

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## К 100-летию со дня рождения академика В.А. Котельникова

*Совместная научная сессия Отделения физических наук  
Российской академии наук и Отделения нанотехнологий и информационных  
технологий Российской академии наук, 17 сентября 2008 г.*

Ю.В. Гуляев; Л.М. Зелёный, Н.А. Арманд;  
Н.А. Кузнецов, И.Н. Сеницын; В.И. Каевицер, В.М. Разманов

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902f.0201

17 сентября 2008 г. в зале "Ротонда" Российской академии наук состоялась совместная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук, посвящённая 100-летию со дня рождения \* академика В.А. Котельникова. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Гуляев Ю.В.** (Институт радиотехники и электроники РАН, Москва). *Творческий путь Владимира Александровича Котельникова (вступительное слово).*

2. **Пустовойт В.И.** (Научно-технический центр уникального приборостроения РАН, Москва). *Акустооптика: современное состояние и перспективы.*

3. **Зелёный Л.М., Арманд Н.А.** (Институт космических исследований РАН, Москва). *Владимир Александрович Котельников и исследования Солнечной системы.*

4. **Микаэлян А.Л.** (Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва). *Исследования в области волноводной техники для систем связи.*

5. **Кардашев Н.С.** (Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *В.А. Котельников — радиоастрономия на Земле и в космосе.*

6. **Кузнецов Н.А., Сеницын И.Н.** (Институт радиотехники и электроники РАН, Москва). *Развитие теории отсчётов Котельникова.*

7. **Каевицер В.И., Разманов В.М.** (Филиал института радиотехники и электроники РАН, г. Фрязино, Московская обл.). *Дистанционное зондирование морского дна гидролокационными системами со сложными сигналами.*

8. **Матюхин В.Г.** (Федеральное агентство по информационным технологиям, Москва). *Защита информации в электронном государстве.*

Краткое содержание вступительного слова Ю.В. Гуляева и докладов 3, 6 и 7 публикуется ниже.

\* До сих пор во всех документах указывается дата рождения В.А. Котельникова 6 сентября 1908 г. Однако в соответствии с обнаруженным в 2008 г. дочерью В.А. Котельникова Н.В. Котельниковой архивным документом "Выписка из книги регистрации новорожденных за 1908 год Варваринской церкви г. Казани" дата рождения В.А. Котельникова — 28 августа 1908 г., т.е. 10 сентября 1908 г. по новому стилю. (Примеч. ред.)



Владимир Александрович Котельников  
(06.09.1908 – 11.02.2005)

PACS numbers: 01.60. + q, 01.65. + g, 89.70. – a  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902g.0201

### Творческий путь Владимира Александровича Котельникова (вступительное слово)

Ю.В. Гуляев

Осенью 2008 г. научная общественность нашей страны отмечает 100-летие академика Владимира Александровича

вича Котельникова — выдающегося учёного, инженера, педагога и организатора, одного из основоположников радиофизики, радиотехники, информатики, радиоастрономии и отечественной криптографии. Его пионерские работы положили начало развитию новых направлений науки и техники: информатики и цифрового метода передачи сигналов, статистической радиофизики, планетной радиолокации, отечественной криптографии и широкомасштабным исследованиям космического пространства.

Поскольку сравнительно недавно в *УФН* был опубликован ряд статей, в которых обстоятельно рассказывалось о жизни и творчестве Владимира Александровича (*УФН* 176 (7) 751 (2006)), то я не буду повторяться и ограничусь лишь кратким обзором основных этапов творческого пути этого замечательного учёного, остановившись несколько подробнее на его последних работах, которые ранее на страницах *УФН* не обсуждались.

*Творческий путь Владимира Александровича Котельникова охватил 78 лет.*

Начался он в 19 лет созданием первого в нашей стране прибора "тройной характерограф". Эта работа была выполнена после окончания В.А. Котельниковым первого курса Московского высшего технического училища (МВТУ) во время летних каникул в Нижегородской радиолaborатории (1927 г.). Опубликована работа "Тройной характерограф" в 1928 г.

В 24 года В.А. Котельников первым математически точно сформулировал и доказал в аспекте коммуникационных технологий ставшую впоследствии классической теорему отсчётов (теорему Котельникова), которая положила начало теории информации, цифровым системам передачи сообщений, управления, кодирования и обработки информации (1932 г., Московский энергетический институт (МЭИ)).

В 27 лет под его руководством и при его участии была создана первая в нашей стране многоканальная буквопечатающая установка для работы по радио, значительно превосходившая по параметрам зарубежные аналоги и впоследствии широко использовавшаяся в СССР (1935 г., Научно-исследовательский институт связи Народного комиссариата связи (НИИС НКС)).

В 28 лет В.А. Котельниковым были сделаны две пионерские работы, в которых он одним из первых, используя теорию вероятности, выполнил исследование эффективности систем разнесённого приема сигналов в многолучевом канале и предложил общий аналитический метод исследования нелинейных искажений сигналов в различных устройствах. Подобные методы получили развитие в работах крупнейших отечественных и зарубежных ученых лишь начиная с конца 1940-х годов (1936 г., НИИС НКС).

В 30 лет ему присуждена степень кандидата технических наук без защиты диссертации (1938 г., Ленинградский электротехнический институт) и он избран заведующим кафедрой основ радиотехники радиотехнического факультета МЭИ.

В 31 год В.А. Котельников создаёт уникальную многоканальную телефонно-телеграфную аппаратуру радиосвязи, впервые использующую одну боковую полосу частот, которая была установлена на линии Москва–Хабаровск (1939 г.). Эта магистраль явилась крупнейшим достижением отечественной и мировой радиотехники того времени (1939 г., НИИС НКС).

В 32 года — впервые сформулирована и доказана основополагающая в развитии криптографии теорема

об "одноразовых ключах", чётко определившая критерии математически недешифруемой системы (1941 г., НИИС НКС). В эти же годы создан новый класс недешифруемых на то время отечественных систем кодирования речи для закрытой радиосвязи (1941–1943 гг., Государственный союзный производственно-экспериментальный институт 56, г. Уфа). Эта аппаратура получила "боевое крещение" в 1942 г., когда проводные линии связи с Закавказским фронтом были нарушены во время боев в Сталинграде. В дальнейшем она использовалась для связи Ставки Верховного Главнокомандования с фронтами, а в последующие годы применялась на дипломатических линиях связи Москвы с Хельсинки, Парижем и Веной для проведения переговоров по заключению мирных договоров после окончания Второй мировой войны, а также при проведении Тегеранской, Ялтинской и Потсдамской конференций глав трёх государств (1943–1945 гг.). Впоследствии усовершенствованные системы такого типа успешно использовались для правительственной связи вплоть до 1970-х годов.

В 36 лет В.А. Котельников воссоздает и возглавляет кафедру теоретических основ радиотехники на радиотехническом факультете МЭИ, которой руководит в течение 36 лет (1944–1980 гг.). В 1944–1947 гг. под его руководством была разработана телеметрическая аппаратура для самолетов.

В 38 лет В.А. Котельниковым создана теория потенциальной помехоустойчивости (тема его докторской диссертации) — одна из основных ветвей теории информации, в которой были заложены основы нового научного направления — статистической радиофизики. Эта работа, значительно опередившая своё время, впоследствии стала одним из краеугольных камней современной теории связи (1946 г., МЭИ).

В 39 лет он создал и возглавил Сектор специальных работ для выполнения научных исследований в интересах реактивного вооружения (Спецсектор) (впоследствии переименованный в Особое конструкторское бюро МЭИ) — одну из ведущих организаций-разработчиков радиоэлектронной аппаратуры для ракетно-космических программ (1947 г., МЭИ). В рамках этих программ были созданы уникальные радиоэлектронные системы для ракет и космических аппаратов гражданского и военного назначения. Многие идеи В.А. Котельникова и сейчас используются при создании систем управления и контроля космических аппаратов. Как главный конструктор Спецсектора в 1947–1953 гг. он входил в межведомственный Совет главных конструкторов, который возглавлял С.П. Королёв. Был избран деканом радиотехнического факультета МЭИ (1947–1953 гг.).

В 45 лет избран действительным членом Академии наук СССР, минуя ступень члена-корреспондента (1953 г.), назначен заместителем директора только что учреждённого Института радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР.

В 46 лет становится директором создаваемого ИРЭ АН СССР, который за очень короткий срок вошёл в число лидирующих научных учреждений в области радиоэлектроники как в нашей стране, так и за рубежом. Возглавлял институт он в течение 33 лет (1954–1987 гг.), оставаясь затем почётным директором и продолжая вести Учёный совет института еще в течение 18 лет, до конца своей жизни. Под руководством Владимира Александровича получили развитие многие новые направления фундаментальных научных исследо-

ваний и осуществлён ряд выдающихся научно-технических проектов. С именем В.А. Котельникова связано новое направление в исследовании космоса — планетная радиолокация.

В возрасте 52-х лет В.А. Котельниковым была открыта новая страница в радиоастрономии — по его инициативе, под его руководством и при его непосредственном участии впервые были проведены уникальные эксперименты по радиолокации Венеры (1961–1964 гг.), Меркурия (1962 г.), Марса (1963 г.), Юпитера (1963 г.). В результате этих исследований с высокой точностью определено значение астрономической единицы, создана и экспериментально подтверждена новая теория движения внутренних планет Солнечной системы. Выдающимся мировым достижением стали радиолокационные съёмки Венеры, осуществлённые в 1983–1984 гг. с помощью бортовой комплексной радиолокационной системы автоматических межпланетных станций "Венера-15" и "Венера-16", благодаря которым удалось получить изображение северной части планеты площадью 115 млн км<sup>2</sup> с разрешением 1 км. В результате анализа этих уникальных данных был создан и впоследствии опубликован первый в истории науки *Атлас поверхности Венеры* (М.: МИИГАиК, 1989), главный редактор — академик В.А. Котельников (1961–1989 гг., ИРЭ).

Наряду с решением научных проблем и педагогической деятельностью, Владимир Александрович занимался большой научно-организационной деятельностью. В 1969–1988 гг. В.А. Котельников был исполняющим обязанности президента, вице-президентом, первым вице-президентом АН СССР, возглавлял ряд Научных советов АН СССР (РАН) и Межведомственных научно-технических советов и комиссий, совмещая эти высокие посты с повседневной и систематической работой в ИРЭ. Он проводил большую работу по организации и выполнению поисковых и фундаментальных исследований в Академии, координировал научно-исследовательские работы многочисленных организаций страны, специализирующихся в области современной радиотехники и электроники. Реализуя свой огромный научный потенциал и жизненный опыт, обладая феноменальной работоспособностью и высокой ответственностью за порученное дело, он добивался максимальной эффективности результатов.

В 1987 г. Владимир Александрович оставил пост директора ИРЭ, а в 1988 г. — вице-президента АН СССР и, продолжая руководить научными советами и участвовать в жизни института, вновь вернулся к теоретическим работам в области радиофизики.

В 88 и 89 лет он опубликовал последние статьи, замыкающие круг его работ в области радиофизики (1996–1997 гг.).

Эти работы он, как в молодые годы, выполнил в одиночку и опубликовал почти накануне своего 90-летия! В них он решал задачу обратную той, которую рассматривал в своих предыдущих работах. Если раньше он определял, каким должен быть сигнал, чтобы его можно было передать по заданному каналу, то теперь, наоборот, — как подобрать канал для заданного сигнала, чтобы передать его наилучшим образом. Владимир Александрович опять опередил своё время. Работы эти сейчас пользуются очень большой популярностью. Раньше радиоэлектроника не позволяла менять канал, и приходилось подбирать сигнал. Теперь же можно подобрать канал так, чтобы он оптимальным образом

пропускал сигнал, при этом ещё и "подчищал" его, отфильтровывая паразитные шумы, которые на выходе не дали бы его как следует расшифровывать. По сути дела, это адаптивные каналы. Это были его самые последние научные публикации. Ну, а после этого он занялся квантовой механикой.

Интерес к квантовой механике возник у Владимира Александровича ещё в молодости. Начало его творческого пути (1927 г.) пришлось на период становления как радиотехники, которой он был увлечён, так и квантовой механики, будоражившей умы научной интеллигенции, в среде которой горячо обсуждались появившиеся по этой проблеме работы. Естественно, волна интереса к этой "загадочной" области захватила и молодого Владимира Котельникова.

Он покупал книги по квантовой механике, которые в то время выходили в СССР, просматривал — на их серьёзное изучение времени не хватало. И, как потом вспоминал Владимир Александрович, у него каждый раз оставалось ощущение неудовлетворённости оттого, что "до конца понять эту квантовую механику не удавалось". Он мечтал "когда-нибудь всё же в ней разобраться".

И наконец "немного освободившись", он приступил к квантовой механике. Он не считал себя специалистом в этой области и рассматривал эту свою деятельность как "хобби на старости лет".

Сначала он внимательно изучил имеющиеся книги по "классической" квантовой механике. Работы по всевозможным "альтернативным течениям" он не рассматривал, чтобы над ним ничего не довлело — хотел посмотреть, что же у него самого получится. "Отталкивался" он от уравнения Шрёдингера. В конце 2003 г. он был готов обсудить получившиеся результаты со специалистами, но не успел. 11 февраля 2005 г. В.А. Котельников скончался. На 97-м году жизни творческий путь Владимира Александровича завершился почти законченной, но не опубликованной работой *Модельная нерелятивистская квантовая механика*, черновики которой были опубликованы в 2008 г.

В этой работе Владимир Александрович изложил основанную на уравнении Шрёдингера нерелятивистскую квантовую механику на языке классической вероятности и классических представлений о существовании траектории частицы и действующего на неё поля (см. приложение). Развита им теория является одним из примеров так называемой теории скрытых параметров, которая развивалась в XX в. в работах Луи де Бройля, Д. Бома и некоторых других авторов. С работами указанных авторов Владимир Александрович знаком не был. Независимо от них он воспроизвёл всю логику теории скрытых параметров, вводя свои терминологию и обозначения, и получил все основные результаты нерелятивистской квантовой механики на своём языке. К этим результатам относятся расщепление волнового пакета, анализ двухщелевого эксперимента и квантовая интерференция, построение теории стационарных состояний и теория атома водорода и осциллятора, теория нестационарных состояний и квантовых переходов, объяснение туннельного эффекта.

Мы, сотрудники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, очень уважали и любили Владимира Александровича и считаем своим первейшим долгом поддерживать созданную им в институте творческую атмосферу и стараться в своих делах следовать его принципам.

PACS numbers: 03.65.Ta  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902h.0204

## Приложение Модельная нерелятивистская квантовая механика. Размышления \*

В.А. Котельников

### ВВЕДЕНИЕ

Квантовая механика рассматривает движение очень малых тел, таких как элементарные частицы. Как показали эксперименты, их движение не всегда подчиняется законам классической механики. Квантовая механика оказалась более сложной и абстрактной, нежели классическая. Частицы в "классической" квантовой механике не имеют зрительного образа. Они не имеют траекторий, не могут одновременно иметь определённого положения и скорости и т.п. Движение частиц определяется многими правилами, которые не всегда строго выводятся из основных законов, как это имеет место в классической механике макротел и электродинамике.

Всё это затрудняет изучение и использование квантовой механики, особенно для тех, кому больше присуще образное мышление.

В данной работе предлагается некоторая образная модель квантовой механики, которая соответствует накопленному экспериментальному материалу, но делает её (механику малых тел) более наглядной и более строго логично построенной.

### Глава 1

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

### 1.1. Основные положения

#### нерелятивистской квантовой механики

Основное положение классической механики заключается в следующем: состояние частицы массой  $m$  как точечного тела задается её положением с помощью радиуса-вектора  $\mathbf{r}$  и её скоростью  $\mathbf{V}$ . Зная эти параметры для некоторого момента времени  $t$  и силу внешнего поля, которая будет действовать на частицу, мы можем определить, используя закон Ньютона, все параметры её движения для любого момента времени.

В квантовой механике это оказывается не так. Как показали эксперименты и анализ их результатов, состояние частиц в данный момент времени  $t$  нельзя полностью охарактеризовать значениями  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{V}$ .

Основное положение нерелятивистской квантовой механики, подтверждённое опытами, заключается в следующем: если не учитывать спин частицы, то её состояние в некоторый момент времени  $t$  полностью определяется некоторой комплексной функцией (волновой функцией) в трёхмерном пространстве:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}, t) \exp(i\beta(\mathbf{r}, t)), \quad (1.1)$$

где  $a(\mathbf{r}, t)$  и  $\beta(\mathbf{r}, t)$  вещественны. Функция  $a(\mathbf{r}, t)$  определяет вероятность положения частицы в момент  $t$  в том

или другом месте пространства. Так, вероятность того, что частица будет находиться в момент  $t$  в некотором малом объёме  $dq$ , содержащем конец радиуса-вектора  $\mathbf{r}$ , равна

$$dP = a^2(\mathbf{r}, t) dq. \quad (1.2)$$

Функция  $\beta(\mathbf{r}, t)$  определяет динамическое состояние частицы.

В отсутствие магнитного поля, зная  $\psi(\mathbf{r}, t)$  для начального момента, массу частицы  $m$  и силы внешних полей  $\mathbf{F}_0(\mathbf{r}, t)$ , которые на неё будут действовать, можно найти  $\psi(\mathbf{r}, t)$  для других моментов времени с помощью уравнения Шрёдингера. Оно, для нерелятивистского случая, который мы только и будем рассматривать, и отсутствия магнитного поля и спина записывается так:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) + U(\mathbf{r}, t) \psi(\mathbf{r}, t), \quad (1.3)$$

где  $\hbar = 1,05 \times 10^{-27}$  эрг с — постоянная Планка,  $U(\mathbf{r}, t)$  — силовая функция поля, действующего на частицу. При этом сила, действующая на частицу, будет равна

$$\mathbf{F}_0 = -\nabla U(\mathbf{r}, t). \quad (1.4)$$

Зная  $\psi(\mathbf{r}, t)$  и  $m$ , можно с помощью правил квантовой механики найти и другие параметры движения частицы.

Использование вероятностных параметров обусловлено тем, что при проведении совершенно идентичных экспериментов, в которых происходит регистрация малых частиц, мы не имеем одинаковых результатов. Координаты частиц регистрируются с разбросом, и можно лишь говорить о вероятности нахождения частицы в том или другом месте.

Приведённая закономерность является основным положением нерелятивистской квантовой механики.

### 1.2. Скорость частицы

#### в нерелятивистской модельной квантовой механике

В общепринятой квантовой механике говорится, что частица не может одновременно находиться в определённом месте и иметь при этом определённую скорость. Но там рассматриваются параметры частицы, взятые из разных реализаций процесса при одной и той же волновой функции.

Попробуем построить модель, которая соответствовала бы приведённому основному положению квантовой механики и, значит, опыту, но в которой частица имела бы траекторию, как в макроскопической механике. При построении модели мы будем рассматривать положение и скорость в одной и той же реализации, где скорость и положение могут существовать одновременно. Для этого сначала найдём скорость и ускорение частицы, если она движется так, как этого требует основное положение квантовой механики, т.е. так, что удовлетворяется уравнение Шрёдингера (1.3).

Предположим, что частица, находясь в момент времени  $t$  в точке с радиусом-вектором  $\mathbf{r}$ , имеет скорость  $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$ . Найдём вероятность того, что частица за время  $t, t + dt$  пересечёт малую площадку  $dS$  (см. рис. 1)<sup>1</sup>.

\* Приводятся введение и главы 1, 2. Полностью работа опубликована в 2008 г. (М.: Физматлит, 2008) 72 с.

<sup>1</sup> К сожалению, рисунки в рукописи и в опубликованной работе (М.: Физматлит, 2008) отсутствуют. (Примеч. ред.)

Частица за время  $dt$  передвинется на отрезок  $\mathbf{V} dt$ . Она пересечёт площадку  $d\mathbf{S}$ , если в момент  $t$  находилась на расстоянии  $-\lambda \mathbf{V} dt$  ( $0 < \lambda < 1$ ) от одной из точек этой площадки или, что то же, если она была в момент  $t$  в примыкающей к площадке  $d\mathbf{S}$  области объёмом  $dq = \mathbf{V} d\mathbf{S} dt$ . Вероятность этого, согласно (1.2), будет  $dP_{d\mathbf{S}} = a^2 \mathbf{V} d\mathbf{S} dt$ .

Таким образом,  $dP_{d\mathbf{S}}$  — вероятность пересечения частицей площадки  $d\mathbf{S}$  за отрезок времени  $t, t + dt$ . При  $\mathbf{V} d\mathbf{S} < 0$  частица будет пересекать площадку  $d\mathbf{S}$  в обратном направлении и в этом случае  $dP_{d\mathbf{S}}$  будет отрицательно.

Возьмём некоторый объём  $q$ , ограниченный замкнутой поверхностью  $S$ . Вероятность того, что частица выйдет из этого объёма, т.е. пересечёт поверхность  $S$ , за время  $t, t + dt$  будет в соответствии с теоремой Гаусса — Остроградского

$$P_- = dt \oint_S a^2 \mathbf{V} d\mathbf{S} = dt \int_q \nabla(a^2 \mathbf{V}) dq.$$

Вероятность того, что частица в момент  $t$  была в объёме  $q$ , согласно (1.2) равна

$$P_t = \int_q a^2 dq.$$

Вероятность того, что частица в момент  $t + dt$  останется в объёме  $q$ , равна

$$P_{t+dt} = \int_q \left( a + \frac{\partial a}{\partial t} dt \right)^2 dq = \int_q \left( a^2 + 2a \frac{\partial a}{\partial t} dt \right) dq.$$

Тут слагаемое с  $dt^2$  опущено как бесконечно малая величина более высокого порядка.

Очевидно, что за событием "частица находится в объёме  $q$  в момент  $t$ ", обязательно последует одно из двух событий: "частица останется в объёме  $q$  в момент  $t + dt$ " или "частица выйдет из области  $q$  за время  $t, t + dt$ ". Поэтому

$$P_t = P_{t+dt} + P_-,$$

или

$$P_{t+dt} - P_t = -P_-.$$

Из этого равенства находим

$$\int_q \frac{\partial a^2}{\partial t} dq = - \int_q \nabla(a^2 \mathbf{V}) dq,$$

и так как это равенство должно быть справедливо для любого  $q$ , то

$$\frac{\partial a^2}{\partial t} = -\nabla(a^2 \mathbf{V}). \quad (1.5)$$

Теперь посмотрим, чему должна равняться величина  $\partial a^2 / \partial t$ , исходя из уравнения Шрёдингера (1.3). Для этого подставим в него значение  $\psi(\mathbf{r}, t)$  из (1.1). Получим

$$i\hbar \left( \frac{\partial a}{\partial t} + ia \frac{\partial \beta}{\partial t} \right) \exp(i\beta) = -\frac{\hbar^2}{2m} [\nabla^2 a + 2i\nabla a \nabla \beta + i a \nabla^2 \beta - \alpha(\nabla \beta)^2] \exp(i\beta) + U a \exp(i\beta). \quad (1.6a)$$

Сокращая обе части уравнения на  $\hbar \exp(i\beta)$  и приравнявая мнимые части, получим

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -\frac{\hbar}{2m} [2\nabla a \nabla \beta + a \nabla^2 \beta].$$

Далее, умножая обе части на  $2a$  и преобразовывая, получим

$$2a \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial a^2}{\partial t} = -\frac{\hbar}{2m} [4a \nabla a \nabla \beta + 2a^2 \nabla^2 \beta], \quad (1.6b)$$

или

$$\frac{\partial a^2}{\partial t} = -\frac{\hbar}{m} \nabla(a^2 \nabla \beta). \quad (1.6)$$

Приравнявая действительные части в (1.6a) и сокращая на  $a \exp(i\beta)$ , получим

$$-\hbar \frac{\partial \beta}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \left[ -\frac{\nabla^2 a}{a} + (\nabla \beta)^2 \right] + U. \quad (1.7)$$

Мы видим, что уравнения (1.5) и (1.6) будут совпадать, если принять

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = \frac{\hbar}{m} \nabla \beta(\mathbf{r}, t). \quad (1.8)$$

Таким образом, если частица в момент времени  $t$  оказалась в точке с радиусом-вектором  $\mathbf{r}$ , то её скорость, для того чтобы удовлетворялось уравнение Шрёдингера и соотношение (1.2), должна соответствовать уравнению (1.8).

### 1.3. Силы в нерелятивистской модели квантовой механике

Найдём теперь силы, которые должны действовать на частицу, чтобы она имела эти скорости. Для этого определим из полученных скоростей ускорение частицы. Ускорение и скорость при движении частицы по некоторой траектории, когда надо учитывать изменение  $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$  за счёт  $\mathbf{r}$  и  $t$ , будут, как известно, связаны уравнением (см. приложение 1)

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{1}{2} \nabla(\mathbf{V}^2) - \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V}) + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}. \quad (1.9)$$

Согласно уравнению (1.8), скорость  $\mathbf{V}$  является градиентом, поэтому векторное произведение  $\nabla \times \mathbf{V} = 0$  и, значит,

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{1}{2} \nabla(\mathbf{V}^2) + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}. \quad (1.10)$$

Обратим внимание на разницу между  $d\mathbf{V}/dt$  и  $\partial \mathbf{V} / \partial t$ . Производная  $d\mathbf{V}/dt$  — это ускорение частицы при её движении по траектории, в то время как  $\partial \mathbf{V} / \partial t$  — это частная производная  $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$  по времени, когда  $\mathbf{r}$  считается постоянным.

Если принять, что движение частицы подчиняется закону Ньютона, то для возникновения ускорения на неё должна подействовать сила

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{m}{2} \nabla(\mathbf{V}^2) + m \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}, \quad (1.11)$$

или, учитывая (1.8), получим

$$\mathbf{F} = \frac{m}{2} \nabla \left( \frac{\hbar^2}{m^2} (\nabla \beta)^2 \right) + m \frac{\hbar}{m} \frac{\partial \nabla \beta}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \nabla(\nabla \beta)^2 + \hbar \frac{\partial}{\partial t} \nabla \beta. \quad (1.12)$$

Выражение, стоящее в правой части (1.12), можно также получить из равенства (1.7). Действительно, если взять градиент от правой и левой частей равенства (1.7), получим

$$-\hbar \frac{\partial \nabla \beta}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \left[ -\nabla \frac{\nabla^2 a}{a} + \nabla (\nabla \beta)^2 \right] + \nabla U,$$

или

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla (\nabla \beta)^2 + \hbar \frac{\partial}{\partial t} \nabla \beta = \frac{\hbar^2}{2m} \nabla \frac{\nabla^2 a}{a} - \nabla U.$$

Принимая это во внимание, выражение (1.12) можно переписать так:

$$\mathbf{F} = \frac{\hbar^2}{2m} \nabla \frac{\nabla^2 a}{a} - \nabla U = \mathbf{F}_q + \mathbf{F}_o = m \frac{d\mathbf{V}}{dt}. \quad (1.13)$$

Здесь

$$\mathbf{F}_o = -\nabla U, \quad (1.14)$$

в соответствии с условием (1.4), — сила внешнего поля, действующая на частицу;

$$\mathbf{F}_q = \frac{\hbar^2}{2m} \nabla \frac{\nabla^2 a}{a} \quad (1.15)$$

— добавочная сила, которая должна действовать на частицу для того, чтобы она перемещалась так, как этого требует уравнение Шрёдингера, и, значит, было бы совпадение с экспериментами. Эта сила определяется модулем волновой функции  $a(\mathbf{r}, t)$ .

#### 1.4. Модель малой частицы

##### в нерелятивистской модельной квантовой механике

На основании сказанного предлагается следующая модель малой частицы. Модель частицы состоит из совокупности некоторого объёмного образования в виде скалярного поля  $a^2(\mathbf{r}, t)$ , равного квадрату модуля волновой функции (1.1), и движущейся в нём точечной частицы. Поле модели назовём квазиполем, точечную частицу — Т-частицей, а совокупность квазиполя и Т-частицы — квантоном.

Динамика квазиполя определяется уравнением Шрёдингера (1.3). Движение Т-частицы подчиняется закону Ньютона (1.13), т.е. она движется как точечная частица в классической механике под действием суммы двух сил: классической —  $\mathbf{F}_o$  (1.14) и квантовой —  $\mathbf{F}_q$  (1.15). Наличие силы  $\mathbf{F}_q$  обуславливает отличие квантовой механики от классической.

В случае, когда силой  $\mathbf{F}_q$  можно пренебречь по сравнению с внешними силами  $\mathbf{F}_o$ , действуют законы классической механики. Вероятность того, что частица будет находиться в малом объёме  $dq$ , содержащем конец радиуса-вектора  $\mathbf{r}$ , в момент  $t$  даётся выражением (1.2). Скорость Т-частицы в этом случае будет определяться выражением (1.8). При повторении в точности одного и того же эксперимента волновая функция, а значит, и квазиполе будут повторяться, но Т-частица будет занимать разные положения с вероятностью, даваемой выражением (1.2), и, соответственно, для разных положений Т-частицы её скорость будет определяться выраже-

нием (1.8). В уравнение Шрёдингера положение Т-частицы не входит, таким образом, она на своё квазиполе не действует. Т-частица может иметь электромагнитные и другие поля и действовать с помощью внешних сил на другие элементарные частицы.

Мы рассмотрели случай, когда элементарная частица имеет одну волновую функцию. Это так называемый чистый случай. Может быть и более сложная ситуация, когда элементарная частица может иметь одну из нескольких волновых функций  $\psi_1(\mathbf{r}, t), \psi_2(\mathbf{r}, t), \dots, \psi_n(\mathbf{r}, t)$  с вероятностями  $P_1, P_2, \dots, P_n$ . Это будет так называемый смешанный случай, когда надо рассматривать ситуацию с каждой волновой функцией отдельно и затем складывать результаты с учётом вероятностей  $P_1, P_2, \dots, P_n$ .

Нерелятивистскую квантовую механику можно построить, декларируя предложенную модель элементарной частицы, сославшись на то, что она не противоречит опытам, и выводя всё остальное, включая уравнение Шрёдингера, логическими построениями из неё.

## Глава 2

### КВАЗИПОЛЕ

**2.1.** Рассмотрим подробнее свойства квазиполя. В соответствии с (1.2) вероятность того, что Т-частица будет находиться в момент  $t$  в некоторой области  $q$ , будет

$$P_q(t) = \int_q a^2(\mathbf{r}, t) dq, \quad (2.1)$$

где интеграл берётся по этой области. Будем называть  $a^2(\mathbf{r}, t)$  **плотностью** квазиполя в точке  $\mathbf{r}$  в момент  $t$ , а величину интеграла (2.1) — **количеством** квазиполя в объёме  $q$ . Тогда будет справедливо положение: вероятность нахождения Т-частицы в некоторой области равна количеству квазиполя в ней.

Квазиполе, которое можно представить как некоторый газ или сжимаемую жидкость с плотностью  $a^2(\mathbf{r}, t)$ , не возникает со временем и не исчезает, а только перемещается со скоростью  $V(\mathbf{r}, t)$ . При этих условиях для квазиполя должно выполняться соотношение

$$dt \frac{\partial}{\partial t} \int_q a^2 dq = -dt \oint_S a^2 \mathbf{V} d\mathbf{S}. \quad (2.2)$$

Левый интеграл в (2.2) берётся по некоторой области  $q$ , правый — по замкнутой поверхности  $S$ , охватывающей эту область. За время  $dt$  количество квазиполя в области  $q$  уменьшится на величину левой части выражения (2.2). Это уменьшение произойдёт только за счёт того, что поле выйдет через поверхность  $S$ . Через элемент этой поверхности  $d\mathbf{S}$  за время  $dt$  выйдет количество квазиполя, равное  $a^2 \mathbf{V} d\mathbf{S} dt$ , а через всю поверхность выйдет количество квазиполя, равное правой части равенства (2.2).

**2.2.** Найдём далее, какова должна быть скорость движения квазиполя  $V(\mathbf{r}, t)$ , чтобы выполнялось и соотношение (2.2), и условие того, что плотность квазиполя  $a^2(\mathbf{r}, t)$  соответствует волновой функции  $\psi(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}, t) \exp(i\beta(\mathbf{r}, t))$ , которая является решением уравнения Шрёдингера. Для этого воспользуемся теоре-

мой<sup>2</sup> из приложения 2, полагая в выражении (П2.3)

$$\psi_1 = \psi_2 = a \exp(i\beta).$$

Тогда, с учётом того, что  $\nabla\psi_{1,2} = (\nabla a) \exp(i\beta) + i(\nabla\beta)a \exp(i\beta)$ , получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_Q a \exp(i\beta) a \exp(-i\beta) dq = \\ = i \frac{\hbar}{2m} \oint_S \left\{ a \exp(-i\beta) [(\nabla a) \exp(i\beta) + i(\nabla\beta)a \exp(i\beta)] - \right. \\ \left. - a \exp(i\beta) [(\nabla a) \exp(-i\beta) - i(\nabla\beta)a \exp(-i\beta)] \right\} dS. \end{aligned}$$

Проведя упрощение, получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_Q a^2 dq = -\frac{\hbar}{m} \oint_S (\nabla\beta) a^2 dS.$$

Сравнивая это выражение с (2.2), видим, что оно будет совпадать с ним, если принять скорость движения квазиполя равной

$$\mathbf{V}(r, t) = \frac{\hbar}{m} \nabla\beta(r, t). \quad (2.3)$$

Таким образом, можно в модели принять, что квазиполе не может исчезать и появляться, а только перемещаться со скоростью, даваемой выражением (2.3).

Если взять в качестве области интегрирования всё пространство, охватываемое квазиполем, где  $a \neq 0$ , то интеграл правой части выражения (2.2) будет равен нулю, так как в этом случае на поверхности  $S$   $a = 0$ .

Таким образом, полное количество квазиполя элементарной частицы всегда постоянно. Это количество будет равно вероятности того, что Т-частица находится где-то в квазиполе, а эта вероятность равна единице. Отсюда следует, что полное "количество" квазиполя элементарной частицы всегда равно единице, т.е. интеграл (2.1), если его взять по всему полю, должен быть равен единице:

$$\int_Q a^2(\mathbf{r}, t) dq = 1. \quad (2.4)$$

Здесь и далее индекс  $Q$  у интеграла означает, что интегрирование производится по всему пространству, где  $a^2 \neq 0$ .

**2.3.** Сравнивая выражения (1.8) и (2.3), видим, что скорость движения Т-частицы равна скорости движения квазиполя в той точке, где находится Т-частица, т.е. она увлекается квазиполем и движется вместе с ним.

Поскольку скорости квазиполя и Т-частицы равны, то должны быть равны и их ускорения. Поэтому элемент

<sup>2</sup> Эта теорема утверждает: "Если  $\psi_1(\mathbf{r}, t)$  и  $\psi_2(\mathbf{r}, t)$  меняются со временем согласно одному и тому же уравнению Шрёдингера, т.е.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi_1 = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi_1 + U\psi_1, \quad (П2.1)$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi_2 = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi_2 + U\psi_2, \quad (П2.2)$$

то

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_Q \psi_1^* \psi_2 dq = i \frac{\hbar}{2m} \int_S (\psi_1^* \nabla \psi_2 - \psi_2 \nabla \psi_1^*) dS. \quad (П2.3)''$$

(Примеч. ред.)

поля, двигаясь по некоторой траектории, будет иметь ускорение, в соответствии с (1.13) равное

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{\hbar^2}{2m^2} \nabla \frac{\nabla^2 a}{a} - \frac{1}{m} \nabla U_0. \quad (2.5)$$

Второе слагаемое правой части этого уравнения определяется внешними силами, первое — силами самого поля. Оно зависит от плотности поля и его производных в точке нахождения Т-частицы — от параметра  $\nabla^2 a/a$ , который у нас далее будет часто встречаться. Поэтому рассмотрим его подробнее.

**2.4.** Поместим начало координат в интересующую нас точку. Представим  $a$  рядом Тейлора, ограничив область рассмотрения так, чтобы было достаточно квадратичных членов. Будем иметь

$$\begin{aligned} a(x, y, z) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} y^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial z^2} z^2 + \frac{\partial^2 a}{\partial x \partial y} xy + \\ + \frac{\partial^2 a}{\partial y \partial z} yz + \frac{\partial^2 a}{\partial z \partial x} zx + \frac{\partial a}{\partial x} x + \frac{\partial a}{\partial y} y + \frac{\partial a}{\partial z} z + a, \end{aligned}$$

где производные и функция  $a$  берутся в точке  $(0, 0, 0)$ . Найдем среднее значение  $a$  на расстоянии  $\delta$  от точки  $(0, 0, 0)$ , подразумевая под этим величину

$$\begin{aligned} \langle a_\delta \rangle = \frac{1}{6} [a(\delta, 0, 0) + a(-\delta, 0, 0) + a(0, \delta, 0) + \\ + a(0, -\delta, 0) + a(0, 0, \delta) + a(0, 0, -\delta)]. \end{aligned}$$

Имеем

$$\begin{aligned} a(\delta, 0, 0) + a(-\delta, 0, 0) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \delta^2 + \frac{\partial a}{\partial x} \delta + a + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \delta^2 - \frac{\partial a}{\partial x} \delta + a = \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \delta^2 + 2a. \end{aligned}$$

Аналогично, и для  $a(0, \delta, 0) + a(0, -\delta, 0)$  и  $a(0, 0, \delta) + a(0, 0, -\delta)$ .

Подставив эти выражения в  $\langle a_\delta \rangle$ , получим

$$\langle a_\delta \rangle = \frac{1}{6} \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial z^2} \right) \delta^2 + a = \frac{1}{6} \delta^2 \nabla^2 a + a.$$

Откуда

$$\frac{\nabla^2 a}{a} = 6 \frac{\langle a_\delta \rangle - a}{a\delta^2}. \quad (2.6)$$

Таким образом, величина (2.6) показывает, на сколько поле в центре меньше, чем в ближайшем окружении. Эту величину будем называть **разрежённостью** квазиполя.

Отметим, что разрежённость не зависит от интенсивности поля. Она также не зависит от поворота осей координат, так как  $\nabla^2 a$ , как известно, от него не зависит.

В (2.5) первое слагаемое в выражении для ускорения квазиполя и Т-частицы направлено по градиенту разрежённости квазиполя в направлении большей разрежённости и пропорционально этому градиенту. Поэтому квазиполе будет стремиться двигаться так, чтобы разрежённость уменьшить и сделать её равномерно распределённой по пространству.

Поскольку скорости движения элементов квазиполя определяются в соответствии с (1.8) градиентом от скаляра  $\beta$ , то  $\text{rot } \mathbf{V} = 0$ , т.е. квазиполе не должно иметь вихрей.

**2.5.** Как уже говорилось, состояние элементарной частицы полностью определяется её волновой функцией

(1.1). Она также полностью определяет и параметры квазиполя: его плотность  $a^2$  и скорость движения  $\mathbf{V} = (\hbar/m)\nabla\beta$ . Но обратно, зная только плотность и скорость движения квазиполя, нельзя полностью определить волновую функцию. Действительно, при этом мы будем знать только модуль волновой функции и градиент её аргумента в соответствии с (1.8), т.е. производные аргумента по координатам. При этом можно к аргументу добавить ещё произвольную функцию времени, не зависящую от координат, при этом градиент не изменится.

Чтобы найти  $\beta$ , надо ещё знать производную  $\partial\beta/\partial t$ . Её можно найти из уравнения (1.7), зная  $U$ , поскольку волновая функция должна удовлетворять уравнению Шрёдингера. Тогда получим

$$\beta(\mathbf{r}, t) = \beta(\mathbf{r}_0, t_0) + \int_{t_0}^t \frac{\partial\beta(\mathbf{r}_0, t)}{\partial t} dt + \int_{\mathbf{r}_0}^{\mathbf{r}} \nabla\beta(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}. \quad (2.7)$$

Таким образом, квазиполе совместно с  $U$  определяют волновую функцию с точностью до постоянной  $\beta(\mathbf{r}_0, t_0)$ , которая на состоянии квантона не сказывается.

Так же, как не всякая комплексная функция может быть волновой — она должна удовлетворять уравнению Шрёдингера, так и не всякое поле  $a^2(\mathbf{r}, t)$  и  $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$  могут представлять квазиполе — они должны соответствовать некоторой волновой функции.

**2.6.** Если в уравнение Шрёдингера (1.3) подставить волновую функцию  $\psi(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}, t) \exp(i\beta(\mathbf{r}, t))$  и учесть соотношение для скорости квазиполя (2.3), то выражения для мнимой (1.6) и действительной (1.7) частей уравнения Шрёдингера приобретают простой физический смысл. Действительно, с учетом (2.3) соотношение (1.6) переходит в

$$\frac{\partial a^2}{\partial t} = -\nabla(a^2 \mathbf{V}), \quad (2.8)$$

а соотношение (1.7), если взять градиент от обеих его частей, переходит в

$$-m \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla \frac{\nabla^2 a}{a} + \frac{m}{2} \nabla V^2 + \nabla U. \quad (2.9)$$

Уравнение (2.8) равносильно уравнению (2.2) и говорит о том, что квазиполе не может возникать и исчезать, а только перемещаться. Уравнение (2.9), с учётом (1.10) и (2.3), будет эквивалентно уравнению (2.5), т.е. тому положению, что ускорение элементов квазиполя равно сумме сил — внешней и силе самого квазиполя, делённой на массу частицы. Таким образом, уравнение Шрёдингера для квазиполя соответствует уравнению газодинамики с той разницей, что сила, с которой квазиполе действует на самого себя и которую мы обозначили  $F_q$ , в корне отличается от аналогичной силы в газодинамике.

основ связи (знаменитая теорема отсчётов, теория потенциальной помехоустойчивости, теоремы в теории криптографии). О его роли в советских космических исследованиях говорится значительно меньше. Между тем вклад Владимира Александровича и руководимых им коллективов — Особого конструкторского бюро Московского энергетического института (ОКБ МЭИ) и Института радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН — в эту область не менее велик. Другая сторона его "космической" деятельности связана с работой на постах вице-президента АН СССР и председателя Совета "Интеркосмос".

В этом небольшом докладе мы кратко расскажем об основных этапах деятельности В.А. Котельникова, выдающегося учёного, инженера, политика и руководителя.

## 2. В.А. Котельников и космическая радиолокация

Побудительным мотивом к становлению космической радиолокации были вполне практические потребности. В 1960-х годах состояние космической техники в СССР и США позволяло планировать научные космические миссии для исследования ближайших к Земле планет: Венеры и Марса. Для того чтобы обеспечить полёт космических аппаратов к этим планетам на расстояния порядка нескольких сотен километров, требовалось знать их положение относительно Земли с большой точностью. Оказалось, что астрономические наблюдения, проведённые ранее, с хорошей точностью установили только относительное положение этих небесных тел. Что касается абсолютных значений взаимных расстояний, то они являлись весьма грубыми с точки зрения навигационных требований, предъявляемых к управлению полётом космического аппарата.

Все расстояния между планетами выражаются через астрономическую единицу (а.е.), которая равняется среднему расстоянию от Земли до Солнца и оценивается в 150 млн км. По данным астрономических наблюдений эта величина была определена с точностью порядка 10000 км. Это означает, что расстояние, например, до Венеры было известно с точностью в несколько тысяч километров. Ясно, что указанная точность не могла рассматриваться как удовлетворительная.

Возможность с необходимой точностью измерить расстояние между Землёй и какой-либо ближайшей планетой предоставляла радиолокация. Достаточно послать радиоимпульсы длительностью порядка 6 мкс, для того чтобы снизить погрешность измерения расстояния примерно до 1 км. Весь вопрос заключался в необходимой мощности этих импульсов — такой, при которой отражённый планетой сигнал превышал бы уровень шумов приёмника радиолокатора, установленного на поверхности Земли. Если учесть, что в радиолокации действует закон "обратной четвёртой степени расстояния", а расстояния между планетами составляют в лучшем случае несколько десятков миллионов километров, то легко понять, что для успешной радиолокации планет необходимы антенны площадью в несколько тысяч квадратных метров и передатчики с мощностью в несколько десятков киловатт. Такое "удовольствие" было доступно лишь странам с хорошо развитой промышленностью. Поэтому естественно, что планетная радиолокация получила развитие прежде всего в США, СССР и частично в Англии.

В СССР в то время вблизи г.Евпатория (Крым) создавался Центр дальней космической связи (ЦДКС), предназначенный для связи с теми космическими аппаратами, которые предполагалось послать для изучения

PACS numbers: 01.65.+g, 95.55.-n, 96.30.-t  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902i.0208

## Владимир Александрович Котельников и исследования Солнечной системы

Л.М. Зелёный, Н.А. Арманд

### 1. Введение

В биографических описаниях деятельности академика Владимира Александровича Котельникова обычно говорят о его выдающихся трудах в области теоретических





Рис. 1. Антенна АДУ-1000.

прежде всего Венеры и Марса. Для этой цели были построены три антенны АДУ-1000 (рис. 1): одна для передачи сигналов и две другие для приёма. Передатчик мощностью порядка 10 кВт работал на длине волны 40 см. Эти характеристики соответствовали требованиям радиолокации планет, и ЦДКС был выбран для проведения эксперимента.

По мере развития средств радиолокации (повышение мощности передатчика и чувствительности приёмника, разработка метода цифровой частотно-линейной модуляции сигнала и др.) удалось получить весьма точное значение астрономической единицы:  $1 \text{ а.е.} = 149597867 \pm \pm 0,9 \text{ км}$ . Результат оказался столь высоким, что сказывалась точность знания скорости света, поскольку в радиолокации непосредственно определяется время распространения импульса, а величина расстояния получается умножением этого времени на скорость света. По этой причине XVI Генеральная ассамблея Международного астрономического союза, анализируя результаты исследований, проведённых в СССР и США, для астрономической единицы приняла значение  $1 \text{ а.е.} = 149597870 \pm 2 \text{ км}$  с оговоркой, что скорость света при этом принята равной  $c = 299792658 \pm 1,2 \text{ км}$ . Столь высокая точность определения астрономической единицы и сегодня обеспечивает успешные полёты космических кораблей для исследований планет и межпланетного пространства Солнечной системы. Более того, такая точность потребовала для правильного описания движения планет Солнечной системы привлечения уравнений общей теории относительности, что и было сделано, в частности, усилиями специалистов Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИМАШ), Института прикладной математики (ИПМ) РАН и ИРЭ РАН.

Помимо определения астрономической единицы методами планетной радиолокации были получены и другие интересные результаты. Остановимся на одном, наиболее важном с нашей точки зрения, связанном с выяснением периода вращения Венеры. Определить этот период оптическими методами было сложно из-за того, что Венера покрыта толстым слоем облаков. Радиолокационные методы открывали такую возможность, поскольку вращение планеты вызывает спектральное расширение сигнала, отражённого её поверхностью. В итоге было выяснено, что период вращения Венеры  $T = 243,04 \text{ сут}$ , что примерно совпало с данными, полученными в США. Международный астрономичес-



В.А. Котельников с сотрудниками Института радиотехники и электроники, участниками радиолокационных исследований Венеры. (Слева направо: А.М. Шаховский, В.А. Котельников, О.Н. Ржига, В.М. Дубровин.)

кий союз принял этот период равным 243,01 сут. Интересно отметить, что в отличие от вращения остальных планет вращение Венеры обратное, т.е. противоположное по отношению к вращению планеты вокруг Солнца. Также интересно заметить, что измеренное значение весьма близко к периоду синодического резонанса, при котором Венера должна была бы быть обращённой одной и той же стороной к Земле в периоды нижнего соединения.

Пополнение опыта по радиолокации планет, накопленного в ИРЭ РАН, было продолжено учениками учеников Владимира Александровича при проведении радиолокации малых тел Солнечной системы. Ввиду их небольших размеров наиболее удобным стал метод бистатической локации, в котором излучение осуществлялось одной антенной, а приём отражённого сигнала — другой. При достаточном удалении антенн друг от друга возможно излучение весьма длительного сигнала и соответствующего когерентного накопления на приёмном конце. Это потребовало международной кооперации. Определённую роль здесь также играли и финансовые соображения. С российской стороны, точнее российско-украинской, использовалась антенна ТНА-2500 (рис. 2), построенная в ЦДКС (г. Евпатория) ещё в советское время, с иностранной — использовались антенны в Эффельсберге (Германия), Голдстоуне (США), Кашиме (Япония) и Медичине (Италия). Были пролоцированы астероиды 4179 Tautatis, 6479 Golevka и 1998 WT24. Анализ принятых сигналов позволил получить ряд сведений о скорости вращения этих объектов, их размерах, рассеивающей способности и т.п. Рисунок 3 демонстрирует возможности спектрального анализа для построения рельефа поверхности астероида WT24. Технология построения рельефа основывается на том, что астероид непрерывно вращается и волны, рассеянные разными точками его поверхности, имеют различный доплеровский сдвиг. Суммарный спектр рассеянного сигнала подобен тем, которые показаны в левой части рис. 3 для двух ортогональных круговых поляризаций при различных ракурсах астероида.

Дальнейшим развитием космической планетной радиолокации стала миссия аппаратов "Венера-15" и "Венера-16", имевших на борту радиолокаторы с синтезированной апертурой. Мы уже говорили, что поверхность Венеры постоянно закрыта облаками и получить её изображение в оптическом диапазоне волн даже с борта искусственного спутника планеты нельзя. Это стало возможным лишь с борта аппарата, опускающегося на поверхность планеты, что и было осуществлено в 1975 г. с помощью космических аппаратов "Венера-9" и "Ве-



Рис. 2. Антенна ТНА-2500.

нера-10". При этом следует учесть, что посадочные аппараты работали при температуре порядка 700 К и

давлении около 100 атм. Но площадь наблюдаемого ими участка поверхности была слишком мала для того, чтобы делать существенные геологические выводы относительно планеты. Для этого необходимы изображения больших территорий, которые можно получить лишь с помощью спутников планеты.

Эта задача и была решена в 1983 г. миссиями "Венера-15" и "Венера-16". Установленные на борту искусственных спутников Венеры радиолокаторы с синтезированной апертурой (рис. 4) позволили с расстояния 1000 км получить радиоизображение поверхности планеты с пространственным разрешением 1 км.

При реализации этого проекта В.А. Котельников выступал неформальным лидером, что сыграло решающую роль, обеспечив, в частности, согласованную работу ИРЭ РАН, ОКБ МЭИ, Научно-производственного объединения им. Лавочкина и ряда других промышленных и академических организаций. Была выполнена съёмка 115 млн км<sup>2</sup> (25 % поверхности планеты) северного полушария Венеры. Пример одного из изображений представлен на рис. 5.

Получение глобальных изображений планеты, полностью закрытой облаками, стало выдающимся научным достижением, внесшим огромный вклад в мировую науку. Анализ этих изображений позволил существенно развить наши представления о сравнительной планетологии.

При реализации этого проекта были сделаны важные шаги в развитии техники обработки радиолокационных изображений. В частности, впервые в Советском Союзе проведена процедура получения цифрового изображения. Накопленный опыт в дальнейшем использовался при создании программного обеспечения для обработки данных радиолокатора с синтезированной апертурой орбитального комплекса "Алмаз", предназначенного для радиокартографирования поверхности Земли с пространственной разрешающей способностью 10 м.

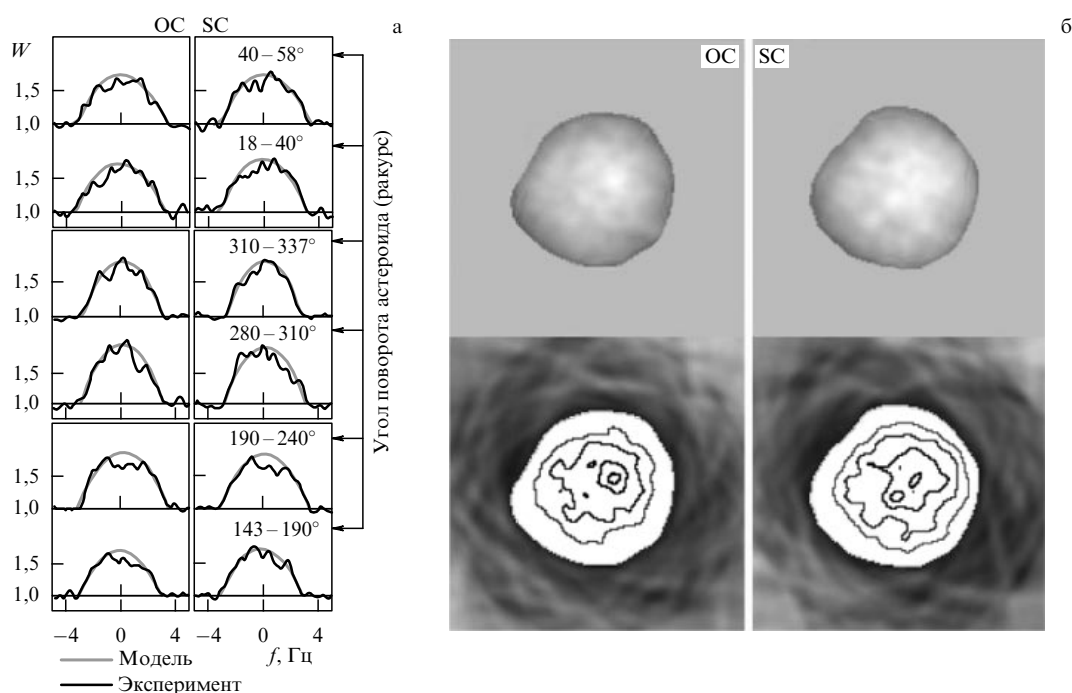


Рис. 3. (а) Сравнение спектров мощности и результатов моделирования шероховатого эллипсоида для различных ракурсов. (б) Радиоизображение астероида WT24 на двух поляризациях.



Рис. 4. Космический аппарат "Венера-15".

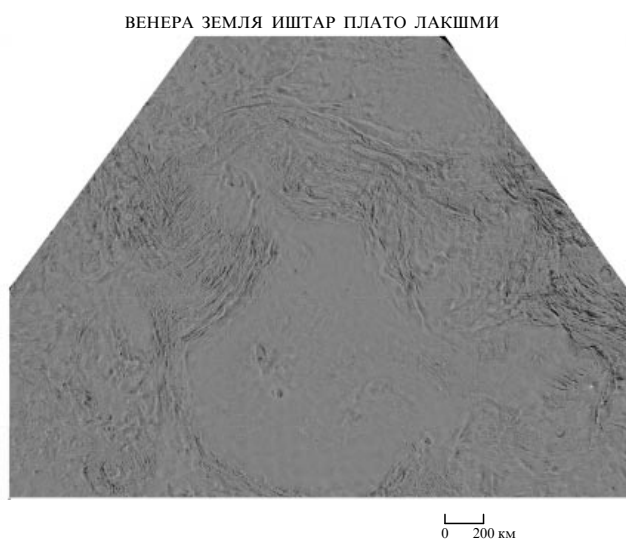


Рис. 5. Фрагмент радиолокационного изображения Венеры.

**Перспективы радиолокационных исследований Солнечной системы.** Радиолокационные исследования планет Солнечной системы, развитые под руководством В.А. Котельникова, получили продолжение в программах ИРЭ РАН, направленных на развитие техники подповерхностного зондирования планет с борта их искусственных спутников. В настоящее время эти исследования ведутся в рамках обработки данных радара MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding), установленного на космическом аппарате "Mars-Express", запущенном Европейским космическим агентством (ЕКА).

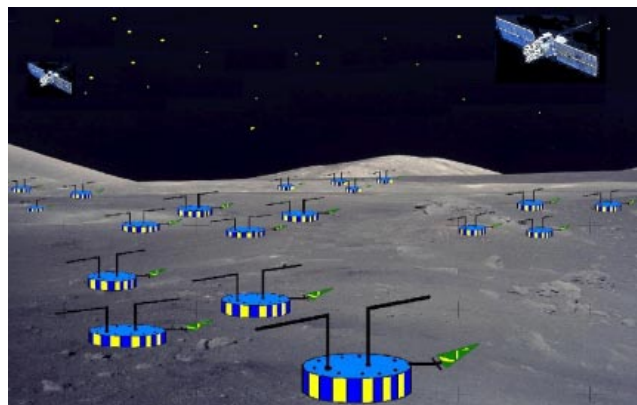


Рис. 6. Низкочастотная радиоастрономия на поверхности Луны.

Ближайшая перспектива — радарные исследования в процессе реализации проекта "Фобос-Грунт". На спускаемом на поверхность Фобоса аппарате планируется установить радар подповерхностного зондирования с несущей частотой 150 МГц и шириной полосы сигнала 50 МГц. Предполагается, что этот аппарат позволит получить данные о подповерхностной структуре Фобоса до глубин не менее 100 м с разрешающей способностью 2 м.

Обсуждаются возможности и подповерхностной радиолокации в исследованиях Луны (рис. 6). Основные задачи:

- изучение подповерхностной слоистой структуры до глубин в несколько километров;
- изучение диэлектрических свойств лунного грунта;
- обнаружение и идентификация крупных вкраплений различных пород;
- локализация мест грунта с повышенной проходимость;
- исследование крупномасштабной шероховатости Луны;
- уточнение топографии поверхности Луны.

Для решения этих задач потребуется многочастотный радиолокатор, окончательный облик которого зависит от формируемой в настоящее время Российской программы исследований Луны.

В более отдалённой перспективе возможно радарное исследование ледового покрова спутника Юпитера Европы (толщина этого покрова оценивается величинами от нескольких километров до 100 км). Если предположить, что этот лёд пресноводный, то он практически прозрачен в широком диапазоне частот радиоволн. Поэтому для выбора частот радиолокатора основными факторами являются диэлектрические свойства ледяного покрова. Так, сильная шероховатость льда не позволяет использовать слишком короткие радиоволны, например дециметровые, из-за их сильного рассеяния. Препятствием для применения дециметровых волн является высокий уровень шумов, генерируемых синхротронным излучением радиационного пояса Юпитера. По-видимому, компромиссом могут стать метровые волны. Каков будет выбор для российской миссии к Европе, покажет будущее. Однако самое сложное в этой миссии — сильная радиоактивность вокруг Юпитера, что предъявляет высокие требования к защите как космической платформы, так и её служебных и научных систем. Это также обуславливает существенное сокращение сроков реализации программы исследований.

### 3. В.А. Котельников и программа "Интеркосмос"

Изучение и освоение космоса и международное сотрудничество неразрывно связаны. Напомним, что первый искусственный спутник Земли (ИСЗ) был запущен в период проведения Международного геофизического года (1957–1958 гг.) — широкой программы изучения Земли, в которой приняли участие научные учреждения 66 стран.

Первый секретарь ЦК КПСС тех лет Никита Сергеевич Хрущев очень быстро, всего через несколько дней после запуска первого ИСЗ, осознал огромный пропагандистский потенциал научных космических исследований, обусловленный скрытой, часто остающейся в подтексте связью военного и мирного космоса.

Было также очевидно, что наука, в том числе и бурно развивающаяся космонавтика, может стать дополнительным к экономике мощнейшим фактором укрепления как идеологических, так и личностных связей народов социалистических стран. Ядерная физика и космос — эти два направления науки казались важнейшими во второй половине XX в. Довольно быстро, без обычной бюрократической волокиты, были созданы Объединённый институт ядерных исследований в Дубне и Совет по международному сотрудничеству в области исследования и использования космического пространства при Академии наук СССР (в обиходе он назывался Совет "Интеркосмос") под председательством вице-президента АН академика Б.Н. Петрова.

Основными направлениями научного сотрудничества в космических исследованиях должны были стать космическая физика, космическая метеорология, физика и техника дальней радиосвязи и телевидения, космическая биология и медицина, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)<sup>1</sup> из космоса. Обсуждались также вопросы совместного создания и запуска спутников, разработки приборов и оборудования для проведения исследований.

Капрелю 1967 г. удалось выработать уже конкретную программу совместных работ, объединившую Болгарию, Венгрию, Вьетнам, ГДР, Кубу, Монголию, Польшу, Румынию, Советский Союз и Чехословакию. Научный потенциал этих стран сильно разнился, и лозунг "Интеркосмоса": "Социализм — стартовая площадка для космических полетов" — можно спустя столько лет вспомнить и иронически, и с определённой ностальгией. Но что было, то было, и приведённые выше слова в значительной мере справедливы — именно в эти годы, в странах, включившихся в программу "Интеркосмос", был заложен фундамент их космической индустрии.

Сразу подчеркнём, что всю советскую, по тем временам новейшую уникальную технику: космические аппараты; ракеты-носители; космодромы и наземный измерительный комплекс; средства и оборудование, обеспечивающие подготовку, запуск и управление полётом спутников, — Советский Союз безвозмездно предоставил в распоряжение стран-участниц программы. Другая особенность программы "Интеркосмос" состояла в том, что каждая страна предлагала свою программу исследований, а также участвовала в заинтересовавших её экспериментах партнёров, в разработке научной аппаратуры, а часто и служебных систем, устанавливаемых на спутниках, а результаты совместных достижений становились общим достоянием.



Рис. 7. Динамика запуска космических объектов по программе "Интеркосмос".

На ежегодно проводимых совещаниях руководителей национальных координационных органов принимались принципиальные решения и рекомендации по разнообразным практическим вопросам, а также перспективам развития сотрудничества в тех или иных направлениях. В 1980 г. руководителем советского национального координационного органа — председателем Совета "Интеркосмос" — стал выдающийся советский учёный и организатор науки В.А. Котельников. Под его руководством программа достигла своей зрелости: в 1980-е годы были осуществлены наиболее научно-значимые исследования (рис. 7).

Первым же шагом в выполнении программы "Интеркосмос" стала реализация комплексного эксперимента по изучению верхней атмосферы Земли и природы полярных сияний с помощью запущенного в декабре 1968 г. спутника "Космос-261".

В подготовке к проведению комплексного эксперимента приняли активное участие научно-исследовательские институты и геофизические обсерватории стран, включившихся в программу "Интеркосмос". Были организованы синхронные со спутниковыми наземные измерения характеристик атмосферы и тропосферы; данные бортовых и наземных наблюдений подвергались совместному анализу. При этом получен ряд новых научных результатов. В частности, обнаружена диффузия авроральной зоны к экватору от овала дискретных полярных сияний.

Одновременно разрабатывались спутники для реализации последующих этапов программы. В технической документации конструкторского бюро "Южное" в г. Днепропетровске этим космическим аппаратам были присвоены названия "Интеркосмос-1", "Интеркосмос-2" и т.д. И хотя "Космос-261" (кстати, первая практическая работа плазмофизиков созданного незадолго до этого Института космических исследований АН СССР) официально открыл программу "Интеркосмос", его название решили не менять, чтобы не создавать путаницы в чертежах и документации.

14 октября 1969 г. с испытательного полигона Капустин Яр (в двух с небольшим десятках километров от Волгограда) в присутствии учёных девяти стран-участниц программы ракета-носитель "Космос-1" (конверсионный вариант баллистической ракеты Р-12) вывела на орбиту космический аппарат Д-УЗ-ИК-1, получивший в печати наименование "Интеркосмос-1".

В последующие годы в рамках программы было запущено ещё 24 спутника "Интеркосмос", 11 высотных

<sup>1</sup> ДЗЗ добавлено в программу в 1973 г.

ракет "Вертикаль" и несколько сотен метеорологических ракет различных модификаций. В целом же с учётом научных и социально-экономических космических аппаратов (биоспутники, "Метеор", "Метеор-Природа", "Молния" и др.), автоматических межпланетных станций (АМС) "Луна", "Венера", "Вега" и др., пилотируемых кораблей "Союз" и орбитальных станций (серий "Салют", "Мир") хорошо развитая ракетно-космическая инфраструктура СССР при привлечении научно-технического потенциала стран-участниц программы в период с 1967 г. по начало 1990-х годов позволила осуществить запуск в космос порядка 100 космических объектов различного назначения (без учёта метеорокетов и высотных баллонов).

Большинство спутников "Интеркосмос" (22 из 25) были созданы в КБ "Южное" под руководством В.М. Ковтуненко. Для того чтобы в сжатые сроки разработать и организовать производство большого количества космических аппаратов различного назначения, требовались нестандартные решения. Самым приемлемым оказался принцип унификации базовой платформы — использование единого корпуса, стандартного набора служебных систем, общей схемы управления бортовой аппаратурой, единой системы энергоснабжения. Впервые в мировой практике было, по сути, организовано серийное производство спутников. Унификация позволила не только сократить сроки создания космических аппаратов, но и значительно снизить их себестоимость.

Начиная с "Интеркосмоса-15" стала применяться более сложная и тяжёлая платформа — автоматическая унифицированная орбитальная станция (АУОС). Для её выведения на орбиту использовалась и более мощная ракета-носитель — конверсионный вариант баллистической ракеты Р-14. В полёте "Интеркосмоса-15" были испытаны и новые бортовые системы, в том числе созданная совместно специалистами ВНР, ГДР, ПНР, СССР и ЧССР единая телеметрическая система (ЕТМС), позволившая принимать научную информацию с борта спутников наземными пунктами, расположенными на территории стран, участвующих в совместных исследованиях. ЕТМС устанавливалась также на последующих аппаратах: "Интеркосмос-18" и "Интеркосмос-19".

По назначению и направленности программ научных исследований спутники серии "Интеркосмос" можно условно разделить на несколько видов:

солнечные — "Интеркосмос-1" (1969 г.), "Интеркосмос-4" (1970 г.), "Интеркосмос-7" (1972 г.), "Интеркосмос-9", ("Коперник-500") (1973 г.), "Интеркосмос-11" (1974 г.), "Интеркосмос-16" (1976 г.), предназначавшиеся для исследований ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, спорадического солнечного радиоизлучения;

ионосферные — "Интеркосмос-2" (1968 г.), "Интеркосмос-8" (1972 г.), "Интеркосмос-12" (1974 г.), "Интеркосмос-19" (1979 г.), "Интеркосмос-22" ("Болгария-1300") (1981 г.);

магнитосферные — "Интеркосмос-3" (1970 г.), "Интеркосмос-5" (1971 г.), "Интеркосмос-6" (1972 г.), "Интеркосмос-10" (1973 г.), "Интеркосмос-13" (1975 г.), "Интеркосмос-14" (1975 г.), "Интеркосмос-17" (1977 г.), "Интеркосмос-18" (1978 г.), предназначавшиеся для изучения процессов в верхней атмосфере Земли, низкочастотных электромагнитных излучений, динамики радиационных поясов Земли, космического излучения сверхвысоких энергий, а также электромагнитной связи магнитосферы с ионосферой. "Интеркосмос-6" имел



Рис. 8. Космический аппарат "Интеркосмос-20".

возвращаемый на Землю отсек с научной аппаратурой.

От "Интеркосмоса-18" был отделён чехословацкий малый спутник "Магион". Целью совместного полёта двух аппаратов стали исследования пространственной структуры низкочастотных электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве. Одновременно со спутниковыми измерениями выполнялись согласованные наблюдения на наземных ионосферных и солнечных обсерваториях стран-участниц программы.

На "Интеркосмосе-20" и "Интеркосмосе-21" (рис. 8) были начаты испытания экспериментальной системы сбора информации с наземных и морских измерительных пунктов (буёв) и передачи её через Центральную станцию приёма потребителям. На этих спутниках впервые был установлен и многозональный спектрофотометр МКС, в котором органично соединились научные методы, разработанные учеными СССР, и технические средства, созданные специалистами ГДР. Усовершенствованный вариант прибора работал в дальнейшем на борту пилотируемой орбитальной станции "Салют-7".

"Интеркосмос-22", посвященный 1300-летию образования болгарского государства, был подготовлен болгарскими и советскими специалистами. В комплекс научной аппаратуры входили многоканальный оптический электрофотометр, анализатор высокоэнергетических ионов и электронов, измеритель дрейфа ионов, ультрафиолетовый фотометр, приборы для измерения температуры и концентрации электронов, измеритель параметров ионного компонента плазмы, счётчик протонов, сверхвысокочастотный радиометр на волне 4 см и ряд других приборов. В качестве базовой платформы для спутника был использован космический аппарат (КА) "Метеор-2".

В апреле 1985 г. был запущен "Интеркосмос-23", получивший название "Интершок", который, как и "Интеркосмосы-1, -4, -7, -9, -11, -16", был предназначен для изучения солнечно-земных связей. В данном случае исследования выполнялись на новой основе — с борта автоматической станции "Прогноз" (рис. 9). Орбита этой станции вытянута навстречу Солнцу и достигает в апогее нескольких сотен тысяч километров. Это позволяет в течение большей части периода обращения проводить исследования в областях, расположенных вне воздействия магнитного поля Земли. Целью запуска было проведение исследований структуры межпланетных и



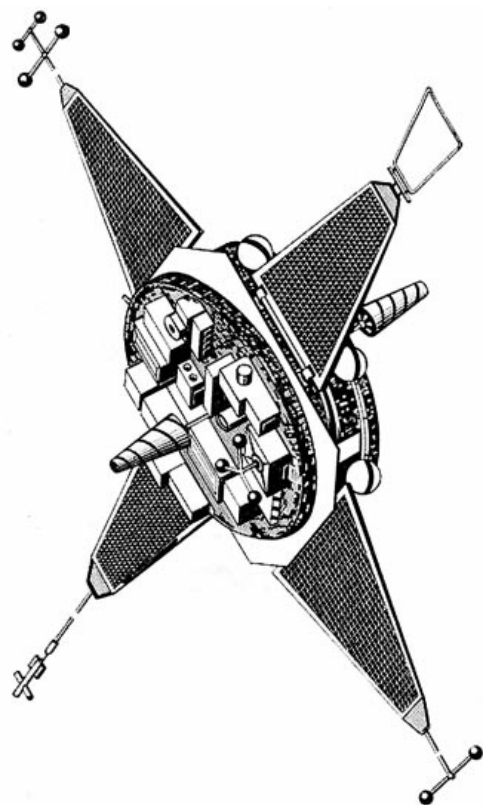


Рис. 9. Станция "Прогноз" — базовая платформа.

околоземных ударных волн, возникающих при взаимодействии плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли. Такие ударные волны имеют необычную структуру, так как столкновения частиц (обеспечивающие торможение сверхзвуковых потоков в обычном газе) в очень разреженной космической плазме практически отсутствуют и необходимая диссипация обеспечивается коллективными волновыми процессами. На борту станции стояла аппаратура, созданная учеными СССР и ЧССР. Другая особенность "Интеркосмоса-23" ("Прогноза-10") (рис. 10) — разнообразная быстродействующая диагностическая аппаратура, в том числе многоканальный плазменный спектрометр и комплекс приборов для измерения плазменных волн, а также наличие бортовой вычислительной машины, обеспечивающей управление экспериментом и автоматическое определение момента пересечения фронта ударной волны, что позволяло реализовать быстрый режим записи именно вблизи фронта. Имелась также кольцевая память для сохранения предыстории этого события.

Комплексный подход к проведению исследований, измерение всех необходимых и, в первую очередь ключевых, характеристик изучаемых процессов, возможность в процессе работы "обучения" бортового научного комплекса, гибкость в построении программы измерений и высокое временное разрешение при их проведении вблизи ударной волны позволили изучить внутреннюю структуру фронта волны и идентифицировать физические процессы, ответственные за формирование этой структуры, разогрев и ускорение частиц. Один из важных результатов выполненных исследований — получение более полных данных о возможности термализации ионов на фронте сверхкритических ударных волн за счёт неустойчивости их фронта.

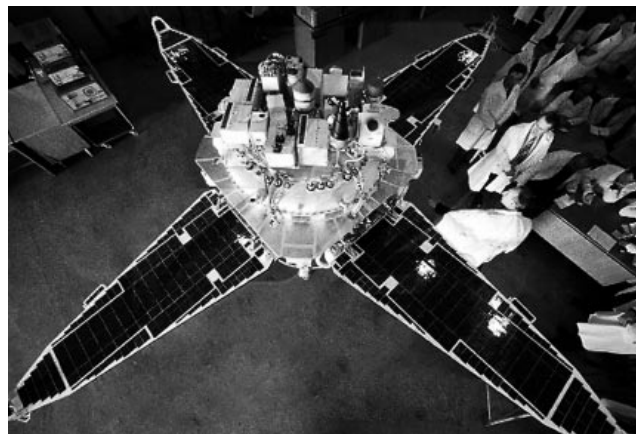


Рис. 10. "Интеркосмос-23" ("Прогноз-10").

Стоит вспомнить, что В.А. Котельников лично интересовался результатами выполняемых на "Интеркосмосе-23" экспериментов и активно поддерживал реализацию этой комплексной программы исследования бесстолкновительных ударных волн на всех её этапах.

Запущенный в сентябре 1989 г. "Интеркосмос-24" стал одним из первых "перестроечных" научных космических аппаратов. Его отличительной чертой, по сравнению с другими спутниками этой серии, стал приём бортовой научной информации не только в странах-членах организации "Интеркосмос", но и в США, Бразилии, Канаде, Финляндии, Японии и Новой Зеландии.

Целью запуска были комплексные исследования распространения электромагнитных волн в диапазоне особо низких частот (ОНЧ) в магнитосфере Земли и их взаимодействия с энергичными заряженными частицами радиационных поясов. Планировалось также проведение активного эксперимента по комплексному изучению распространения волн ОНЧ-диапазона в земной магнитосфере и процессов в магнитосферной плазме. Отсюда и название проекта — "Активный".

"Интеркосмос-24" должен был значительно расширить имевшуюся на тот момент информацию о плазменной оболочке Земли, расположенной на высотах от 100 до 500000 км, и о её взаимодействии с земной магнитосферой. Учёные рассчитывали оценить, как на околоземной плазме сказываются многочисленные процессы: возмущение магнитных бурь, влияющих на самочувствие человека, высыпание частиц полярных сияний; воздействие множества радиопередатчиков, создающих вокруг планеты ореол радиоизлучений, разряды молний.

Для более точного и детального исследования волновых процессов в паре с "Интеркосмосом-24" должен был работать созданный в ЧССР субспутник "Магион-2". Научную аппаратуру для обоих аппаратов разработали в Советском Союзе, Венгрии, Болгарии, Чехословакии, ГДР, Польше и Румынии. Планировалось, что субспутник в течение нескольких месяцев после отделения от основного аппарата будет совершать полёт в непосредственной близости от него (на расстоянии от нескольких метров до 10 км). К сожалению, из-за неполадок двигательной установки и ОНЧ-генератора выполнить всю программу не удалось.

Вскоре после запуска в 1989 г. "Интеркосмоса-24" было объявлено о намерении продолжить активные исследования плазменной оболочки Земли и с этой целью реализовать в первой половине 1990-х годов проект "Активный-2". В 1990 г. этот проект был офици-

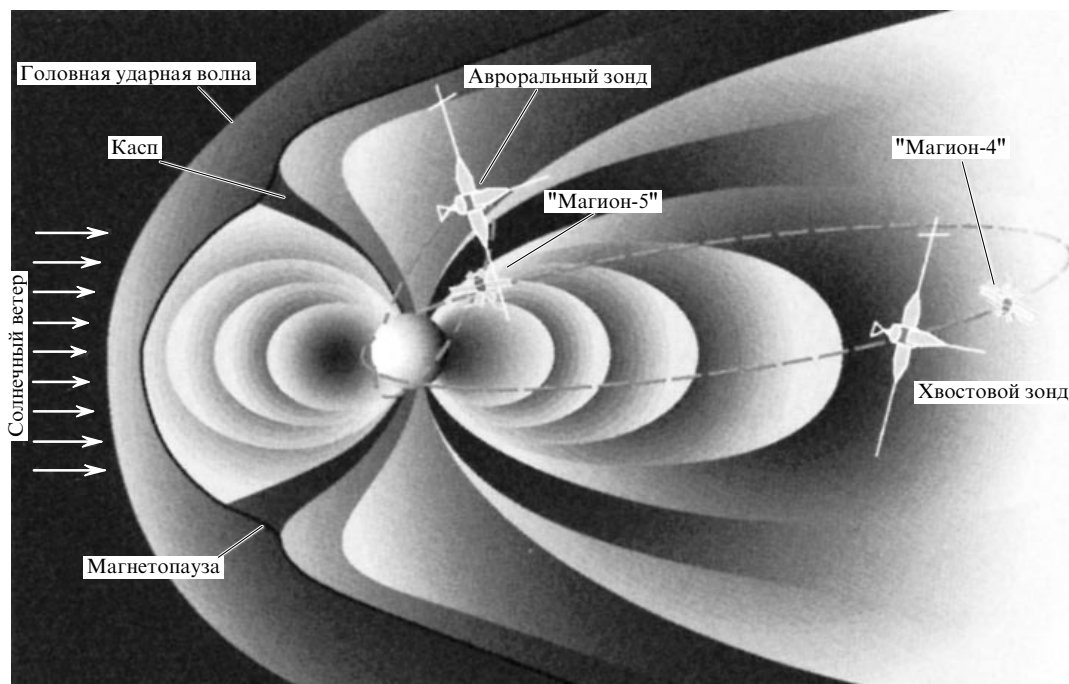


Рис. 11. Проект "Интербол".

ально переименован в АПЭКС (Активно-плазменный эксперимент). Целью проекта являлось исследование воздействия модулированных электронных и плазменных пучков на ионосферу и магнитосферу Земли. В ходе эксперимента планировалось изучить электрические поля и токи, посредством которых происходит взаимодействие ионосферы и магнитосферы, а также потоки заряженных частиц вдоль силовых линий геомагнитного поля. Исследования должны были выполняться с борта спутника "Интеркосмос-25", часть научных приборов которого стала повторением или модернизацией аналогичной аппаратуры "Интеркосмоса-24".

Запуск состоялся в декабре 1991 г. Через 10 дней от базового аппарата отделился микроспутник "Магион-3", разработанный специалистами Чехии–Словакии. Его научная аппаратура позволяла проводить измерения практически того же набора физических величин, что и на основном аппарате. Субспутник на этот раз не имел корректирующего двигателя, и его удержание на расстоянии от десяти до ста метров обеспечивалось двигательной установкой основного аппарата.

Исследования на "Интеркосмосе-25" были достаточно успешными. Все научные приборы работали нормально. Удалось провести серию активных экспериментов по излучению пучков плазмы и электронов и их регистрации на субспутнике.

В 1990-е годы, уже после распада СССР, организационная структура совета "Интеркосмос" была де-юре расформирована. Прекратили существование СЭВ, Варшавский договор. В большинстве стран, входивших в программу "Интеркосмос", изменился экономический и политический строй, но научные и личные связи учёных сохранились.

Одна из заслуг программы "Интеркосмос" — возросшая с каждым годом интернационализация советской космонавтики. Так, в реализованном в 1984 г. проекте "Вега" (Венера–Галлей), помимо стран, постоянно участвующих в программе "Интеркосмос", в

создании комплекса научной аппаратуры, установленной на борту советских АМС "Вега-1" и "Вега-2", приняли участие научные учреждения и учёные Австрии, Германии и Франции.

Программа полёта станции была направлена, в первой своей части, на исследование атмосферы и поверхности планеты Венера, для чего впервые были использованы аэростатные зонды. В ходе осуществления второй части программы станции вышли на траекторию сближения с кометой Галлея и после 450 дней полёта, в марте 1986 г., прошли около ядра кометы на расстоянии порядка 10000 км. В выполненных при этом экспериментах удалось определить размер и форму ядра, свойства поверхности, температуру, состав газа, пылевых частиц и другие параметры кометы. Были также получены и переданы на Землю её телевизионные изображения.

Ещё более широкая международная кооперация сложилась при подготовке планетных проектов "Фобос" и "Марс-96", астрофизических проектов "Квант" и серии "Спектр".

Фактически продолжением программы "Интеркосмос" стала реализация в середине 1990-х годов крупнейшего международного проекта "Интербол" (рис. 11), в котором приняли участие 14 стран. Проект стал частью широкой международной программы, координируемой Международным консультативным агентством космических наук (Inter-Agency Consultative Group — IACG), состоящим из представителей ЕКА, НАСА, Российского космического агентства и Японского института аэронавтики и космических наук.

Многоспутниковый проект "Интербол" стал одной из самых успешных миссий по изучению физических процессов в околоземном космическом пространстве за всю историю исследований солнечно-земных связей в Советском Союзе и России. В рамках проекта удалось создать и реализовать систему из двух пар спутников: основного — "Интербол-1" — с субспутником "Магион-4", а также

"Интербол-2" с субспутником "Магион-5". Это позволило провести одновременно наблюдения в различных областях земной магнитосферы и разделить пространственные и временные вариации измеряемых параметров.

В результате выполнения проекта "Интербол" был собран уникальный по своему значению, объёму и качеству экспериментальный материал, что стало возможным, в первую очередь, благодаря значительному, во много раз по сравнению с предыдущими исследованиями на спутниках серии "Прогноз", увеличению объёма передаваемой с борта КА научной информации и осуществлению одновременных многоспутниковых наблюдений как на близких расстояниях, так и в разнесённых на значительные расстояния областях магнитосферы Земли. Время работы спутниковой системы в несколько раз превысило её гарантийные сроки. Всё это предопределило и высокий уровень научных итогов проекта. По результатам выполненных исследований опубликовано более 500 работ, разнообразных по тематике и подходам к анализу результатов измерений.

В ходе реализации проекта были также получены важные сведения по долговременному влиянию различных факторов космоса на системы спутников и функционирование их технических устройств, что позволило выработать соответствующие рекомендации для разработчиков космической техники.

Сегодня готовится ряд новых крупных международных космических проектов. Импульс, данный программой "Интеркосмос" и лично В.А. Котельниковым, позволил пережить безвременье 1990-х годов и несмотря на политические предряды сохранить и продолжить на новом, более высоком уровне сотрудничество в научных исследованиях космоса с партнёрами и коллегами из Восточной и Западной Европы. Восстановлено полноценное сотрудничество в научном космосе с Польшей, Болгарией, Францией. Готовится договор с Чехией.

Опыт "Интеркосмоса" оказался очень важен и при выстраивании сотрудничества в космосе со странами СНГ.

Авторы благодарят Ю.И. Зайцева и В.С. Корниленко за помощь в подготовке текста доклада к печати.

PACS numbers: 01.65.+g, 02.70.-c, 89.70.-a  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902j.0216

## Развитие теоремы отсчётов Котельникова

Н.А. Кузнецов, И.Н. Сеницын

### 1. Введение

С именем академика В.А. Котельникова связана целая эпоха развития связи, радиотехники и радиофизики. К его крупнейшим научным достижениям, оказавшим существенное влияние на развитие мировой науки, следует отнести *открытие теоремы отсчётов* [1], носящей его имя, создание теории потенциальной помехоустойчивости, давшей учёным и инженерам инструмент для синтеза оптимальных систем обработки сигналов в системах связи, радиолокации, радионавигации и других системах, а также разработку планетарных радиолокаторов и проведение с их помощью фундаментальных астрономических исследований.

В 1932 г. В.А. Котельников подготовил для научной конференции доклад "О пропускной способности эфира и проволоки". В докладе им впервые была сформулирована знаменитая теорема отсчётов — одна из основных теорем теории связи. Этот доклад был опубликован ограниченным тиражом в 1933 г.

Рассмотрим современное развитие теоремы отсчётов, её связь с фильтрацией непрерывных сигналов по дискретным наблюдениям, а также информационные аспекты компьютерного эксперимента при цифровой обработке сложных сигналов.

### 2. Теорема отсчётов Котельникова

**Теорема отсчётов во временной области.** Непрерывный сигнал  $x(t)$ , имеющий спектр, ограниченный максимальной частотой  $F_m$ , может быть однозначно и без потерь восстановлен по своим дискретным отсчётам с частотой  $F_{\text{дискр}} \geq F_m$ . Алгоритм интерполяции этой функции по дискретным отсчетам с интервалом  $\Delta t_m$ :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta t_m) \frac{\sin[\omega_m(t - k\Delta t_m)]}{\omega_m(t - k\Delta t_m)}, \quad (1)$$

где  $\omega_m = 2\pi F_m$  — частота Котельникова. Интервал дискретизации  $\Delta t_m = 1/(2F_m)$  часто называют интервалом Котельникова.

**Теорема отсчётов в частотной области.** Для сигнала  $x(t)$ , ограниченного на  $|t| < T$ , для непрерывного спектра  $s_x(f)$ :

$$s_x(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_x(2\pi k\Delta f) \frac{\sin 2\pi T(f - k\Delta f)}{2\pi T(f - k\Delta f)}, \quad (2)$$

где  $\Delta f$  — шаг отсчёта частоты.

Независимо теорема отсчётов была установлена в 1949 г. выдающимся американским ученым К. Шенноном — создателем важного раздела теории связи — теории информации. Эта теорема имеет исключительное значение для техники связи. Следует отметить, что как один из частных математических результатов теории интерполяции функции эта теорема была открыта ещё в начале XX в. английскими математиками Е.Т. Уиттекером и Дж.М. Уиттекером. Однако это крупнейшее научное достижение по праву связывают с именами Котельникова и Шеннона, так как именно благодаря открытию ими теоремы отсчётов инженеры получили возможность создания цифровых систем, которые в конце XX в. произвели революцию в электросвязи и цифровой обработке сигналов.

### 3. Применение теоремы Котельникова

В.А. Котельников установил теорему отсчётов, пытаясь найти ответ на принципиальный вопрос: какова минимальная полоса частот, необходимая для передачи по каналу связи сообщения, спектр которого строго ограничен? Сегодня общепризнано, что эта теорема — один из фундаментальных результатов цифровой обработки сигналов (ЦОС) в теории связи.

Область применения теоремы чрезвычайно широка. В качестве примера приведем дискретные каналы связи и устройства цифровой записи информации, предназначенные для передачи и записи звуковых сигналов. В соответствии с теоремой Котельникова были выбраны следующие частоты дискретизации:

- 8000 Гц — для телефона;
- 22050 Гц — для радио;
- 44100 Гц — для аудио-компакт-диска.



О широком применении этих устройств говорит тот факт, что в 2003 г. по данным американской ассоциации записывающей промышленности RIAA (Recording Industry Association of America) было продано 749,9 млн компакт-дисков.

#### 4. Обобщения теоремы В.А. Котельникова

Практика проектирования и эксплуатации цифровых устройств записи, передачи и воспроизведения непрерывных сигналов поставила перед исследователями новые задачи по разработке таких алгоритмов ЦОС, как оценивание и моделирование. В первую очередь следует отметить, что теорема Котельникова решает задачу только интерполяции функции при наблюдении отсчётов функции на бесконечном интервале времени,  $-\infty < t < +\infty$ . В практических задачах всегда имеют дело с *конечным интервалом наблюдения*, и необходимо решать не только задачи интерполяции функций на конечном интервале, но и задачи фильтрации, т.е. оценивания значения функции в момент времени по наблюдениям на интервале от 0 до  $t$ , а также задачи экстраполяции (прогнозирования) значений функции в момент времени  $T > t$  по наблюдениям на интервале от 0 до  $t$ . Поэтому встал вопрос о разработке алгоритмов восстановления значений функции в промежутке между дискретными отсчётами, в момент  $t$ , который лежит в интервале между  $t_i$  и  $t_{i+1}$ , т.е. о замене бесконечного ряда (1) конечным рядом. Для практических реализаций были предложены экстраполяторы разной сложности, в основном в виде степенного ряда, полинома Лагранжа, сплайнов, атомарных функций и т.д. [2].

Результаты В.А. Котельникова породили целый ряд исследований, направленных на устранение следующих ограничений, принятых при доказательстве теоремы Котельникова [3–7]:

- 1) фиксированный нулевой начальный отсчёт;
- 2) неограниченность спектра реальных стохастических сигналов;
- 3) сложность расчётов при восстановлении функции членами рядов (1) и (2);
- 4) неравномерность отсчётов;
- 5) сгруппированность отсчётов;
- 6) невозможность определения статистических характеристик погрешностей при дискретизации;
- 7) невозможность учёта погрешностей измерения функции в точках отсчёта  $t_i$ ;
- 8) невозможность учёта погрешностей, вызванных ограниченной разрядностью, при цифровой реализации рядов (1) и (2) и др.

#### 5. Фильтрация и моделирование непрерывных процессов по дискретным наблюдениям и теорема В.А. Котельникова

Как известно [8], принципиально новые возможности в создании алгоритмов фильтрации непрерывного сигнала по дискретным измерениям появились после работ Р. Калмана, в которых полезный сигнал был представлен в виде решения линейного стохастического дифференциального уравнения. Представим себе некоторую систему, состояние которой в любой момент времени однозначно определяется некоторым набором фазовых переменных (выходные координаты и их производные), недоступных для непосредственного измерения. Кроме того, имеется ряд переменных, некоторым образом связанных с состоянием системы, которые можно измерить в некоторые дискретные моменты времени с заданной точностью. В работах Р. Калмана были рассмотрены случаи фильтрации координат в условиях, когда полез-

ный сигнал описывается непрерывными стохастическими дифференциальными уравнениями и наблюдения являются непрерывными, и в условиях, когда полезный сигнал описывается рекуррентной случайной последовательностью (дискретным аналогом стохастического дифференциального уравнения) и наблюдения происходят в дискретные моменты времени. В [9] поставлены и решены задачи управления наблюдениями.

При компьютерной реализации фильтра Калмана существенными оказываются два следующих обстоятельства.

1. Матричный коэффициент усиления фильтра находится путём решения дискретного нелинейного уравнения Риккати, причём матрица условных ковариаций ошибки фильтрации "рассимметризуется" вследствие ограниченности разрядности цифровых вычислительных машин (ЦВМ).

2. При моделировании реальных процессов на ЦВМ модели с непрерывными пространствами состояний заменяются моделями с дискретными пространствами состояний, что вносит дополнительные искажения в результаты. Причина такого усложнения заключается в том, что любая процедура дискретизации по самой своей природе — это сильно нелинейное (более того, разрывное) отображение, вносящее существенные искажения в преобразуемый сигнал. *Влияние такого рода искажений на качественном уровне также объясняется теоремой Котельникова*, однако количественный учёт такого влияния сопряжён с существенными техническими и фундаментальными теоретическими трудностями. Следует отметить, что, к сожалению, в литературе этому феномену не уделяется должного внимания, поэтому рассмотрим данную проблему несколько подробнее.

#### 6. Два фундаментальных вопроса компьютерного эксперимента

**Первый.** Основная задача компьютерного эксперимента в конечном счёте заключается в получении информации о моделируемом объекте. Но если это так, то следует иметь в виду, что в то время как от одной непрерывной модели к другой часто можно перейти без потери информации (гомеоморфные замены переменных и т.п.), *переход от непрерывного объекта к дискретной модели, как правило, не возможен без потери информации*. Простой пример: дискретизация обратимой линейной системы на равномерную решётку, как правило, оказывается необратимым отображением. Другой пример: основная информационная характеристика динамической системы — её энтропия — измеряет экспоненциальную скорость возрастания отношения количества различных траекторий системы к их длине. Но в любой однозначной пространственной дискретизации системы возможно лишь ограниченное число бесконечных траекторий, и определение энтропии в этом случае становится бессмысленным. Здесь противоречие между непрерывным объектом и его дискретной моделью очевидно; очевидна и необходимость развития методов оценки энтропии непрерывной системы по её дискретизациям. Отметим, что хотя различные методы решения этой проблемы уже существуют, в целом поставленная задача оказывается весьма трудной. В других ситуациях конфликт может быть менее очевидным, но не менее опасным. Следовательно, первый фундаментальный вопрос каждого компьютерного эксперимента: *какова потеря информации при выбранной схеме перехода от непрерывного объекта к дискретному?*

**Второй.** Вопрос связан с аналогами понятий грубости и структурной устойчивости в непрерывной математике. При непрерывном моделировании, если отбросить словесное оформление, это, по существу, вопрос о том, насколько устойчивы те или иные свойства объекта по отношению к непрерывным, гладким и т.п. (но обязательно малым в каком-то непрерывном смысле) возмущениям. Но если мы принимаем, что при компьютерном моделировании основным является вопрос об информации, то мы должны поставить и следующий вопрос: *можем ли мы гарантировать информационную грубость выбранной схемы перехода от непрерывного объекта к дискретному?*

Вероятно, всесторонний анализ этих вопросов явится в ближайшие десятилетия одним из стратегических направлений в развитии точных наук. Дать цельное описание ситуации в этой области и тем более прогноз её развития — задача безнадёжная. Некоторые первые достижения в этой области получены в [10–12].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 06-01-00256 и 07-07-00031).

## Список литературы

1. Котельников В. А. "О пропускной способности "эфира" и проволок в электросвязи", в сб. *Всесоюзный энергетический комитет. Материалы к I Всесоюз. съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности* (М.: Управление связи РККА, 1933) с. 1; переиздание: *О пропускной способности "эфира" и проволок в электросвязи* (М.: Институт радиотехники и электроники МЭИ (ТУ), 2003); *УФН* 176 762 (2006) [Kotel'nikov V. A. *Phys. Usp.* 49 736 (2006)]
2. Кравченко В. Ф., Рвачев В. Л. *Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях* (М.: Физматлит, 2006)
3. Whittaker E. T. "On the functions which are represented by the expansion of interpolating theory" *Proc. R. Edinburgh* (35) 181 (1915)
4. Balakrishnan A. V. "A note of the sampling principle for continuous signals" *IEEE Trans. Inform. Theory* 3 143 (1957)
5. Беляев Ю. К. "Аналитические случайные процессы" *Теория вероятностей и ее применения* (4) 402 (1959)
6. Beutler F. J. "Sampling theorems and basis in a Hilbert space" *Inform. Control* (4) 97 (1961)
7. Jerri A. J. "The Shannon sampling theorem — its various extensions and applications: a tutorial review" *Proc. IEEE* (65) 1565 (1977)
8. Синицын И. Н. *Фильтры Калмана и Пугачева* (М.: Логос, 1-е изд. — 2005, 2-е изд. — 2007)
9. Григорьев Ф. Н., Кузнецов Н. А., Серебровский А. П. *Управление наблюдениями в автоматических системах* (М.: Наука, 1986)
10. Козьякин В. С., Кузнецов Н. А. "Достоверность компьютерного моделирования с точки зрения теории информации" *Информационные процессы* 7 323 (2007); <http://www.jip.ru/2007/323-368-2007.pdf>
11. Vladimirov I. "Quantized linear systems on integer lattices: Frequency-based approach. Part I", CADSEM Report 96-032 (Geelong, Australia: Deakin Univ., 1996)
12. Diamond P., Vladimirov I. "Higher-order terms in asymptotic expansion for information loss in quantized random processes" *Circuits, Systems, Signal Process.* 20 677 (2001)

PACS numbers: 43.30.+m, 43.58.+z, 91.50.Ga  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902k.0218

## Дистанционное зондирование морского дна гидролокационными системами со сложными сигналами

В.И. Каевицер, В.М. Разманов

### 1. Введение

В докладе рассматриваются вопросы применения сложных зондирующих сигналов с линейной частотной моду-

ляцией (ЛЧМ) в акустических гидролокационных системах исследования морского дна, в том числе, с использованием многоэлементных антенн. Проведён обзор теоретических и практических результатов, полученных авторами в последние годы при разработке, испытаниях и реальном применении в различных условиях следующих гидроакустических систем: акустического низкочастотного линейного профилографа, обзорных и интерферометрических гидролокаторов бокового обзора (ГБО), многолучевого эхолота.

Радиолокационные исследования планет, проводимые под руководством В.А. Котельникова с конца 1950-х годов, привели к созданию в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР (ныне РАН) нового направления работ — дистанционного картирования протяжённых объектов с помощью высокоэнергетических сложных зондирующих сигналов и цифровых методов когерентной обработки эхо-сигналов. Цифровые методы синтеза сигналов, регистрации и обработки, используемые при локации планет, в конце 1970-х годов с успехом были применены для создания нового поколения гидролокационных систем площадного картирования морского дна.

Сейчас акустические гидролокационные системы когерентного зондирования стали основным инструментом дистанционных измерений рельефа морского дна и структуры донных отложений. Для одновременных измерений рельефа и получения акустических изображений донной поверхности к настоящему времени сформировались два основных, в некоторой степени конкурирующих, класса систем — это интерферометрические ГБО и многолучевые эхолоты [1]. Если в состав обзорного ГБО обычно входит одна антенна на борт, а в составе интерферометрического ГБО содержатся две или три антенны, то многолучевые эхолоты представляют собой более сложный комплекс, состоящий из значительно большего числа приёмных элементов, порядка 100 и выше. Для изучения подповерхностной структуры морского дна используются низкочастотные акустические профилографы. Это, как правило, одноканальные системы, обеспечивающие непрерывное профилирование грунта вдоль трассы движения судна. При проведении исследований в состав комплексов включается спутниковая система навигации GPS (Global Positioning System)/DGPS (Differential Global Positioning System), измерители скорости звука в воде, а также датчики крена, дифферента и вертикальных перемещений судна. Для сложных многоэлементных систем оправданным является также применение стабилизирующих систем для уменьшения влияния качки.

Эффективность использования когерентных акустических локационных систем определяется типом зондирующих сигналов. Для работы на небольших глубинах (до  $\approx 100$  м) в системах ГБО и многолучевых эхолотах используются тональные зондирующие импульсы с несущей частотой до 500 кГц, что связано с простотой их формирования и обработки. При глубоководных исследованиях в современных системах применяются зондирующие сигналы с линейной частотной модуляцией, сочетающие высокий энергетический потенциал с высоким временным разрешением.

### 2. Схема бокового обзора

Локационные методы бокового обзора основаны на последовательном формировании данных о морском дне при движении судна (рис. 1). Импульс, излучённый передающей антенной, последовательно отражается от

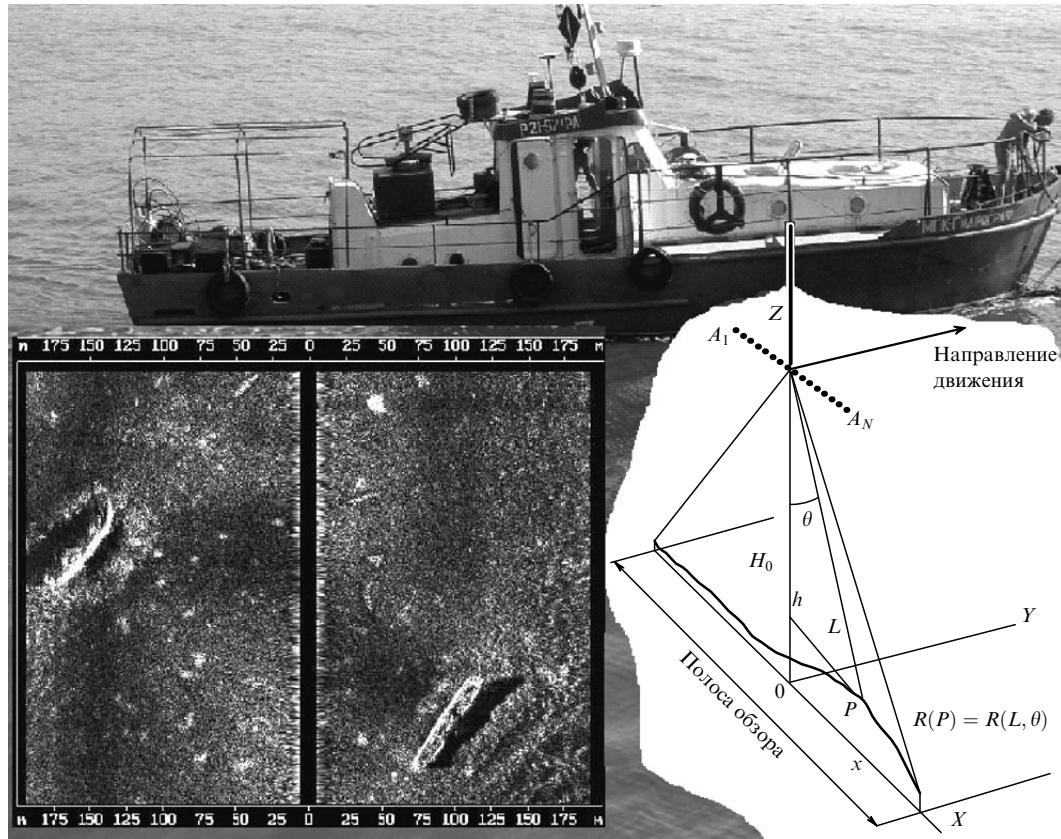


Рис. 1. Геометрия бокового обзора и фрагмент получаемого акустического изображения дна с затонувшими судами.

отдельных элементов дна на разной дальности. Отражённые эхо-сигналы принимаются одной или несколькими приёмными антеннами. Цикл, состоящий из передачи и приёма, образует одну реализацию (одну горизонтальную строку акустического изображения на рис. 1). Совокупность последовательных реализаций, сформированных при движении судна, содержит информацию об отражательных характеристиках морского дна в полосе обзора и представляет собой акустическое изображение дна — аналог оптического и радиолокационного изображений. Такие изображения предназначены для визуализации и классификации объектов. Для примера на вставке рис. 1 приведён фрагмент акустического изображения участка дна с двумя затонувшими судами. Полоса обзора, которая определяется диаграммой направленности приёмных элементов, энергетическими характеристиками, формой рельефа морского дна и обычно задается в глубинах  $H_0$  "под собой", составляет  $(4-10)H_0$ . Использование антенн с узкими диаграммами направленности в боковом направлении обеспечивает определённую двумерность измерений в плоскости бокового обзора. Морское дно рассматривается как пространственная среда с коэффициентом обратного рассеяния  $R = R(L, \theta)$ , зависящим от дальности  $L$  и угла  $\theta$  между вертикалью и направлением прихода в плоскости бокового обзора. Рассматривая коэффициент отражения  $R = R(u, \tau)$  как функцию двух параметров: углового параметра  $u = \sin \theta$  и задержки  $\tau$ , принятый сигнал на отдельной антенне  $Z_n(t)$  многоэлементной системы можно записать в виде

$$Z_n(t) = \iint R(u, \tau) S_0(t - \tau - \tau_n u) du d\tau, \quad u = \sin \theta. \quad (1)$$

Дальность  $L$  связана с временем распространения (задержкой)  $\tau = 2L/c$ , где  $c$  — скорость звука. Дополнительная задержка  $\tau_n = l_n/c$ , которая обусловлена геометрической разностью путей прихода эхо-сигналов на различные элементы антенны, определяется координатой  $l_n$  отдельного элемента в системе координат, связанной с антенной.

Для многих практических случаев при использовании сложных сигналов модель (1) можно упростить, ограничившись узкополосным приближением. Для этого представим  $S_0(t)$ , выделив несущую частоту  $\omega_0$  и относительно медленно меняющуюся компоненту модуляции  $S_A(t)$ , в виде  $S_0(t) = \exp(i\omega_0 t) S_A(t)$ . Сигнал  $S_0(t)$  будем считать узкополосным, если для  $\Delta t \ll t_0$  выполняется  $S_A(t + \Delta t) \approx S_A(t)$ . В результате при  $\Delta t \ll t_0$  получим следующее соотношение для узкополосного сигнала:  $S_0(t_0 + \Delta t) \approx \exp(i\omega_0 \Delta t) S_0(t_0)$ . Рассматривая в качестве малого параметра  $\Delta t$  задержку времени прихода на отдельных элементах решётки  $\tau_n u$ , т.е. считая выполненным условие  $\tau_n u \ll t - \tau$ , модель измерения (1) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_n(t) &= \iint R(u, \tau) S_0(t - \tau) \exp(-i\omega_0 \tau_n u) du d\tau = \\ &= \int R_t(u) \exp\left(-2\pi i \frac{l_n}{\lambda} u\right) du, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь  $R_t(u) = \int R(u, \tau) S_0(t - \tau) d\tau$ ,  $\lambda$  — длина волны, соответствующая несущей частоте  $\omega_0$ . Для фиксированной дальности определение коэффициента отражения становится задачей спектрального оценивания — оценки спектра сигнала по набору его дискретных

отсчётов  $Z_n$ ,

$$Z_n = \int R_t(u) \exp \left( -2\pi i \frac{l_n}{\lambda} u \right) du. \quad (2a)$$

Здесь  $R_t(u)$  можно рассматривать как угловой спектр, для его оценки естественно использовать известные методы спектрального анализа, как непараметрические, так и параметрические [2, 3]. Задачей обработки является оценка коэффициента отражения  $R(u, \tau)$  по совокупности измерений  $Z_n(t)$  и последующее определение параметров морского дна. В зависимости от количества приёмных антенн в разных системах используются различные методы оценки коэффициента отражения  $R$  и параметров морского дна, а также различные ограничения на предполагаемую форму рельефа морского дна.

### 3. Одноканальные системы

**с линейно-частотно-модулированными сигналами:  
акустические профилографы**

**и обзорные гидролокаторы бокового обзора**

В одноканальных системах, в которых отсутствует угловая избирательность, модель измерений (1) вырождается в соотношение для коэффициента  $R = R(\tau)$ , зависящего только от задержки  $\tau$  (дальности  $L$ ), и регистрируемый сигнал описывается соотношением

$$Z(t) = \int R(\tau) S_0(t - \tau) d\tau.$$

В среднеквадратичной метрике оценка  $R(\tau)$  должна минимизировать функционал

$$\begin{aligned} \Delta = \int dt \left( Z - \int S_0(\tau) R(t - \tau) d\tau \right) \times \\ \times \left( Z^* - \int S_0^*(\tau) R^*(t - \tau) d\tau \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Оптимальная оценка  $R(t)$  должна удовлетворять интегральному уравнению Фредгольма первого рода

$$\int Z(t + \tau) S_0^*(\tau) d\tau = \int R(t - \tau) K_0(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где ядро определяется корреляционной функцией зондирующего сигнала

$$K_0(\tau) = \int S_0(t) S_0^*(t + \tau) dt.$$

Для ЛЧМ-сигнала  $S_0(t) = \exp(i\omega_0 t + i(\Delta\omega/2T)t^2)$  корреляционная функция имеет вид

$$K_0(\tau) = \exp(i\Phi(\tau)) \frac{\sin[\pi B(\tau/T_0)(1 - |\tau|/T_0)]}{\pi B\tau/T_0}, \quad (5)$$

где  $\Phi(\tau) = -(\omega_0 + \pi B/T)\tau$ ,  $B$  — база сигнала, определяемая соотношением  $T_0\Delta\omega = 2\pi B$ ,  $T_0$  — длительность импульса,  $\Delta\omega$  — полоса.

Строго говоря, уравнение (4) относится к классу некорректных задач. Существует ряд методов решения таких задач, использующих различные дополнительные предположения о характере изменения  $R(\tau)$  [4]. На практике соотношение (4) используется как готовый алгоритм приближённой оценки  $\hat{R}(\tau)$  с заданным разре-

шением. Для этого запишем (4) в виде двух соотношений:

$$\tilde{R}(t) = \int Z(t + \tau) S_0^*(\tau) d\tau, \quad (6a)$$

$$\tilde{R}(t) = \int R(t - \tau) K_0(\tau) d\tau. \quad (6б)$$

Соотношение (6a) можно рассматривать как алгоритм обработки, который осуществляется в спектральной области с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Эта операция — сжатие сигнала — является платой за использование сложных сигналов. Соотношение (6б) определяет разрешение оценки  $\hat{R}(\tau)$  как свёртку точного решения с ядром  $K_0(\tau)$  — функцией корреляции зондирующего сигнала. Для тональных сигналов интервал корреляции (область, в которой величина  $|K_0(\tau)|$  значимо отлична от нуля) определяется длительностью импульса  $T_0$ . Главное преимущество применения ЛЧМ-зондирующих сигналов определяется тем, что за счёт внутриимпульсной модуляции интервал корреляции уменьшается до величины  $T_i/B$ , где  $B$  — база сигнала. Это позволяет сочетать большой энергетический потенциал с высоким, порядка нескольких долей сантиметра, разрешением.

Зависимость модуля коэффициента отражения  $R$  от дальности служит основой для построения карт акустического изображения дна. Отсутствие угловой избирательности в одноканальных обзорных ГБО не является препятствием для использования этого класса систем при исследовании относительно плоских районов морского дна, поиска малоразмерных предметов, деталей рельефа типа борозд, траншей, камней. Обычно обзорный ГБО представляют собой одноканальный гидролокатор правого и левого борта, с независимыми приёмопередающими антеннами, имеющими узкую (около  $1^\circ$ ) диаграмму направленности вдоль линии движения носителя и, как правило, цифровую систему формирования, обработки и регистрации сигналов. Тип излучаемых импульсов — тональные и ЛЧМ-посылки. Рабочие частоты от 10 до 500 кГц. В тональном режиме длительность импульса составляет несколько долей миллисекунды, в ЛЧМ-режиме достигает нескольких секунд.

Одними из одноканальных приборов, в которых ЛЧМ-сигналы широко используются в экспериментальных образцах, являются акустические линейные профилографы. Многолетний опыт использования низкочастотного профилографа с ЛЧМ-зондирующими сигналами, разработанного в ИРЭ РАН, подтвердил его хорошие эксплуатационные возможности и позволил выявить некоторые особенности интерпретации получаемых результатов. Рабочая частота профилографа 5 кГц, полоса частот порядка 4 кГц, излучаемая мощность около 3 кВт. В состав профилографа входят: девятиэлементная антенная система, электронная система формирования зондирующих посылок (цифровой синтезатор), излучатель мощности, интерфейс ввода информации в компьютер. Прибор содержит цифровую систему сбора, отображения и обработки данных. Предназначен для обследования рельефа дна и донных отложений на глубинах от 20 до 3000 м. Программы сбора данных обеспечивают когерентный ввод эхо-сигналов, ввод навигационной информации с датчиков GPS о пространственном положении судна, отображение информации в реальном времени и архивирование полученных данных.

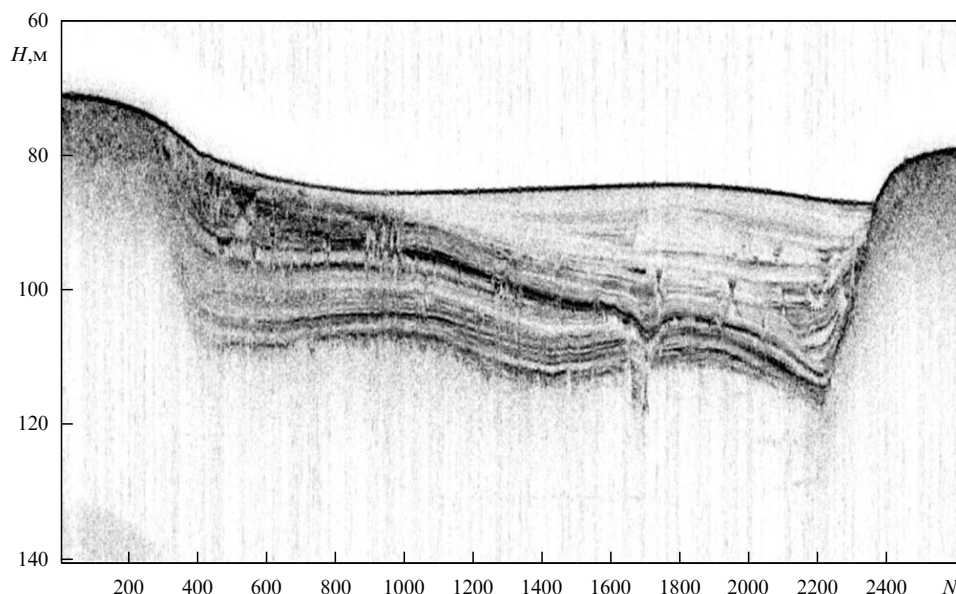


Рис. 2. Профиль рельефа дна и осадочных пород (Чукотское море). Вероятно, древнее русло реки.

На рисунке 2 приведён фрагмент рельефа морского дна, полученного в результате профилирования в ледовых условиях Чукотского моря. Глубина примерно 70 м. Результат профилирования показывает высокую помехозащищённость прибора, позволившую реализовать высокое разрешение донных отложений. Приведённый фрагмент интересен ещё и тем, что хорошо видна впадина, заполненная осадками. Такой вид вполне могло иметь русло древней реки после опускания суши и наступления моря. Высказанная гипотеза может оказаться очень продуктивной для решения некоторых проблем при установлении границ континентального шельфа.

Высокий энергетический потенциал при применении ЛЧМ-зондирующих сигналов позволяет производить профилирование донных отложений при больших глубинах моря. На рисунке 3 показан результат профилирования в Японском море на глубинах от 1200 до 1400 м. Исследуемый район характеризуется изменяющимся рельефом с толстым слоем пластичных отложений. Первое отражение соответствует глубине, что подтверждено результатами промера однолучевым и многолучевым эхолотами. По горизонтальной оси отложено пройденное расстояние в метрах, а по вертикальной оси отложена глубина в метрах. Как видно из рис. 3, глубина профилирования составляет более 100 м, характер отложений на склонах имеет слоистую структуру, характерную для илстых глин. Во впадине характер профилограммы более однороден по глубине, что характерно для супесей.

#### 4. Сигналы с линейной частотной модуляцией в интерферометрических гидролокаторах бокового обзора

Для анализа рельефа дна в полосе съёмки в комплекс интерферометрического ГБО включают дополнительные приёмные каналы с набором антенн в вертикальной плоскости. Обработка сигналов в интерферометрическом ГБО основана на предположении о том, что на заданной дальности присутствует сигнал только одного направления:  $R(u, \tau) = R(\tau) \delta(u - u_0(\tau))$ , при этом модель приёма (2) в узкополосном приближении превращается в

соотношение

$$Z_n(t) = R(t) \exp \left( 2\pi i \frac{l_n}{\lambda} u_0(\tau) \right),$$

где  $R(t) = \int R(\tau) S_0(t - \tau) d\tau$ ,  $u_0 = \sin \theta_0$ . Определение коэффициента отражения  $R(t)$  полностью аналогично определению этого коэффициента для обзорного ГБО. Вычисление угла прихода осуществляется посредством измерения фазы  $\Psi$  комплексно-сопряжённого произведения пары отсчётов двух каналов (интерферометра):

$$A_{n,m}(t) = Z_n(t) Z_m^*(t) = |R(t)|^2 \exp \Psi_{n,m}, \quad (7)$$

$$\Psi_{n,m} = \arctan \frac{\operatorname{Im} A_{n,m}}{\operatorname{Re} A_{n,m}}.$$

Фаза интерференции связана с углом прихода  $\theta$  и базой интерферометра  $b_{nm} = l_n - l_m$  следующей формулой:

$$\Psi_{n,m}(t) = \exp \left( 2\pi i \frac{b_{nm}}{\lambda} \sin \theta(t) \right).$$

По фазе определяется угол прихода, а глубина  $h$  и горизонтальная координата  $x$  элемента отражения (рельефа) вычисляется по дальности  $L$  и углу прихода  $\theta$  исходя из геометрических соотношений

$$h = L \cos \theta, \quad x = L \sin \theta. \quad (8)$$

Более подробно детали обработки данных интерферометрического ГБО описаны в [6, 7].

Практически используемые интерферометрические ГБО включают в себя, как правило, две-три антенны по каждому борту (несколько интерферометров), систему спутниковой навигации, приборы определения профиля скорости звука, датчики крена, дифферента, вертикальных перемещений. Как и в одноканальных ГБО, диаграмма направленности узкая (порядка  $1^\circ$ ) вдоль линии движения и широкая (порядка  $60^\circ$ ) в плоскости бокового обзора. Благодаря относительно простой аппаратной реализации и широкой полосе обзора этот тип акустических систем получил широкое распространение, по-

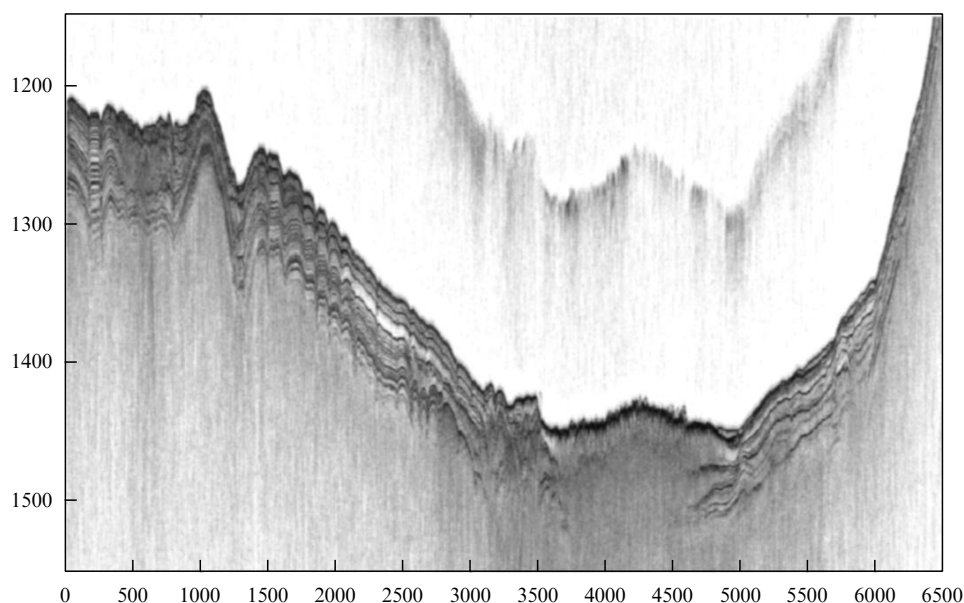


Рис. 3. Фрагмент профилирования донных отложений в Японском море на глубинах до 1500 м. Глубина профилирования подповерхностных структур более 100 м.

скольку подобные системы позволяют одновременно получать высококачественные акустические изображения и измерять глубины в полосе съёмки.

Различные модификации экспериментальных интерферометрических ГБО, разработанные в ИРЭ РАН, успешно использовались в самых различных условиях: от катерных речных промеров до крупных изыскательских работ в ледовых условиях Арктики на крупнотоннажных судах [5–7]. Для работы на небольших глубинах (примерно до 100 м), как правило, используются тональные посылки, не требующие процедуры сжатия. На больших глубинах используются ЛЧМ-посылки с различной длительностью, в зависимости от глубины и требуемых энергетических характеристик.

Следует отметить важное различие при применении тех и других сигналов. На акустических изображениях при тональной зондирующей посылке начальные элементы по правому и левому боку имеют характерную засветку, что связано с амплитудной перегрузкой приёмников. На практике это существенно усложняет схему приёмного устройства вследствие необходимости создания временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) по каждой строке приёма, что существенно затрудняет обработку и, как правило, требует вмешательства оператора. Качество изображений сильно зависит от акустических шумов разной природы. При когерентной обработке сложных сигналов выделение полезной информации происходит не в амплитудной, а в частотной области, и при сохранении когерентности эхо-сигналов такой проблемы не существует, достаточно использования обычной системы автоматической регулировки усиления (АРУ) для согласования уровня выходного сигнала приёмника с динамическим диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Последнее преимущество очень важно при применении рассмотренных систем дистанционного зондирования на необитаемых подводных аппаратах и в условиях значительных амплитудных помех.

Фрагменты акустических изображений, полученные в ходе работ по обследованию трассы прокладки оптического кабеля в ледовых условиях Арктики, представлены

на рис. 4: показаны следы ледовой экзарации от крупного айсберга на дне (рис. 4а) и борозды того же происхождения, характеризующие сложную траекторию движения, связанную с изменением направлений течения (рис. 4б). Кроме изображений объектов акустические изображения содержат информацию об акустической плотности донной поверхности. Различие в коэффициентах обратного рассеяния, определяемое по яркостному фону, несёт информацию о геологических породах донной поверхности. На рисунке 5 показаны фрагмент батиметрической карты, построенной по данным интерферометрических измерений, и изменение плотности грунта в виде полутонного изображения.

Основной недостаток интерферометрических систем — отсутствие в некоторых условиях однозначности при селекции принимаемых сигналов с одинаковым запаздыванием по углу прихода, что приводит к ограничениям при использовании таких систем в условиях многолучевости, сложного рельефа и т.д. [6]. Многоэлементные системы свободны от этих ограничений и позволяют разделять сигналы с нескольких направлений (параметрический подход) или с высоким угловым разрешением (непараметрические методы).

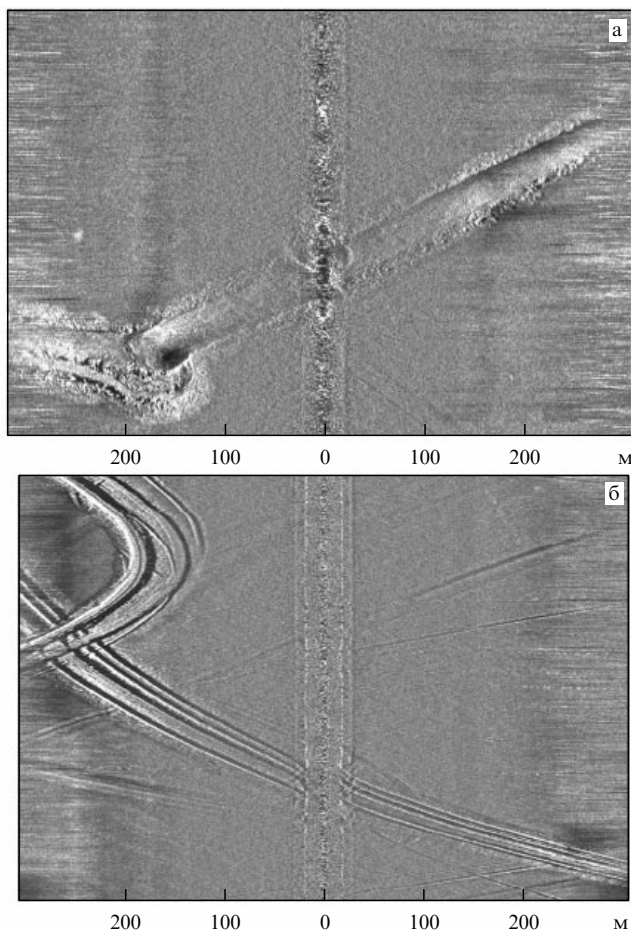
### 5. Многолучевой эхолот с линейно-частотно-модулированными зондирующими сигналами

Для многоэлементной решетки и модели измерений (1) среднеквадратичный критерий (3) оценки коэффициента отражения принимает вид

$$\Delta = \sum_n \left| \int Z_n(t) - \int R(u, \tau) S_0(t - \tau - \tau_n u) du d\tau \right|^2 dt,$$

а уравнение для оценки записывается как

$$\begin{aligned} \sum_n \int Z_n(t) S_0^*(t - \tau_0 - \tau_n u_0) dt = \\ = \int R(u, \tau) \left\{ \sum_n K_0(\tau - \tau_0 - \tau_n(u - u_0)) \right\} du d\tau. \end{aligned}$$



**Рис. 4.** Фрагменты акустических изображений интерферометрического ГБО с ЛЧМ-зондирующим сигналом: (а) следы на дне — ледовая экзарация от крупного айсберга в Арктике на глубине 20–30 м, размер фрагмента по вертикали 1 км; (б) ледовая экзарация, характеризующая траекторию перемещения айсберга при изменении течения, размер фрагмента по вертикали примерно 2 км.

Ядро (в фигурных скобках) этого интегрального уравнения описывает разрешение по углу и дальности. В узкополосном приближении ядро вырождается в произведение двух сомножителей, зависящих от угла и дальности:

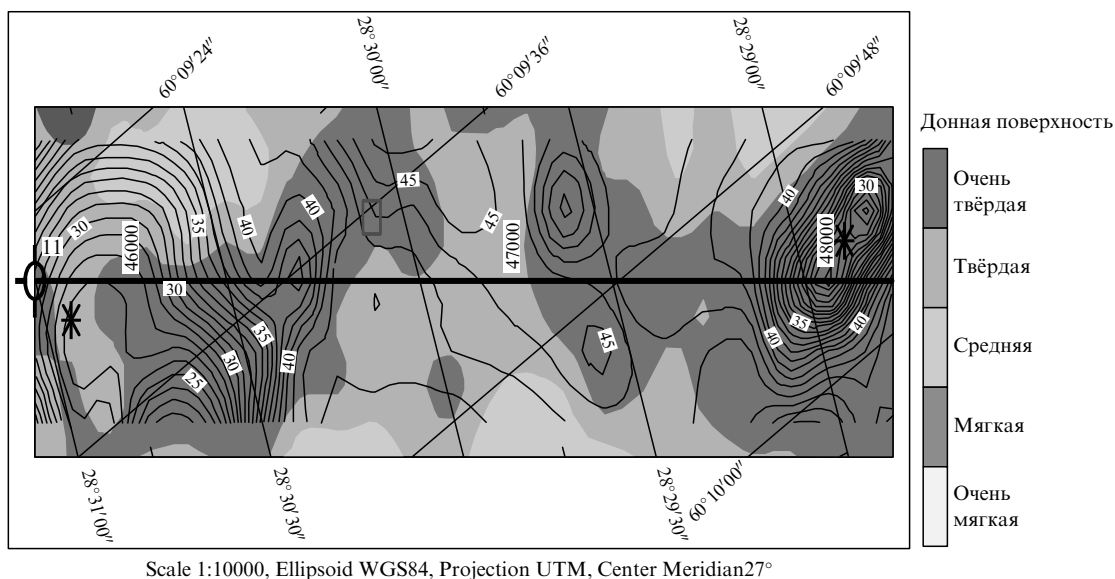
$$\sum_n \tilde{Z}_n(t) \exp\left(2\pi i \frac{l_n}{\lambda} u_0\right) = \int R(u, \tau) K_0(\tau - t) K_\theta(u - u_0) du d\tau, \quad (9)$$

где  $\tilde{Z}_n(t) = \int Z_n(t) S_0^*(t - \tau_0) dt$  — сжатые входные данные,  $K_\theta(u - u_0) = \sum_n \exp(-2\pi i (l_n/\lambda)(u - u_0))$  — диаграмма направленности решётки. Аналогично уравнению из раздела 3 уравнение (9) можно рассматривать как оценку коэффициента отражения  $\tilde{R}(u, \tau)$ , в рамках временного разрешения функции корреляции  $K_0(\tau)$  и углового разрешения диаграммы направленности  $K_\theta(u)$ ,

$$\tilde{R}(u, t) = \sum_n \tilde{Z}_n(t) \exp\left(2\pi i \frac{l_n}{\lambda} u_0\right). \quad (10)$$

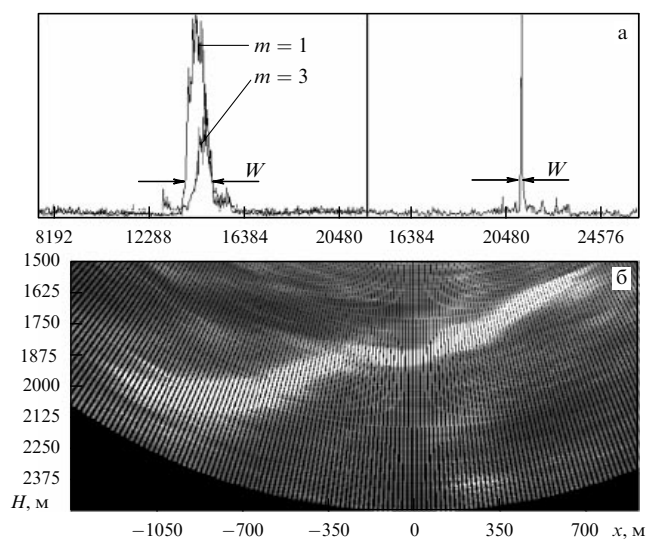
Обработка сигналов при этом заключается в сжатии входных отсчётов по всем каналам и фурье-преобразовании отсчётов для каждой дальности. Для фиксированной диаграммы направленности, особенно при небольшом числе приёмных антенн, важной практической задачей является повышение пространственного разрешения. Решение этой задачи может быть получено как с помощью решения (9) (непараметрический метод), так и посредством применения параметрических алгоритмов спектрального оценивания [2–4].

Первые испытания экспериментальной системы с многоэлементной антенной системой и с ЛЧМ-зондирующими сигналами в ИРЭ РАН были проведены в 2007 г. в акватории Японского моря. В состав этой гидролокационной системы входят линейная передающая и 32-элементная приёмная антенные системы, выполненные по типу креста Миллса, мощный усилитель излучаемых сигналов, цифровой формирователь (синте-



**Рис. 5.** Фрагмент батиметрической карты в виде линий уровня глубин (изобат). Изобаты проведены с шагом 5 м. Полутоновой растровый фон характеризует акустическую плотность донной поверхности.





**Рис. 6.** (а) Изменение амплитуды эхо-сигналов в отдельных лучах в зависимости от дальности (номера отсчёта),  $m$  — номер луча. Период дискретизации по времени соответствует интервалу по дальности в 0,1 м. (Получено по данным зондирования различных типов донной поверхности.) (б) Пример выделения рельефа по системе пространственных лучей.

затор) ЛЧМ-сигналов, 32-канальный малошумящий цифровой приёмник с интерфейсом ввода данных в ЭВМ. Несущая частота зондирующих сигналов 30 кГц, девиация частоты 3,0 кГц. Дискретизация сигнала осуществляется с частотой  $\sim 6,0$  кГц по каждому из каналов. Расстояние между приёмными элементами антенной решётки — половина длины волны несущей частоты излучаемого сигнала.

В соответствии с (10) первоначально осуществлялось сжатие сигналов всех 32 каналов. Вычисление углового спектра на каждой дальности проводилось с использованием БПФ с размерностью  $N = 32$  (в некоторых вариантах использовалась большая размерность — до  $N = 256$ ) и с помощью взвешивания входных канальных отсчётов при различных вариантах весовых последовательностей. Набор спектральных отсчётов образует при этом систему парциальных лучей. Угловое положение  $u_m = \sin \theta_m$  луча с номером (спектральным отсчётом)  $m$  при расстоянии  $d$  между приёмными элементами антенны в половину длины волны  $\lambda$  определяется из соотношения  $u_m = \lambda m / (dN) = 2m/N$ , где  $m = 0, \dots, N-1$ ,  $N$  — размерность БПФ, угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к антенне. Амплитуда луча содержит максимум на дальности, соответствующей точке пересечения дна лучом. Построение рельефа производилось по наклонной дальности  $L$ , определяемой по положению максимума пика амплитуды в каждом луче с известным углом наклона по формулам (8). Примеры изменения амплитуды лучей в окрестности максимума, характеризующие два предельных типа данных, показаны на рис. 6. Для группы данных (в левой части рис. 6а) пик в окрестности максимума широкий, амплитуда в максимуме плавно уменьшается с увеличением номера луча (угла наклона), смещаясь по дальности. Алгоритм БПФ для формирования пространственной диаграммы хорошо формирует рельеф

дна (пример такого рельефа показан на рис. 6б). Для второго типа записей (в правой части рис. 6а) форма амплитуды в окрестности максимума представляет собой узкий пик практически на одной дальности, амплитуда пика резко уменьшается при увеличении номера луча. Обработка показала, что использование БПФ в этих случаях неэффективно из-за высокого уровня боковых лепестков; для оценки углового спектра использовался параметрический авторегрессионный метод (метод Прони) [2]. Это показывает актуальность разработки и использования спектральных методов оценивания с высоким разрешением в многолучевых системах.

## 6. Заключение

Приведённые результаты теоретического анализа и разработанные алгоритмы обработки сигналов при использовании различных гидролокационных систем с ЛЧМ-зондирующими сигналами для дистанционных исследований морского дна реализованы и опробованы в различных условиях, включая сложнейшие работы в Арктике.

В сообщении приведены только некоторые аспекты обработки данных при использовании ЛЧМ-сигналов. Вне рамок доклада остались такие важные вопросы, как методы вторичной обработки, построение батиметрических карт, карт яркости, подготовка различных отчётных документов, без которых работа современных гидроакустических систем просто невозможна.

Проведённые эксперименты подтвердили важные преимущества таких разработок по сравнению с традиционными гидролокаторами, использующими тональные зондирующие импульсы. Это — увеличение энергетического потенциала и разрешающей способности; увеличение помехозащищённости и тем самым улучшение электрической и акустической совместимости различных приборов; увеличение возможности автоматизации гидролокационных систем различного назначения.

Кроме решения перечисленных задач, использование когерентных методов обработки при применении ЛЧМ-сигналов в перспективных разработках позволит использовать дополнительные сигнальные характеристики, которые могут стать очень важными классификационными признаками при интерпретации результатов дистанционных обследований морского дна [8].

## Список литературы

1. Costnel C, Yoos L T *Sea Technol.* (March) (2007)
2. Marple S L *Digital Spectral Analysis: with Applications* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987) [Марпл С Л *Цифровой спектральный анализ и его приложения* (М.: Мир, 1990)]
3. Leonowicz Z, Lobos T, Rezmier J *IEEE Trans. Industrial Electron.* **50** 514 (2003)
4. Василенко Г И *Теория восстановления сигналов* (М.: Сов. радио, 1979)
5. Каевитсер В И и др. *Радиотехника* (1) 42 (2004)
6. Каевитсер В И, Разманов В М *Радиотехника* (12) (2005)
7. Разманов В М, Кривцов А П, Долотов С А *Радиотехника и электроника* **51** 58 (2006) [Razmanov V M, Krivtsov A P, Dolotov S A *J. Commun. Technol. Electron.* **51** 52 (2006)]
8. Гуляев Ю В, Захаров А И, Каевитсер В И *Докл. РАН* **413** 257 (2007) [Gulyaev Yu V, Zakharov A I, Kaevitser V I *Dokl. Earth Sci.* **413** 327 (2007)]