекс НКПОР (наземный комплекс приёма, обработки и распространения информации) включает в себя главный и региональные центры приёма и обработки данных Росгидромета (Москва, Новосибирск, Хабаровск), распределённую сеть потребителей метеорологической и гелиогеофизической информации.

Оперативное доведение потребителям обработанной мониторинговой информации предполагается обеспечивать в реальном масштабе времени на размещаемые у потребителя автономные средства приёма информации или с использованием интернета.

ГЛАВА 10. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

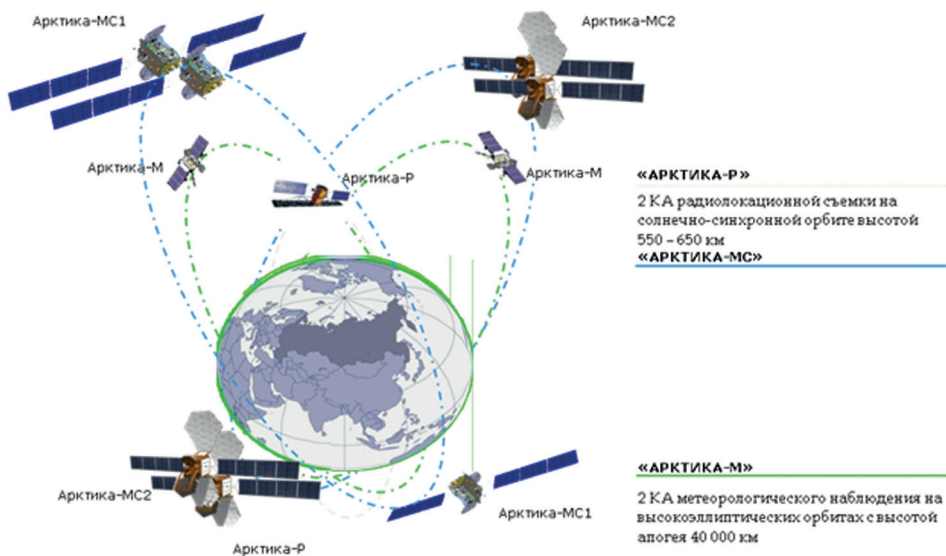


Рисунок 171. Многоцелевая космическая система «Арктика»

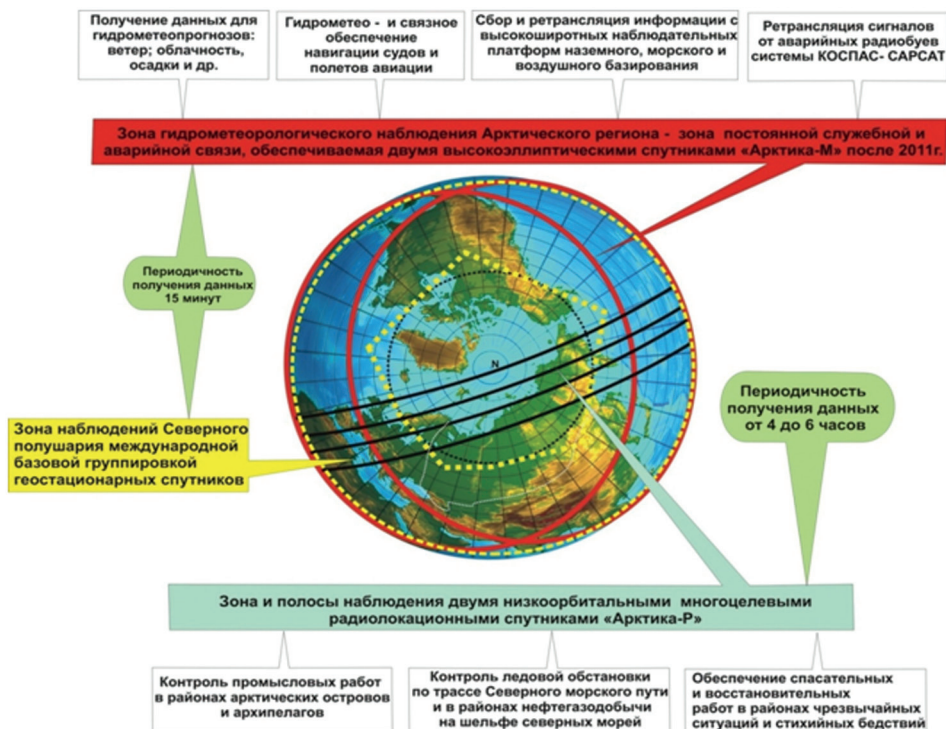


Рисунок 172. Задачи, решаемые многоцелевой космической системой «Арктика»

Комплекс НКПОР для системы «Арктика» создаётся на основе программно-технических средств НКПОР КА «Электро». Для работы с КА «Арктика» производится их доработка и дооснащение.

Система НКУ включает в себя центры управления КА, средства командно-измерительных станций, баллистические центры и средства связи и передачи данных.

Комплекс НКУ создаётся путём доработки и дооснащения существующих средств НКУ КА «Электро», НКУ «Космическая связь» в объёмах, необходимых для решения задач управления КА системы «Арктика».

Наземный сегмент системы связи включает в себя существующие средства «Космической связи», дооснащённые для предоставления услуг связи с использованием КА «Арктика-МС».

### 10.3 СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Несколько лет назад, в середине 1990-х гг., термин «Автоматическая идентификационная система» был известен только узкому кругу специалистов в сфере безопасности мореплавания и навигационной техники. За короткий срок АИС прошла путь от технического предложения до обязательного, согласно Конвенции SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea), вида навигационного оборудования, подлежащего установке на большинстве типов судов (как морских, так и речных) с 1 июля 2002 г.

Относительно несложная с технической точки зрения, небольшая по габаритам судовая аппаратура АИС, по оценке специалистов, вносит существенный вклад в безопасность мореплавания, сравнимый с появлением на морском флоте радиолокационных станций (РЛС) или спутниковой навигации.

Одновременно каждым судном, оборудованным транспондером АИС, принимается аналогичная информация от других судов, находящихся в зоне прямой видимости. Кроме того, в прибрежной зоне размещаются наземные базовые станции АИС, которые собирают информацию в радиусе 20–30 миль и занимаются вопросами обеспечения безопасности мореплавания судов.

В последние годы во всём мире проводятся исследования, направленные на создание принципиально новых систем мониторинга морских судов на основе данных АИС, полученных из космоса. Зарубежными странами (США, Канада, Норвегия и пр.) были запущены первые экспериментальные космические аппараты с бортовыми комплексами АИС на борту, позволяющие собирать данные о местоположении и характеристиках судов и передавать их на наземную станцию. Внедрение космического сегмента АИС позволит осуществлять сбор данных о местоположении объектов на море и решение различных транспортных, логистических и прочих задач в глобальном масштабе, подкрепляя активный спрос на услуги систем слежения за местоположением подвижных объектов со стороны ряда федеральных органов исполнительной власти России (Минтранс, Росрыболовство, ФСБ, МВД, МПС, МЧС и др.).

К настоящему времени в мире разработан целый класс недорогих КА нано- и микрокласса, выводимых на околоземную орбиту с высотой порядка 500–1000 км, на основе которых может быть реализована система мониторинга сигналов АИС из космоса с обеспечением контроля за перемещением судов в глобальном масштабе.

Принцип действия АИС поясняется на рисунке 173 (см. с. 277) [176]. Суда, оборудованные аппаратурой АИС, находясь в открытом море или в прибрежных районах, регулярно передают в диапазоне ОВЧ (VHF) морской подвижной радиослужбы стандартные сообщения, содержащие информацию

о судне, его координатах, курсе, векторе скорости, опасном грузе на борту, порте назначения, времени прибытия и др.

Принятая информация автоматически обрабатывается и отображается на одном из судовых навигационных дисплеев. Синхронизация работы всех станций АИС (судовых и береговых) обеспечивается глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС), которая также является источником передаваемой информации о координатах и векторе скорости.

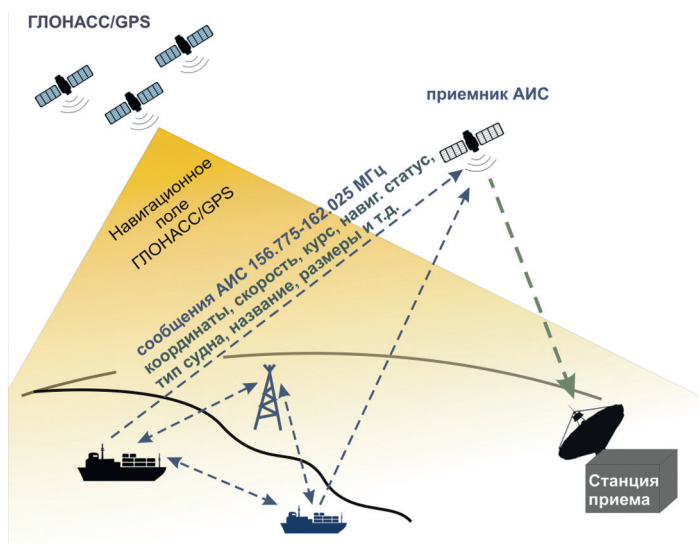


Рисунок 173. Принцип действия АИС

В прибрежных районах, где установлены базовые станции АИС, информация, передаваемая судами, принимается базовыми станциями и поступает в распоряжение береговых служб (СУДС (система управления движением судов) и системы судовых сообщений, службы поиска и спасения, службы экологического контроля и ликвидации последствий загрязнения, пограничные и таможенные власти, различные портовые службы).

Для обеспечения одновременной работы многих судовых и береговых станций АИС на одном частотном канале используется метод множественного доступа с временным разделением TDMA, поясняемый рисунком 174 (см. с. 278). Благодаря общей синхронизации всех станций АИС по сигналам ГНСС, минутный кадр передачи – приёма информации делится на 2250 временных интервалов (слотов). Каждая станция АИС выбирает для передачи своей информации один слот или несколько последовательных слотов, не занятых другими станциями. Кроме того, в передаваемые сообщения включается служебная информация о слотах, которые каждая станция АИС резервирует для передачи следующего сообщения.

Таким образом, все станции АИС, находящиеся в радиусе «радиовидимости» друг друга, автоматически взаимно синхронизируются, не создавая помех общей работе. Период передачи информации станциями АИС определяется типом станции (судовая, базовая, установленная на СНО (средство навигационного оборудования)) и состоянием судна (неподвижное, на ходу, маневрирующее). Для большинства движущихся судов период передачи изменяется от 2 до 10 с, т. е. соизмерим с периодом обновления радиолокационной информации (2–4 с), определяемым частотой вращения антенны РЛС. Это позволяет



осуществить постоянное слежение за движением судов, аналогичное автоматическому сопровождению с помощью РЛС/САРП (средство автоматической радиолокационной прокладки).

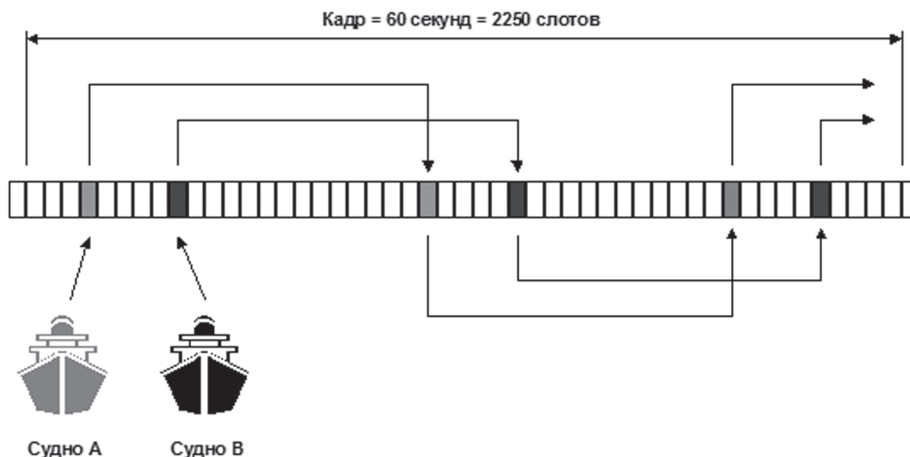


Рисунок 174. Принцип множественного доступа с временным разделением (TDMA) к каналу связи АИС

В настоящее время у федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации и многих коммерческих организаций существует необходимость оперативного слежения за местоположением и состоянием подвижных объектов, в том числе перевозящих опасные и ценные грузы, в целях повышения эффективности принятия управленческих решений.

В ближайшее время прогнозируется активный рост спроса на услуги систем слежения за местоположением подвижных объектов со стороны следующих министерств и ведомств: Минтранс, Росрыболовство, ФСБ, МЧС и др.

Спутниковая система мониторинга на основе сигналов датчиков автоматической идентификационной системы АИС базируется на создании космического сегмента АИС для мониторинга движения морских и речных судов вне зоны покрытия сигналами береговых станций АИС.

Глобальность обслуживания обеспечивается посредством записи в бортовом запоминающем устройстве КА информации, получаемой в результате бортовой обработки сигналов радиомаяков. Информация, накопленная в памяти КА, постоянно излучается передатчиком. Приём на станции приёма и обработки информации (СПОИ) осуществляется при появлении спутника в её зоне видимости. Местоположение каждого радиомаяка, таким образом, может быть определено всеми СПОИ, чем обеспечивается многократная обработка сигналов наземном сегментом.

Слот получается разделением одной секунды UTC (Coordinated Universal Time) на 37,5 (АИС) и 75 (АЗН-В VDL-4 (Very High Frequency Digital Link)) равных промежутков. Все слоты синхронизированы по времени UTC. При формировании сообщений в них включается информация о резервировании слотов для передачи в будущем, т. е. распределение следующих слотов известно всем пользователям в зоне радиовидимости (рисунок 175). Таким образом исключается возможность перекрытия сообщений (коллизии), т. е. использование одного временного слота несколькими передатчиками. Благодаря технологии SOTDMA (Self-Organized Time Division Multiple Access) все передатчики синхронизируют свою работу.

Каждый временной слот соответствует 26,6 мс

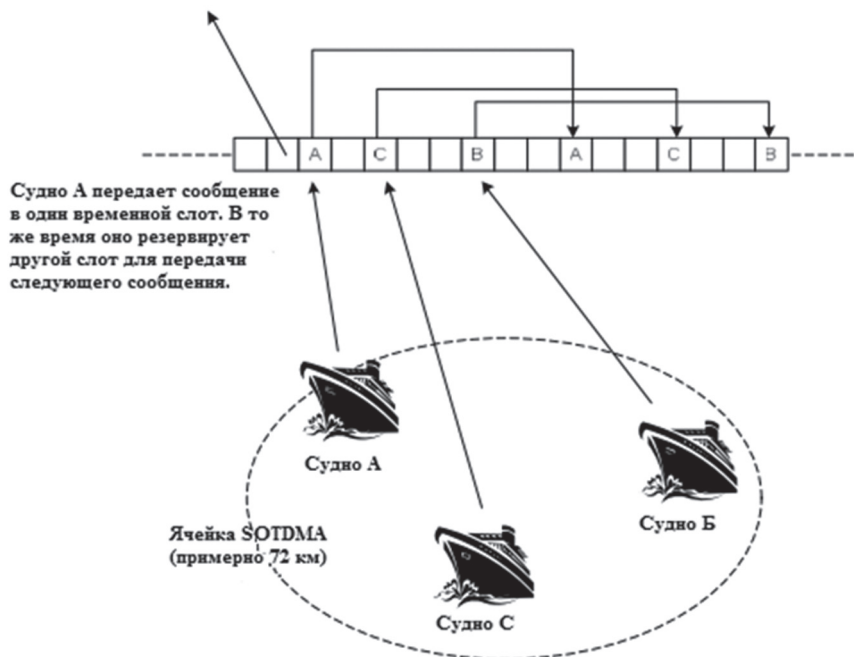


Рисунок 175. Графическое представление протокола передачи АИС

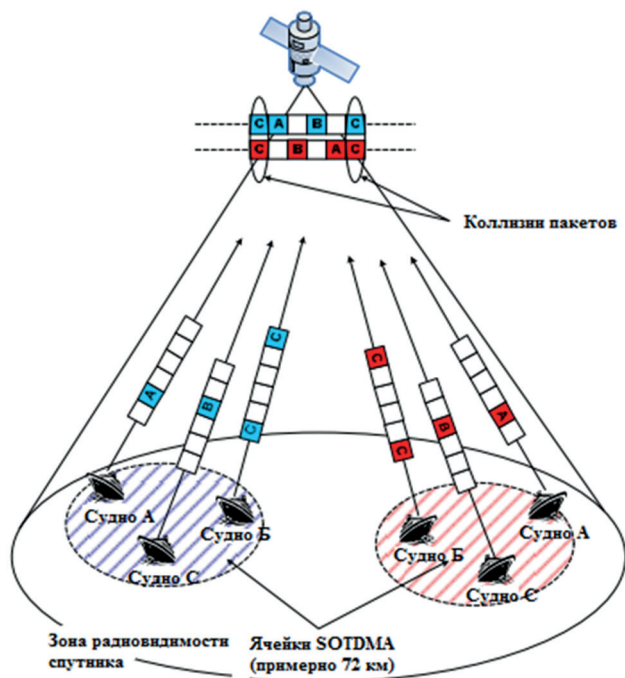


Рисунок 176. Коллизии сообщений для спутниковой системы АИС

При приёме сигнала АИС или АЗН-В (VDL-4) на приёмнике космического базирования возникают коллизии сообщений. Под коллизией понимается приём в одном временном слоте (длительностью 26,6 мс АИС и 13,3 мс АЗН-В) более одного информационного пакета, передаваемого разными абонентами (рисунок 176, см. с. 279).

Для России наибольший экономический эффект от использования спутниковой системы мониторинга на основе сигналов датчиков АИС может быть получен в малонаселённых и труднодоступных районах при контроле движения транспортных средств (морских и речных судов):

- по Северному морскому пути;
- по протяжённым сибирским рекам.

При чрезвычайной ситуации (кораблекрушении) система АИС, поставляющая информацию для повышения эффективности спасательной операции, может взаимодействовать с системой поиска и спасания пользователей персональных радиобуев (ПРБ-406), что позволяет определить не только место кораблекрушения, но и координаты членов экипажа судна.

Практическая значимость создаваемой системы состоит в следующем:

- последовательно снижается зависимость в российских отраслевых системах мониторинга от космических систем передачи мониторинговой информации иностранного производства;
- повышается эффективность проведения поисковых и спасательных операций на территории Российской Федерации;
- продолжается развитие отечественного научно-технического и технологического задела в области разработки космических систем наблюдения надводной обстановки на глобальных акваториях, в том числе с использованием технологий малоразмерных космических аппаратов.

**Таблица 18.** Зарегистрированные сообщения АИС

Тип	Содержание сообщения	Количество
1	Регулярное сообщение о местоположении МС класса А	402 264
2	Назначенное сообщение о местоположении МС класса А	443
3	Специальное сообщение о местоположении МС класса А	67 477
5	Статическая и рейсовая информация	7 518
18	Регулярное сообщение о местоположении МС класса В	585
27	Регулярное сообщение о местоположении МС класса В	2 585
	Всего сообщений	480 526
	Всего судов (уникальных идентификаторов ММСИ)	23 394

Пр и м е ч а н и е: МС — морское судно; ММСИ — Maritime Mobile Service Identifier.

Полномасштабное развёртывание системы обеспечит:

- повышение уровня безопасности судоходства в Российской Федерации;
- повышение эффективности управления морским и речным транспортом Российской Федерации;
- создание российского национального сегмента глобальной автоматической идентификационной системы АИС;
- оказание операторских услуг по предоставлению информации о надводной обстановке заинтересованным потребителям, в том числе на международном рынке;

- развитие серийного производства персональных радиобуев в Российской Федерации;
- создание системы поиска и спасания пользователей персональных радиобуев на территории Российской Федерации.

Первый российский приёмник АИС космического базирования был запущен на борту космического аппарата «Ресурс-П» № 2, в конце 2014 г. Всего за период 2015–2017 гг. аппаратура зарегистрировала более 480 тыс. сообщений от более чем 23 тыс. уникальных судов [177].

Распределение зарегистрированных сообщений по типам представлено в таблице 18 [177].

Глобальное распределение координат морских судов, зарегистрированные с борта КА «Ресурс-П» № 2 за весь период наблюдения, представлено на рисунке 177.

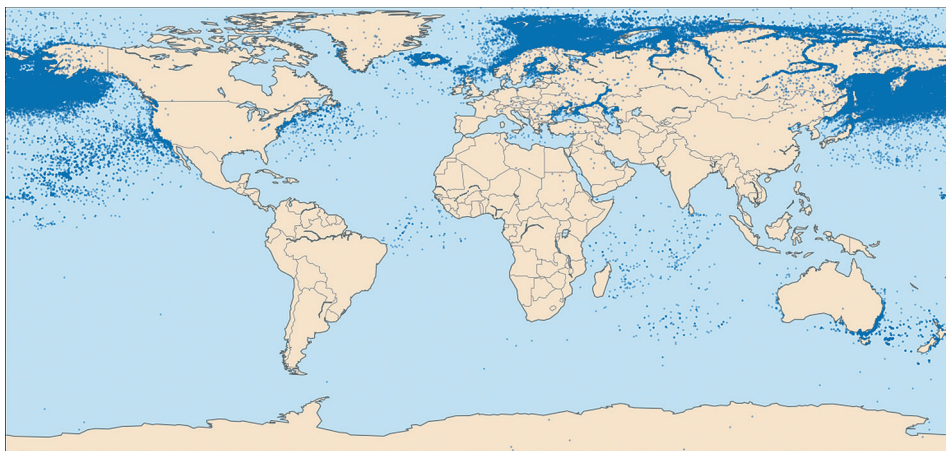


Рисунок 177. Распределение местоположений судов по данным АИС-сигналов, зарегистрированных приёмником КА «Ресурс-П» № 2 [177]

## 10.4

### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ

В ряде работ [126, 127] показана возможность возникновения и диагностирования электромагнитных предвестников различных катаклизмов природного характера.

Для проведения мониторинговых работ в некоторых географических регионах, особенно расположенных в зонах повышенной сейсмичности, устанавливаются комплексы наземных станций приёма когерентных радиосигналов, излучаемых с низкоорбитальных ИСЗ, обеспечивающих реализацию метода лучевой радиотомографии ионосферы [108].

Минимальные требования к наземной сети приёмников, обеспечивающие непрерывный мониторинг ионосферы и получение распределений электронной концентрации со временем получения реконструкции не более суток и с пространственным разрешением не хуже  $4^\circ$ , имеют следующий вид:

- на территории России необходимо разместить не менее 100 приёмников GNSS (Global Navigation Satellite System) и станций томографии

ионосферы. Оптимальным представляется размещение этих приёмников на существующих метеопостах всемирной метеорологической организации, так как они уже снабжены линиями коммуникации и связи;

- канал связи должен обеспечивать передачу данных с приёмников в центр обработки и хранения данных не реже, чем один раз в сутки. Типичный объём передаваемых данных — 2 Мбайт. При этом приёмники должны хранить и передавать данные в едином формате (RINEX 2.0 (Receiver Independent Exchange Format) и выше);
- в связи с вводом в эксплуатацию систем ГЛОНАСС и «Галилео» для увеличения объёма входных данных для осуществления высокоорбитальной радиотомографии ионосферы желательно, чтобы устанавливаемые приёмники могли работать со всеми тремя высокоорбитальными навигационными системами (GPS, ГЛОНАСС и «Галилео»).

В настоящее время на территории Российской Федерации осуществляется развёртывание наземной сети станций спутниковой томографии ионосферы (рисунок 178), использующие как низкоорбитальные, так и среднеорбитальные навигационные спутники систем ГЛОНАСС/GPS.

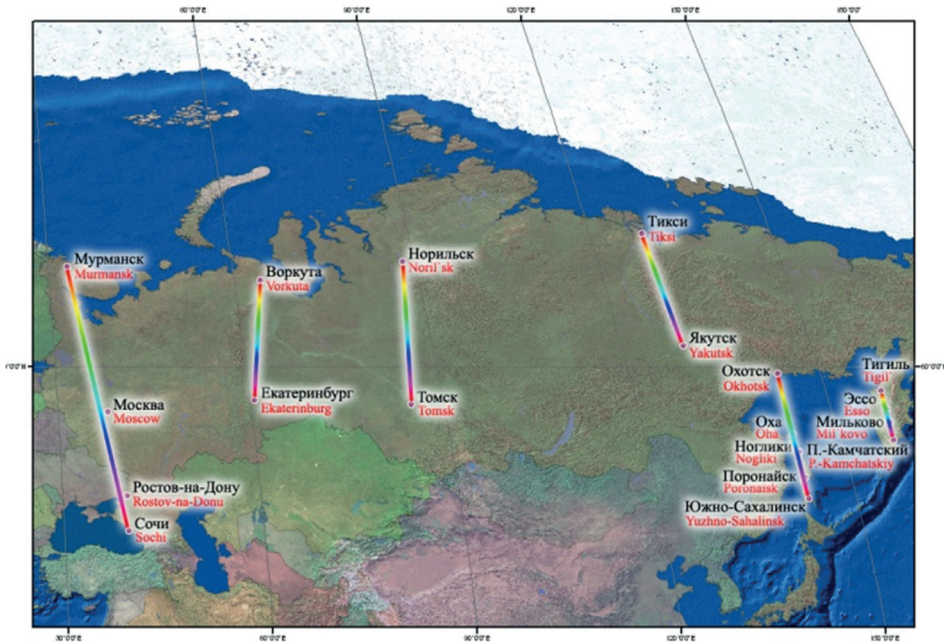


Рисунок 178. Предварительная схема размещения наземных станций томографической сети

К сожалению, предлагаемый подход позволяет обеспечить мониторинг ограниченной территории земной поверхности в пределах радиовидимости набора — линейки наземных станций, размещаемых в меридиональных направлениях. Исходя из опыта эксплуатации действующих средств низкоорбитальной радиотомографии, следует, что приёмники следует располагать на расстояниях в 200...400 км друг от друга. Расстояния более 500 км будут приводить к заметной потере информации. Расстояния между линейками приёмников могут находиться в пределах 1000...2000 км. Расположение линейки приёмников для низкоорбитальной радиотомографии зависит от наклона действующих низ-



коорбитальных навигационных спутников. Оптимальными для рассматриваемых целей являются полярные орбиты.

Очевидно, что главное ограничение подобного подхода состоит в возможности размещения сети наземных приёмных станций на всей земной поверхности. Соответственно, максимальные трудности возникают при размещении приёмных станций на морских акваториях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Берлянт А. М.* Геоинформатика. М.: Фирма «Астрея», 1995. 219 с.
2. *Королев Ю. К.* Общая геоинформатика. М.: СП ООО Дата+, 1998. 118 с.
3. Советский энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 1600 с.
4. Федеральный закон об информации, информатизации и защите информации. Принят ГД 25 января 1995 г.
5. *Сербенюк С. Н.* Картография и геоинформатика — их взаимодействие. М., 1990. 159 с.
6. *Романов А. А.* Системная разработка космической техники. В 2-х ч. Ч. 1. М.: МФТИ, 2015. 288 с.
7. Building a Better NASA Workforce: Meeting the Workforce Needs for the National Vision for Space Exploration. 2019. URL: <https://www.nap.edu/read/11916/chapter/1>.
8. The NASA Systems Engineering Handbook. 2019. URL: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/nasa\\_systems\\_engineering\\_hanbook.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/nasa_systems_engineering_hanbook.pdf).
9. *Романов А. А.* Смена парадигмы разработки инновационной продукции: от разрозненных НИОКР к цифровым проектам полного жизненного цикла // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2017. Т. 4. Вып. 2. С. 68–84.
10. *Kharlan A., Veliev N., Mullin N., Baktimirov Sh., Ivanov A.* A University — Based Facility for Evaluation and Assessment of Space Projects // Proc. 69<sup>th</sup> IAC. Germany. 2018.
11. *Романов А. А.* Системная разработка космической техники. В 2-х ч. Ч. 2. М.: МФТИ, 2015. 239 с.
12. INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. 2019. URL: <https://www.incose.org/products-and-publications/se-handbook>.
13. *Shamieh C.* Continuous Engineering for Dummies. IBM Limited Edition. John Wiley and Sons, Inc., 2014. 66 с.
14. *Романов А. А., Романов А. А., Булгаков Н. Н., Ершов А. Н., Колобаев А. С.* Использование подходов «непрерывного инжиниринга» при адаптации приемных комплексов РК-СМ-МКА для размещения на борту КА «Метеор-М» №2-1 и №2-2 // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2017. Т. 4. Вып. 3. С. 69–76.
15. CubeSats\_Fly\_Your\_Satellite. 2017. URL: [https://www.esa.int/CubeSats\\_Fly\\_Your\\_Satellite/Fly\\_Your\\_Satellite!\\_programme](https://www.esa.int/CubeSats_Fly_Your_Satellite/Fly_Your_Satellite!_programme)
16. *Романов А. А.* Прикладной системный инжиниринг. М.: Физматлит, 2015. 556 с.
17. Геоэкоинформатика: сб. ст. М.: МГУ, 1995. 112 с.
18. Картография. Вып. 4. Геоинформац. системы: сб. перевод. ст. / сост., ред. и предисл. А. М. Берлянт и В. С. Тикунов. М.: Картогеоцентр-Geoиздат, 1994. 350 с.
19. *Берлянт А. М.* Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 239 с.
20. Space Handbook, An Analyst's Guide / prepared M. M. J. Muolo. Air University Press, 1993. 182 p.
21. *Берлянт А. М.* Справочник по картографии / под ред. Е. И. Халугина. М.: Недра, 1998. 430 с.
22. Remotely Sensed Data: Technology, Management, and Markets. OTA-ISS-604 / U. S. Congress. Office of Technology Assessment. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1994. 67 p.
23. *Turner A.* Introduction to Neogeography. O'Reilly Media. Inc., 2006.
24. *Аноприенко А. Я., Еремченко Е. Н.* Неогеография и постбинарный компьютеринг // Науч. тр. Донецкого техн. ун-та. Сер. «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования». Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2008. С. 249–257.

25. Урличич Ю., Еремченко Е. ГЛОНАСС и ноосфера // В мире науки. 2011. № 3. С. 56–63.
26. Космическая система «Арктика». 2019. URL: <http://www.roscosmos.ru/11669/>.
27. Inmarsat. 2019. URL: <http://www.inmarsat.com>.
28. *Elstak J., Spereta S., Bonnema A., Rotteveel J.* Nanosatellite communication system trends // Proc. 4S Symp. Slovenia. 2012.
29. Orbcomm. 2019. URL: <http://www.orbcomm.com>.
30. Globalstar. 2019. URL: <http://www.globalstar.com>.
31. Iridium. 2019. URL: <http://www.iridium.com>.
32. *Авдудевский В. С., Успенский Г. П.* Космическая индустрия. М.: Машиностроение, 1989. 568 с.
33. Система GPS. 2019. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/gps.php>.
34. Интерфейсный контрольный документ GPS. 2019. URL: <http://www.gps.gov/technical/icwg/>.
35. Система ГЛОНАСС. 2019. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/glonass.php>.
36. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. 2019. URL: <http://russianspace systems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/>.
37. Система ГАЛИЛЕО. 2019. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/galileo.php>.
38. Интерфейсный контрольный документ ГАЛИЛЕО. 2019. URL: <https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/programme-reference-documents/>.
39. Система BEIDOU. 2019. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php>.
40. Интерфейсный контрольный документ BEIDOU. 2019. URL: <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/>.
41. Система QZSS. 2019. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/qzss.php>.
42. Интерфейсный контрольный документ QZSS // Электрон. Дан. — Россия, 2019. URL: [http://qz-vision.jaxa.jp/USE/is-qzss/index\\_e.html](http://qz-vision.jaxa.jp/USE/is-qzss/index_e.html).
43. Системы функциональный дополнений. 2019. URL: [https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/function\\_dop.php](https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/function_dop.php).
44. *Романов А. А.* Анализ основных тенденций спутниковых альтиметров: «подрывные» или эволюционные технологии // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2018. Т. 5. Вып. 4. С. 3–13.
45. *Романов А. А., Романов А. А.* Основы космических информационных систем. М: Радиотехника, 2013. 352 с.
46. Measuring ocean winds from space. 2019. URL: <http://winds.jpl.nasa.gov>.
47. *Козинцев В. И., Орлов В. М., Белов М. Л.* и др. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: учеб. пособие для вузов / под ред. В. Н. Рождествина. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 528 с.
48. *Хадсон Р.* Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 534 с.
49. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). 2013. URL: <http://npp.gsfc.nasa.gov/viirs.html>.
50. Атмосфера, океан, космос. Программа «Разрезы». Сер. Итоги науки и техники. Т. 3: Требования к составу и к точности спутниковой информации в исследованиях по Программе «Разрезы» / В. П. Дымников, Г. К. Коротчаев, В. Я. Галин. 1984.
51. *Robinson I. S., Wells N. C., Charnock H.* Review article “The sea surface thermal boundary layer and its relevance to the measurement of sea surface temperature by airborne and spaceborne radiometers” // Intern. J. Remote Sensing. 1984. V. 5. No. 1. P. 19–45.
52. *Викторов С. В., Бычкова И. А., Лобанов В. Ю., Сухачева Л. Л.* Проблемы спутникового экологического мониторинга Финского залива / Экспресс-информация АН СССР; Ин-т истории естествознания и техники. Т. 4. Л., 1989. С. 13–26.
53. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
54. *Coppo P. et al.* SLSTR: a high accuracy dual scan temperature radiometer for sea and land surface monitoring from space // J. Modern Optics. 2010. V. 12. P. 1362–3044.
55. NOAA Technical Memorandum NESS 107: Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers. Washington DC, 1979. 58 p.
56. *Bernstein R. L.* Sea Surface Temperature estimation, using the NOAA 6 Satellite AVHRR // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1982. V. 87(C12). P. 9455–9465.

57. *Brown O. B., Brown J. W., Evans R. H.* Calibration of Advanced Very High Resolution Radiometer Infrared Observations // *J. Geophysical Research*. 1985. V. 90. P. 11667–16777.
58. *Barton L. J.* Dual channel satellite measurements of sea surface temperature // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 1983. V. 109. P. 365–378.
59. Report of the TOGA Workshop on Sea Surface Temperature and Net Surface Radiation. The World Climate Research Programme. USA. 1984. 41 p.
60. *Нелено Б. А., Коротаев Г. К., Суетин В. С., Терехин Ю. В.* Исследование океана из космоса. Киев: Наукова думка, 1985. 168 с.
61. *Gordon H. R., Clark D. K., Brown J. W.* et al. Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates // *Applied Optics*. 1983. V. 22. No. 1. P. 20–36.
62. *Орлов В. М., Самохвалов И. В., Белов М. Л.* и др. Дистанционный контроль верхнего слоя океана. Новосибирск: Наука, Сиб.отд-ние. 1991. 149 с.
63. *Morel A.* In-water and remote measurements of ocean color // *Boundary-Layer Meteorology*. 1980. V. 18. No. 2. P. 177–201.
64. *Обухов А. М.* О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // *Изв. АН СССР. Сер. Геофизическая*. 1960. № 3. С. 432–439.
65. *Gordon H. R., Clark D. K.* Atmospheric effects in the remote sensing of phytoplankton pigments // *Boundary-Layer Meteorology*. 1980. V. 18. P. 299–313.
66. *Gower J. F.R., Lin S., Borstad G. A.* The information content of different optical spectral ranges for remote chlorophyll estimation in coastal waters // *Intern. J. Remote Sensing*. 1984. V. 5. No. 2. P. 349–364.
67. *Урденко В. А., Шемшурова В. Е.* Проблемы исследования океана из космоса. Севастополь: МГИ АН УССР, 1984. 52 с.
68. *Clark G. L., Ewing G. C., Lorenzen C. J.* Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration // *Science*. 1970. No. 167. P. 11–19.
69. *Gordon H. R., Morel A.* Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: A review. N. Y.: Springer, 1983. 114 p.
70. *Васильков А. П., Кельбалиханов Б. Ф.* Дистанционные оптические пассивные методы исследования океана. Сыктывкар: Науч. центр УрО АН СССР, 1991. 107 с.
71. *Gordon H. R., Clark D. K., Brown J. W., Brown O. B., Evans R. H., Broenkow W. W.* Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 1. PP. 20–36.
72. *Gordon H. R.* Removal of atmospheric effects from Satellite imagery of the ocean // *Applied Optics*. 1978. V. 17. No. 10. P. 1631–1636.
73. *Васильков А. П., Ершов О. А., Судьбин А. И., Смирнов А. В.* Результаты дистанционного определения с авианосителя спектрального коэффициента яркости моря // *Оптика атмосферы*. 1989. Т. 2. № 6. С. 642–648.
74. *Шифрин К. С., Волгин В. Н., Волков Б. Н., Ершов О. А., Смирнов А. В.* Оптическая толщина аэрозольной атмосферы над морем // *Исслед. Земли из космоса*. 1985. № 4. С. 21–30.
75. *Gordon H. R., Wang M.* Retrieval of Water-living Radiance and Aerosol Thickness Over the Oceans with SeaWIFS: A Preliminary Algorithm // *Applied Optics*. 1994. V. 33. No. 3. P. 443–452.
76. OLCI Sentinel-3. 2019. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-3>.
77. *Oceanographic Applications of Remote Sensing* / ed. M. Ikeda, F. W. Dobson. CRC Press, 1995. 512 p.
78. *Жуков И. П., Романов А. А., Романов А. А.* Определение уровня реки Амур по данным альтиметрического спутника Торех/Poseidon // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2007. № 5. С. 12–15.
79. SWOT. 2018. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swot>.
80. *Chippolini P., Snaith S.* A short course on Altimetry. Altimetry 2 — Altimeter data processing (from satellite height to sea surface height) // *Proc. 4<sup>th</sup> ESA Advanced training on ocean remote sensing*. France. 2015.

81. *Куницын В. Е., Романов А. А.* Восстановление карт поверхности океана методом локальной сплайн аппроксимации с хаотично расположенными узлами // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49. № 4. С. 466–480.
82. *Романов А. А., Романов А. А.* Норвежское море – 1997. Основные результаты комплексного научно-производственного эксперимента. М: ИКИ РАН, 2018. 311 с.
83. *Витер В. В., Ефремов Г. А., Иванов А. Ю.* и др. Космический аппарат «Алмаз-1» – программа «Океан-И». Предварительные результаты радиолокационного наблюдения с высоким разрешением процессов в океане. Внутренние волны // *Исслед. Земли из космоса*. 1993. № 1. С. 54–63.
84. Sentinel-1. 2018. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-1>.
85. *Елизаветин И. В.* Теория радиолокационной космической съемки и обработки радиолокационных снимков. 2019. URL: [https://www.gasurs.ru/wiki/index.php/Теория\\_радиолокационной\\_космической\\_съемки\\_и\\_обработки\\_радиолокационных\\_снимков](https://www.gasurs.ru/wiki/index.php/Теория_радиолокационной_космической_съемки_и_обработки_радиолокационных_снимков).
86. *Кондратьев К. Я., Науменко М. А., Широков П. А., Иванов А. Ю.* и др. Опыт использования радиолокатора с синтезированной апертурой КА «Алмаз-1» для изучения крупных водоемов // *ДАН*. 1995. Т. 304. № 3. С. 1–4.
87. *Альперс В., Вильде А., Брюнинг К., Эткин В. С.* и др. Отображение морского волнения радиолокаторами с синтезированной апертурой. Сравнительный анализ данных, полученных ИСЗ «Алмаз-1» и ERS 1 // *Исслед. Земли из космоса*. 1994. № 6. С. 83–95.
88. *Литовченко К. Ц., Раев М. Д., Семенов С. С., Эткин В. С.* и др. Оценка параметров морских волн по спектрам изображений, полученных РСА с различных высот спутниковых орбит // *Исслед. Земли из космоса*. 1995. № 3. С. 47–55.
89. *Мальцева И. Г., Маров М. Н., Фукс В. Р., Рамм Н. С., Иванов А. Ю.* Анализ кинематического механизма изображения океанских внутренних волн на космических РСА снимках // *Исслед. Земли из космоса*. 1995. № 3. С. 56–63.
90. *Перслегин С. В., Королев А. М., Маров М. Н., Мишин С. А.* и др. Радиолокационные измерения мезомасштабных полей течений океана по данным РСА «Алмаз-1» // *Исслед. Земли из космоса*. 1995. № 3. С. 28–38.
91. *Гродский С. А., Кудрявцев В. Н., Иванов А. Ю., Зайцев В. В., Соловьев Д. М.* Взаимодействие поверхностных волн с Гольфстримом по данным радиолокатора с синтезированной апертурой КА «Алмаз-1» // *Исслед. Земли из космоса*. 1996. № 3. С. 38–47.
92. *Иванов А. Ю., Нефедьев В. П., Смирнов А. В., Эткин В. С.* Исследование динамики мезомасштабных фронтов по данным дистанционного зондирования океана в СВЧ-диапазоне // *Изв. АН СССР*. 1986. № 4. С. 440–447.
93. *Авенариус И. Г., Иванов А. Ю., Широков П. А., Шкарин В. Е.* Морфоструктурная интерпретация данных радиолокационного зондирования с космического аппарата «Алмаз-1» (на примере шельфа Гельголандской бухты Северного моря) // *Изв. АН СССР*. 1994. № 5. С. 87–93.
94. *Alpers W., Henning I.* A Theory the Imaging Mechanism of Underwater Bottom Topography by Real and Synthetic Aperture Radar // *J. Geophysical Research*. 1984. V. C89. No. 6. P. 10529–10546.
95. *Wahl T., Eldhuset K., Skoelv A.* Ship Traffic Monitoring Using the ERS 1 SAR // *Proc. 1<sup>st</sup> ERS-1 Symp. France*. 1992. P. 823–828.
96. *Lagerloef G. C., Swift C., LeVine D.* Sea surface salinity: The next remote sensing challenge // *Oceanography*. 1995. V. 8. P. 44–50.
97. *Swift C. T., McIntosh R. E.* Considerations for microwave remote sensing of ocean-surface salinity // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1983. V. GE 21. P. 480–491.
98. *Jackson T. J., Schmugge T. J., Wang J. R.* Passive microwave remote sensing of soil moisture under vegetation canopies // *Water Resources Research*. 1982. V. 18. P. 1137–1142.
99. *Swift C. T.* (Chairman) ESTAR – The Electronically Scanned Thinned Array Radiometer for remote sensing measurement of soil moisture and ocean salinity. NASA: Technical Memorandum 4523, 1993. 40 p.



100. *Miller J. M., Goodberlet M., Zaitzeff J.* Remote sensing of salinity in the coastal zone // EOS Trans. American Geophysical Union. 1998. V. 79. P. 176–177.
101. *Le Vine D., Kao M., Garvine R., Sanders T.* Remote sensing of ocean salinity: Results from the Delaware coastal current experiment // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 1998. V. 15. P. 1478–1484.
102. SMOS. 2018. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/smos/>.
103. *Changjun Li, Hong Zhao, Hongping Li, Kebo Lv* Assessment of SMOS and Aquarius/SAC-D salinity data accuracy in South China Sea: Three statistical methods // Proc. IGARSS. Italy. 2015. P. 954–957.
104. SMAP. 2018. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/smap>.
105. *Куницын В. Е., Терещенко Е. Д.* Томография ионосферы. М.: Наука, 1991. 176 с.
106. *Kunitzsyn V. E., Tereshchenko E. D.* Ionospheric tomography. Springer, 2003. 272 p.
107. *Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С.* Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
108. *Романов А. А., Романов А. А., Трусов С. В., Урличич Ю. М.* Спутниковая радиотомография ионосферы: науч. монография. М., 2013. 350 с.
109. *Базаржапов А. Д., Матвеев М. И., Мишин В. М.* Геомагнитные вариации и бури: монография. Новосибирск: Наука, 1979. 248 с.
110. *Солодовников Г. К., Синельников В. М., Крохмальников Е. Б.* Дистанционное зондирование ионосферы Земли с использованием радиомаяков космических аппаратов. М.: Наука, 1988. 191 с.
111. *Leitinger R., Schmidt G., Tauriainen A.* An evaluation method combining the differential Doppler measurements from two stations and enables the calculation of the electron content of the ionosphere // J. Geophysics. 1975. V. 41. P. 201–213.
112. *Гинзбург В. Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. . 2-е изд. М., 1967. 685 с.
113. *Терещенко Е. Д., Худукон Б. З., Романова Н. Ю., Галахов А. А.* и др. Радиотомографические наблюдения электронной плотности ионосферы на меридиане архипелага Шпицберген – Кольский полуостров – Карелия // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. Вып. 11. С. 1221–1232.
114. *Трусов С. В., Романов А. А., Новиков А. В., Романов А. А.* Информационная технология автоматизированной обработки данных о состоянии ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. ст. М.: ООО «Азбука-2000», 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 317–324.
115. *Romanov A. A., Trusov S. V., Romanov A. A.* Automated Information Technology for Ionosphere Monitoring on the Low-Orbit Navigation Satellite signals // The 4<sup>th</sup> PICES Workshop on the Okhotsk Sea and adjacent areas: program and abstracts. Japan. 2008.
116. *Kelso T. S.* Real-World Benchmarking // Satellite times. 1996. Nov./Dec. P. 80–82.
117. NORAD elements. 2019. URL: <http://www.celestrak.com/NORAD/elements/>.
118. *Сильвестер П., Феррари Р.* Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. М.: Мир, 1986.
119. *Романов А. А., Романов А. А.* Комплексный анализ данных гидрологической съемки и информации дистанционного зондирования для оценки промысловой обстановки в акватории Норвежского моря // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 200–213.
120. *Романов А. А., Романов А. А.* Анализ динамики мезомасштабных структур в акватории Норвежского моря по данным дистанционного зондирования и гидрологических съёмок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 207–217.
121. *Benada R.* PO.DAAC merged GDR (T/P) users handbook. Rep. JPL D-11007. Pasadena: Jet Propul. Lab., 1993. 111 p.

122. Романов А. А., Трусов С. В., Новиков А. В., Романов А. А. Сравнение данных радиотомографии ионосферы на средних широтах с данными ионозонда, затменного зондирования и моделей ионосферы // Материалы 6-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2008. С. 152–153.
123. Романов А. А., Трусов С. В., Новиков А. В., Романов А. А. Информационная технология автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы // Материалы 6-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2008. С. 153–155.
124. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science 2001. V. 36. Iss. 2. P. 261–275.
125. Афраймович Э. Л., Астафьева Э. И., Гохберг М. Б., Лапшин В. М. и др. Поиски предвестников землетрясений в вариациях полного электронного содержания в ионосфере по данным GPS во время землетрясения Hector Mine 16 октября 1999 г. // Материалы 3-го Международного совещания «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». Россия. 2004.
126. Пулинец С. А., Романов А. А., Урличич Ю. М., Романов А. А., Узунов Д. Первые результаты пилотного проекта по комплексному диагностированию предвестников землетрясений на Сахалине // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. № 1. С. 123–132.
127. Tramutolli V. et al. PRE-EARTHQUAKES, an FP7 project for integrating observations and knowledges on earthquake precursors: Preliminary results and strategy // Proc. IGARSS'2012. Germany. 2012.
128. Erdas Field Guide. 1994. 628 p.
129. Прэнтт У. Цифровая обработка изображений. Т. 2. М.: Мир, 1982. 790 с.
130. Selby J. E. A., McClatchey R. M. Atmospheric Transmittance from 0.25 to 28.5  $\mu\text{m}$ : Computer code LOWTRAN 2, USA. Air Force Cambridge Research Lab. Report AFCRL-72-0745. 1972.
131. Jensen J. R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice-Hall, 2007. 596 p.
132. Welsh R., Ehlers W. Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM Data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1987. V. 53. No. 3. P. 301–303.
133. Chavez P. S. et al. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and Spot Panchromatic // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1991. V. 57. No. 3. P. 295–303.
134. Косицын В. П., Романов А. А., Чумаков А. Л., Юдовский А. Б. Алгоритм ввода космической информации в ПЭВМ // Вопросы механики сплошной среды в геокосм. исслед. М.: МФТИ, 1989. С. 43–46.
135. Временные методические рекомендации по приему, обработке и использованию спутниковой ИК-информации по температуре поверхности морей и океанов. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 128 с.
136. Косицын В. П., Романов А. А., Матвеев С. В. Алгоритм синхронизации данных при автоматизированном вводе спутниковой информации в ПЭВМ // Дискретные и цифровые методы обработки сигналов. М.: МФТИ, 1990. 110 с.
137. Baronti S., Carla R., Sacco V. M. Digital Filtering of APT Images from NOAA Series Satellites // Alta Frequenza. 1986. V. 55. No. 6. P. 391–394.
138. Трусов С. В. и др. Сетевой программно-аппаратный комплекс двумерной радиотомографии ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 142–149.
139. Ho D., Asem A. NOAA AVHRR image referencing // Intern. J. Remote Sensing. 1986. V. 7. No. 7. P. 895–904.
140. Cornillon P., Hickox S., Turton T. Sea Surface Temperature Charts for the Southern New England Fishing Community // MTS J. 1986. V. 20. No. 2. P. 57–65.
141. Романов А. А., Романов А. А., Урличич Ю. М., Буравин А. Е. Концептуальные подходы к созданию перспективных космических систем // Перспективные компьютерные системы: устройства, методы и концепции: тр. семинара. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 92–104.

142. *Sweeting M.* Moor's Law and Small satellites // Proc. 7<sup>th</sup> IAA Symp. Small Satellites. Germany. 2007.
143. *Petro A.* Small Spacecraft Technology Markets & Motivations // Briefing to the NASA Advisory Committee. USA. 2014.
144. *da Silva Curiel A.* et al. What can we expect from very high resolution small satellites // Proc. 11<sup>th</sup> IAA Symp. Small Satellites for Earth Observation. Germany. 2017.
145. *da Silva Curiel A.* et al. Watching the world go by // 32<sup>nd</sup> Annual AIAA/USU Conf. Small Satellites. USA. 2018. SSC18-II-08.
146. *Magnuson S.* Scientists Pursue Flexible, Adaptable Space Systems. National Defense Magazin, 2007.
147. *Barnhart D. J., Vladimirova T., Sweeting M. N.* Very-Small-Satellite Design for Distributed Space Missions // J. Spacecraft and Rockets. 2007. V. 44. No. 6. P. 1294–1306.
148. *Baker A.* et al. Modular radar and optical constellation supporting commercial arctic operations // Proc. 60<sup>th</sup> IAC. South Korea. 2009.
149. *Hoey M.* Military space systems: the road ahead // Proc. Symp. Non-proliferation and Disarmament – The Way Forward. 2005.
150. *Twiggs R.* Nanosatellite program — a challenge to AMSAT for Collaboration to Use the Amateur Bands // Proc. AMSAT-NA 16<sup>th</sup> Space Symp. USA. 1998. P. 1–4.
151. *Urlichich Yu.* et al. Application of telecommunication system GLOBALSTAR for nanosatellite control // Proc. 7<sup>th</sup> Intern. Symp. Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations (RCSGSO). Russia. 2007. SP 648.
152. *Selivanov A., Romanov A., Vishnyakov V., Vinogradov A., Pavelyev A., Yakovlev O.* Concept of space system for global radio occultation monitoring of lower atmosphere and ionosphere based on super-small satellites with GLONASS / GPS navigation signal receivers // Proc. United Nations/Austria/European Space Agency Symposium on Space Applications “Space Tools and Solutions for Monitoring the Atmosphere and Land Cover”. Austria. 2008.
153. *London III J. R., Marley A. B., Weeks D. J.* Army nanosatellite technology demonstrations for the tactical land warfighter. US ASMD/ARSTRAT Public Release, 2010. P. 1–8.
154. *Orcutt M.* A big bet on small satellites. 2019. URL: <https://www.technologyreview.com/s/04150/a-big-bet-on-small-satellites>.
155. *Hawkins K.* Flying into orbit in small package. 2019. URL: [https://www.army.mil/article-amp/50875/flying\\_into\\_orbit\\_in\\_small\\_package](https://www.army.mil/article-amp/50875/flying_into_orbit_in_small_package).
156. System F6. Broad Agency Announcement. DARPA, 2010. P. 1–49.
157. *Davis T. M.* Operationally response space — the way forward // Proc. 29<sup>th</sup> Annual AIAA/USU Conf. Small Satellite. USA. 2015. SSC15-VII-4. P. 1–12.
158. *Venturini C.* Small Satellite Technology: Industry Update. AEROSPACE Corporation Presentation to Advisory Committee on Commercial Remote Sensing (ACCRES). 2014.
159. *Cho M.* Lean Satellite Evolution // Proc. Intern. Workshop on Lean Satellites. Japan. 2018.
160. Definition and Requirements of Small Satellites Seeking Low-Cost and Fast-Delivery. Intern. Academy of Astronautics, 2018. 83 p.
161. *Романов А. А., Тюлин А. Е.* Шестой технологический уклад в космическом приборостроении // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2017. Т. 4. Вып. 4. С. 64–82.
162. Small Spacecraft Technology State of the Art. NASA/TP–2015–216648/REV1. 2015. 180 p.
163. *Johnson M. I., Peck M. A.* KickSat, an Open Source ChipSat Dispenser and Citizen Space Exploration Proof of Concept Mission // Proc. 4<sup>th</sup> European CubeSat Symp. Belgium. 2012.
164. Global Space Industry Dynamics. Research Paper for Australian Government, Department of Industry. Innovation and Science by Bryce Space and Technology, 2017. 32 p.
165. *Moustapha H.* Aerospace 4.0TM. Pratt and Whitney Canada, 2016. 8 p.
166. *van der Veen E. J.* et al. Disruptive Space Technologies // Intern. J. Space Technology Management and Innovation. 2012. V. 2. P. 24–39.

167. *Боровков А. И.* Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования. Цифровые двойники. Фабрики будущего // Материалы программы «Остров 10-21»: Образовательный интенсив для технологических лидеров. Россия. 2018.
168. Strategy: Lockheed Martin's Digital Tapestry. 2019. URL: <https://companyweek.com/company-profile/strategy-lockheed-martins-digital-tapestry>.
169. Geospatial Media and Communications. 2019. URL: <http://www.geobuiz.com/geobuiz-2018-report.html>.
170. Creating a European Marketplace for Earth Observation Services / Position Paper prepared by EARSC. 2016. 12 p.
171. Earth Observation Open Science and Innovation / eds. Mathieu P.-P., Aubrecht C. ISSI Scientific Report Series 15. Springer Open, 2018. 328 p.
172. EOSDIS Handbook. 2019. URL: [https://cdn.earthdata.nasa.gov/conduit/upload/6321/EOSDIS\\_handbook\\_1.3.pdf](https://cdn.earthdata.nasa.gov/conduit/upload/6321/EOSDIS_handbook_1.3.pdf).
173. *Antikidis J.-P., Favier J.-J.* eCORCE — a webcam for Earth Communications. 2008. URL: <https://cnes.fr>.
174. *Antikidis P.* et al. The one meter shop concept eCORCE // *Acta Astronautica*. 2008. V. 63. P. 156–164.
175. *Романов А. А., Родин А. В., Мишкин В. М.* Концепция отраслевой Службы спутникового научно-производственного мониторинга промысловых районов Мирового океана // Дистанционные методы мониторинга промысловых районов Мирового океана в задачах информационной поддержки отраслевой научно - производственной деятельности / под ред. А. А. Романова: сб. науч. тр. М.: ВНИРО, 1997. С. 7–33.
176. *Романов А. А.* и др. Космические средства автоматической идентификационной системы. М.: Радиотехника, 2016. 208 с.
177. *Кузнецов А. М.* и др. Анализ результатов, полученных за три года работы аппаратуры мониторинга судов БРК АИС, размещенной на КА «Ресурс-П» № 2 // *Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы*. 2018. Т. 5. Вып. 4. С. 80–87.

*A. A. Romanov, A. A. Romanov*  
**Basics of space information systems**

Space information systems of communication, navigation and remote sensing of the Earth today are often the only source of information about the constantly changing parameters of the lithosphere – ocean – atmosphere system used by various sectors of the national economy. At the same time, a significant synergistic effect is obtained due to the complex use of space technologies based on the system analysis of the satellite data obtained.

This tutorial is written on the basis of a course of lectures given by professors of the department “Systems, devices and methods of geocosmic physics” by prof. Alexei A. Romanov and DSc Alexander A. Romanov in Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) in 1998–2018 in the course “Fundamentals of Space Information Systems”, read to students of the Faculty of Aerophysics and Space Research, as well as the basic department “Radio-space space systems” of the Faculty of Radio Engineering and Cybernetics of MIPT. This publication is a revised and updated textbook “Basics of Space Information Systems”, published by Alexei A. Romanov and Alexander A. Romanov in 2013.

The tutorial contains a brief systematic presentation of the main sections of the course. Questions of system design and analysis of space systems are considered; physical principles of functioning of space information systems of communication, navigation and remote sensing of the Earth; automated technologies for collecting, processing and assimilating satellite data in geographic information systems are discussed. Telecommunication technologies of data transmission and exchange between distributed problem-oriented databases, as well as their practical application using examples of monitoring systems of various purposes, are considered.

The modern methods of collecting and processing geocoded data obtained during the sub-satellite verification experiments are outlined. Space information is widely available for users in international centers on the Internet.

The manual is intended for senior students, graduate students and researchers specializing in applied problems of aerospace remote sensing.

The first edition in 2013 was recommended by the educational-methodical association of higher educational institutions of the Russian Federation as a textbook for students specialized in applied mathematics and physics, as well as for inter-university use.

*Keywords:* space information systems, system engineering basic principles, remote sensing, GIS, basic physics principles of remote sensing devices

*Учебное пособие*

Подписано в печать 06.09.2019  
Формат 70×100/16. Усл. печ.-л. 23,73. Тираж 200. Заказ 4179

Издатель: Институт космических исследований  
Российской академии наук (ИКИ РАН)  
117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32

Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*