

А.Г.Поддубный  
Л.К.Малинин  
Ю.И.Спектор

# БИОТЕЛЕМЕТРИЯ В РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ НАУКЕ И ПРАКТИКЕ

---

Под редакцией д-ра биол. наук  
А. Г. ПОДДУБНОГО

МОСКВА  
«ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ»  
1979

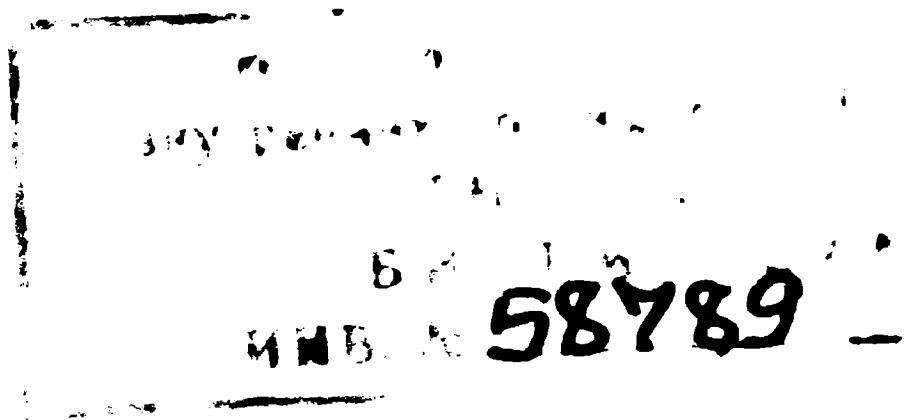
П 44  
36.92  
УДК 597.0.5—442

**БИОТЕЛЕМЕТРИЯ В РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ НАУКЕ  
И ПРАКТИКЕ. Поддубный А. Г., Малинин Л. К., Спектор Ю. И.,  
1979.**

В книге рассматриваются новые методы ихтиологических исследований, позволяющие получать телеинформацию о местонахождении рыб в пространстве, их физиологических показателях, факторах окружающей среды, траекториях, скорости и ритмике плавания. Рассматривается предмет подводной биотелеметрии, описываются радио-, ультразвуковые и комбинированные телеметрические системы, датчики, приспособления, приемные устройства, типы пеленгации. Значительное внимание уделяется вопросам организации и проведения биотелеметрических исследований рыб, методическим особенностям расчета и анализа пути, скорости и ритмики их плавания. Представлены данные о скоростях и ритмике плавания разных видов рыб в различных экологических ситуациях. Излагаются возможности применения новых методов для изучения поведения мигрантов в зоне гидросооружений.

Таблиц 6. Иллюстраций 70. Список литературы — 266 названий.

Рецензент — доктор биол. наук В. Р. Протасов.



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы в нашей стране все большее значение и размах приобретают работы, направленные на сохранение окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов. Особое место в этих работах занимают исследования, связанные с изысканием средств управления качеством воды и биологической продуктивностью водоемов.

Переход к управлению процессами жизнедеятельности сообществ водных растений и животных представляет собой новый этап в развитии гидробиологии и рыбохозяйственной науки и практики. Для его реализации требуется высокодостоверная информация о фактической численности популяций, распределении и закономерностях перемещений особей на биотопах, четкая прижизненная документация ответных реакций особей и их скоплений на внешние и внутренние раздражители.

Сбор подобной информации может обеспечить подводная телеметрия, позволяющая на расстоянии от изучаемых живых объектов регистрировать их поведение и реакции на естественные и вносимые раздражители с одновременной регистрацией параметров этих раздражителей.

Метод дистанционных измерений биологических данных, передаваемых с объекта (биотелеметрия), довольно хорошо разработан и широко применяется для изучения наземных животных и человека. В последние годы в СССР и США состоялось несколько симпозиумов, посвященных проблемам биотелеметрии, и их результаты опубликованы в специальных изданиях [12, 101, 102, 216, 217]. Биотелеметрия включает все способы телепередачи биологической информации, однако наиболее универсальной при изучении птиц, наземных животных и человека является радиотелеметрия с передачей данных по радиоканалу, а для водных животных — ультразвуковая или совмещенная радио- и ультразвуковая телеметрия.

Для длительного наблюдения за подопытной рыбой и получения физиологической информации сама рыба должна быть

носителем источника сигналов, проходящих через водную среду на приемные устройства. Достигается это применением специально разрабатываемых технических средств, позволяющих с заданной дискретностью регистрировать следующие основные характеристики свободноплавающей меченой рыбы: местоположение по акватории и глубине, фактическую скорость и ритмику движения, температуру тела, частоту дыхательных движений и сердечных сокращений, биопотенциал, активность слюноотделения, биотоки, уровень активности пищеварительных ферментов, скорость переваривания пищи. При этом животное находится в естественной для него среде обитания и взаимодействует с ней, реализуя свои природные рецепторно-аналитические способности.

Одновременная регистрация параметров среды и поведенческих реакций рыб позволяет оценить информативность различных раздражителей и на этой основе изыскать способы моделирования среды с целью привлечения рыбы в определенный участок водоема или ее отпугивания.

Прослеживание группы меченых рыб одного или разных видов дает возможность оценить их внутри- и межвидовые отношения в различных экологических ситуациях и тем самым скорректировать средства управления с особенностями реакций животных в стаях и группах.

Усилиями многих поколений исследователей к настоящему времени собрана огромная информация о перемещениях, распределении и миграциях рыб. Почти для каждого водоема более или менее точно известны биология населяющих его хозяйственно-ценных видов рыб, их относительная численность, места размножения, нагула и зимовки, сроки массовых подходов, местоположение основных миграционных путей. Эти данные успешно используются в рыбохозяйственной практике при решении вопросов генеральной стратегии рыболовства и рыбоводства.

Однако добыча рыбы производится в конкретных биоценозах, обладающих специфическими микроусловиями, поэтому эффективность промысла во многом определяется тем, насколько хорошо при выборе и размещении орудий и сроков лова учтены особенности поведения облавливаемых популяций и их ответные реакции на воздействие абиотических и биотических факторов среды.

Тактические вопросы рыболовства разработаны сейчас явно недостаточно, и в их решении существенная роль принадлежит подводной биотелеметрии, позволяющей осуществлять непрерывный документальный контроль за перемещениями



скоплений рыбы там, где это необходимо. Это — первый важный аспект рыбохозяйственного использования биотелеметрических методов. В этом аспекте биотелеметрию нужно рассматривать как действующую в период обловов диспетчерскую службу наблюдений за топографией движения рыб, оперативно учитывающую все элементы этого движения в трехмерном пространстве и регулярно передающую полученные сведения в центр руководства промыслом. Накопленный службой массовый фактический материал после соответствующей статистической обработки дает достаточно полное представление о стереотипах местных перемещений, знание которых позволяет подойти к анализу причинной стороны явления, т. е. исследовать способы и механизмы ориентации рыб в разных средах с меняющимся набором воздействующих факторов. Это — второй и основной аспект применения биотелеметрии в исследовании поведения свободноплавающих рыб. Его разработка открывает возможность создания способов и средств направленного перемещения масс рыбы в заданный участок водоема путем ее привлечения или отпугивания.

Глубокое изучение природы ориентационных и рецепторно-аналитических способностей рыб только начинается. Биотелеметрия применяется при этом в полевом (крупные водоемы) и лабораторном (пруды, бассейны, аквариумы) вариантах.

В США, Канаде, Японии и других странах при различных научных организациях создано более 100 групп, отделов и биотелеметрических лабораторий, результаты исследований которых быстро внедряются в практику и оказываются экономически высокоэффективными. В СССР подводная биотелеметрия пока успешно используется в основном при изучении миграционного поведения и ориентации рыб. Так, по данным института «Гидропроект» им. С. Я. Жука, использование результатов биотелеметрических исследований поведения рыб в зонах гидроузлов только при конструировании и эксплуатации рыбопропускных сооружений дает экономический эффект, исчисляемый миллионами рублей. Имеются сведения об успешном использовании подводной биотелеметрии и при исследованиях других водных животных [9, 88]. Тем не менее в нашей стране биотелеметрические методы до сих пор не нашли должного применения в гидробиологических и рыбохозяйственных исследованиях, хотя интерес к ним у советских исследователей и практиков очень велик: за последние 5—7 лет в Институт биологии внутренних вод АН СССР обращались за консультациями и помощью специалисты 30 научных организаций, различных министерств и ведомств.

Всесоюзный семинар по биотелеметрическим методам исследования поведения, миграций и физиологии рыб, проведенный в 1976 г. в ИБВВ АН СССР, определил следующие первоочередные направления применения подводной телеметрии в рыбохозяйственных исследованиях и практике:

документация сезонно-возрастной изменчивости трасс, скорости и ритмики движения групп рыб разных видов на типичных биотопах водоемов и водотоков с целью выявления стереотипов их поведения с использованием получаемых данных для оптимизации селективного отлова рыбы, совершенствования технологических схем рыборазведения, определения правильного местоположения рыбопропускных и рыбозащитных сооружений и отработки суточных и сезонных графиков их эксплуатации;

документация ответных реакций рыб на поля естественных и искусственных раздражителей с целью разработки средств управления поведением стай и скоплений путем их отпугивания или привлечения в определенные зоны и участки водоема с использованием получаемых данных при разработке новых орудий и способов селективного лова, эффективных конструкций рыбозащитных и рыбопропускных сооружений, при выращивании прудовой рыбы и эксплуатации искусственных нерестилищ.

В предлагаемой книге делается первая попытка обобщить и систематизировать накопленный в СССР и за рубежом опыт биотелеметрических исследований популяций рыб применительно к основным задачам рыбного хозяйства.

Раздел «Технические аспекты подводной биотелеметрии» написан канд. техн. наук Ю. И. Спектором, разделы «Организация и проведение биотелеметрических исследований» и «Применение биотелеметрии в рыбном хозяйстве» — докт. биол. наук А. Г. Поддубным и канд. биол. наук Л. К. Малинным.

Авторы с большой благодарностью примут все критические замечания и пожелания и учтут их в дальнейшей работе.

# **ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДВОДНОЙ БИОТЕЛЕМЕТРИИ**

---

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОДВОДНОЙ БИОТЕЛЕМЕТРИИ**

Закономерности прохождения сигналов, способных нести информацию, в водной среде резко отличаются от известных для других сред, поэтому к техническим средствам связи здесь предъявляются особые требования, знание которых необходимо не только инженерам-разработчикам, но и специалистам-биологам, применяющим новую аппаратуру в своих исследованиях.

### **Принципы построения подводных биотелеметрических систем**

Основная цель подводной биотелеметрии — получение информации о перемещениях и физиологическом состоянии подводных биологических объектов — достигается путем установки на исследуемом подводном объекте специальных передатчиков, обеспечивающих отбор, преобразование и передачу информации.

Прием сигналов передатчика и получение данных о его местоположении, дешифрация передаваемых сообщений выполняются комплексом технических устройств, для краткости называемым приемником. Передатчик, среда, в которой происходит передача сигналов, и приемник образуют подводную биотелеметрическую систему (ПБТС).

Передача сигналов осуществляется посредством излучения в среду (линию связи) высокочастотных колебаний. Поступление колебаний в линию связи обеспечивается излучающей антенной передатчика. В воде переносчиками сообщений обычно служат упругие колебания в диапазоне ультразвуковых частот (ультразвуковая телеметрия) и электромагнитные колебания в частотном диапазоне КВ и УКВ (радиотелеметрия).

Антенна приемника улавливает энергию, излучаемую антенной передатчика. В зависимости от расстояния, степени направленности и условий распространения излучений мощность на входе приемника составляет приблизительно  $10^{-10}$ — $10^{-12}$  Вт.

Однако на выходе приемника для уверенной регистрации сигнала требуется мощность порядка единиц ватт, поэтому усиление в приемнике по напряжению должно составлять  $10^5$ — $10^6$ .

В приемниках подводных биотелеметрических систем уверенная регистрация сигнала обеспечивается при напряжениях на входе, равных единицам микровольт. Решение этой сложной задачи оказывается возможным благодаря достижениям современной электроники. Большую роль играют также специальные методы построения схем приемников, обеспечивающие нужное усиление при сохранении устойчивости их работы. К таким методам относится прежде всего гетеродинирование — преобразование в приемнике частоты несущих колебаний, осуществляемое с сохранением структуры передаваемого сигнала. Проблема усиления в приемнике неотделима от проблемы выделения сигнала на фоне помех, поэтому приемники ПБТС относятся к типу частотно-избирательных и способны выделять полезные сигналы из совокупности посторонних воздействий (помех), отличающихся от полезных сигналов по частоте.

Важным узлом приемника является демодулятор, обеспечивающий преобразование принятого и предварительно усиленного акустического сигнала передатчика в электрический, изменяющийся во времени по закону передаваемого сообщения. Основное требование к демодулятору — по возможности точное воспроизведение формы сигнала. После демодулятора принятое сообщение с помощью устройства индикации и регистрации преобразуется в формы, удобные для восприятия органами чувств оператора (получателя сообщения).

Одна из основных характеристик ПБТС, как и всякой другой системы связи, — эффективность, определяемая количеством информации, которое с необходимой точностью может быть передано по данной системе в единицу времени. Как известно [40], эффективность системы можно повысить, сделав ее многоканальной.

В подводной биотелеметрии применяются многоканальные системы с частотным и временным разделением каналов. В основу построения многоканальных систем с частотным разделением положена идея частотной селекции. Каждому каналу отводится своя полоса частот, определяемая спектром передаваемого сообщения и выбранным методом модуляции. Каждый из датчиков системы преобразует сообщение, подаваемое на его вход, в электрическую величину и модулирует свою поднесущую. Сигналы, снимаемые с выходов канальных генераторов поднесущих частот, промодулированные по законам пере-

даваемых сообщений, суммируются линейным сумматором и модулируются общим для всех каналов генератором несущей частоты. Сигнал этого генератора излучается в линию связи (в воду).

В качестве первичной модуляции в биотелеметрических системах наиболее часто используется частотная модуляция (ЧМ) поднесущих, а для вторичной модуляции — как частотная, так и амплитудная (АМ) модуляция. Таким образом, в подводных биотелеметрических системах с частотным разделением каналов используются две ступени модуляции (двойное преобразование передаваемого сообщения) в комбинациях ЧМ—АМ и ЧМ—ЧМ. В ряде случаев с целью экономии энергии источников питания в качестве вторичной модуляции используется частотно-импульсная (ЧИМ).

На приемной стороне ПБТС имеются: приемник высокой частоты ВЧ, демодулятор высокой частоты, полосовые каналные фильтры, средние частоты которых соответствуют средним частотам каналных генераторов передающей стороны, каналные усилители, демодуляторы и регистрирующее устройство. Приемник ВЧ обеспечивает прием и равномерное усиление всего спектра частот принимаемого высокочастотного сигнала. На выходе демодулятора приемника получается групповой видеосигнал, подобный сигналу на выходе сумматора передающей стороны. Групповой видеосигнал поступает на полосовые каналные фильтры, производящие частотную селекцию (разделение) сигналов отдельных каналов.

С выхода каждого полосового фильтра каналные видеосигналы подаются на каналные демодуляторы, на выходе которых получаются сигналы, отображающие в определенном масштабе с некоторыми искажениями первичные сигналы, снимаемые с датчиков. Эти сигналы подаются на многоканальное регистрирующее устройство.

Вариант структурной схемы ПБТС с временным разделением каналов показан на рис. 1. При временном разделении каждому каналу предоставляется определенный временной интервал в периодической последовательности, называемый каналным интервалом, за который по общему каналу связи осуществляется передача мгновенного значения сигнала, снимаемого с соответствующего датчика. Первичные сигналы с различных датчиков с помощью коммутатора поочередно подключаются к первичному модулятору ( $M_1$ ). С выхода этого модулятора снимается групповой сигнал импульсов, модулированных по току или другому параметру. В многоканальной телеметрии с временным разделением каналов находят приме-

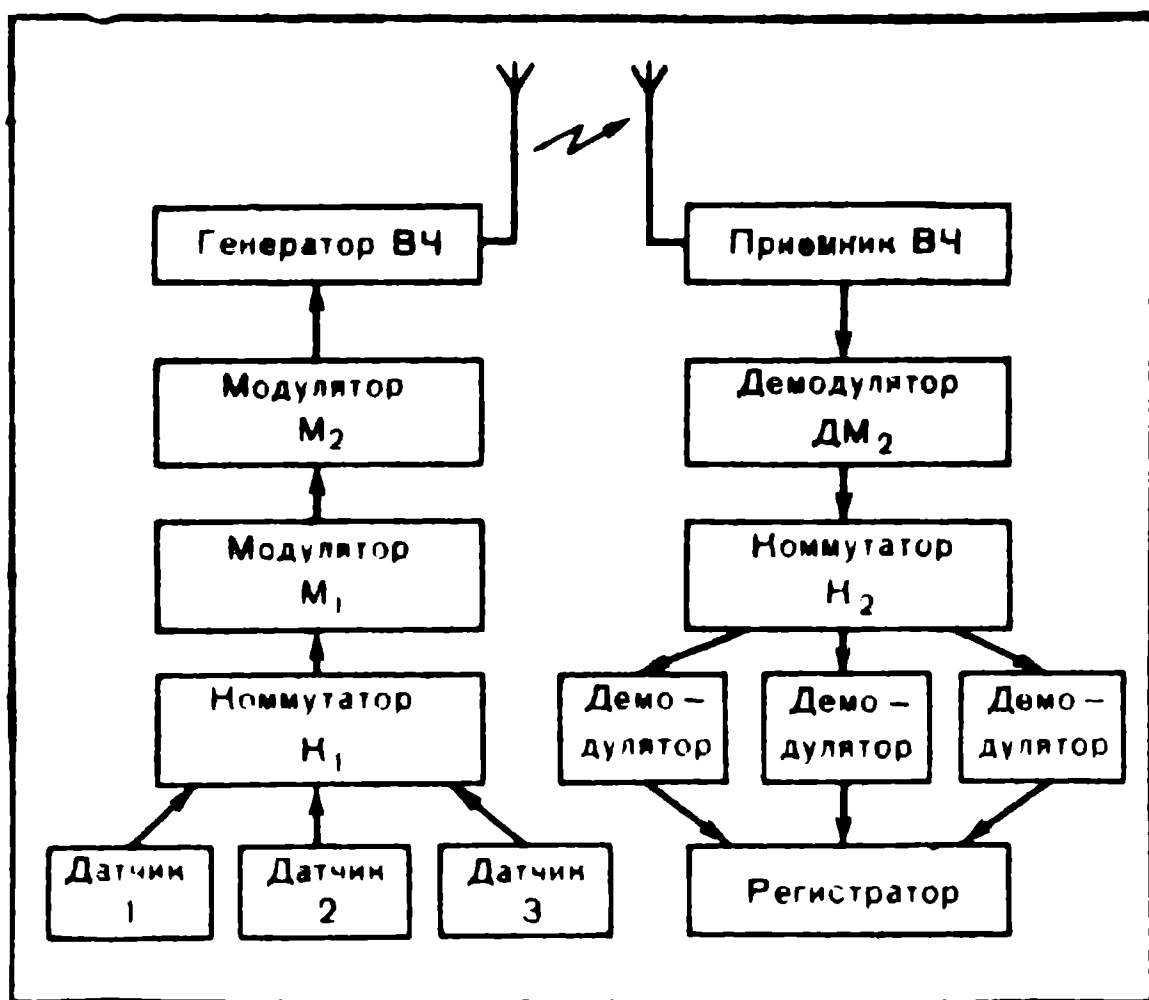


Рис. 1. Структурная схема трехканальной биотелеметрической системы с временным разделением каналов.

нение различные виды импульсной модуляции: амплитудно-импульсная (АИМ), широтно-импульсная (ШИМ) и др.

Общеканальный сигнал подается на модулятор  $M_2$ , который управляет работой радиочастотного генератора. В качестве вторичной модуляции, как правило, используется ЧМ. В ПБТС с временным разделением каналов обычно используются следующие комбинации первичной и вторичной модуляции: АИМ—ЧМ и ШИМ—ЧМ.

На приемной стороне системы с временным разделением каналов имеются: приемник ВЧ с соответствующим демодулятором (амплитудным, частотным), коммутатор  $K_2$ , каналные демодуляторы импульсных сигналов (АИМ, ШИМ) и регистрирующее устройство.

Разделение сигналов различных каналов на приемной стороне осуществляется с помощью коммутатора  $K_2$ , который работает синхронно и синфазно с коммутатором  $K_1$  передающего устройства, т. е. подключает к демодулятору  $ДМ_2$  каналный демодулятор 1—3 с фильтром нижних частот (интерполятор), датчик которого в данное время подключен к первичному модулятору  $M_1$  на передающей стороне. Синхронная и синфазная работа коммутаторов обычно осуществляется путем передачи по каналу связи специальных синхронизирующих и синфазизирующих импульсов [4].

Многоканальные системы характеризуются специфическими погрешностями, характер и величина которых зависят от способа разделения каналов и технических характеристик уст-

роиств, осуществляющих это разделение. В системах с частотным разделением основную роль играют погрешности, обусловленные возникновением переходных (линейных) и перекрестных (нелинейных) искажений.

Переходные искажения вызваны несовершенством амплитудно-частотных характеристик канальных фильтров, вследствие чего на выходе фильтра данного канала проходят сигналы других каналов (особенно соседних). Уменьшение переходных искажений может быть достигнуто путем соответствующего выбора фильтров, глубины модуляции и защитных частотных интервалов между соседними каналами с тем, чтобы ближайшие составляющие спектра соседних каналов были ослаблены до необходимого уровня.

Перекрестные искажения обусловлены нелинейностью характеристик отдельных элементов группового тракта. Вследствие этого в полосу пропускания данного фильтра попадают гармоники или комбинационные частоты других каналов. Уменьшение перекрестных искажений достигается правильным выбором режима работы элементов группового тракта [26, 40].

В ПБТС с временным разделением каналов также возникают погрешности, обусловленные несовершенством амплитудно-частотных характеристик линейных элементов. Эти погрешности возникают из-за ограничения полосы пропускания канала со стороны верхних и нижних частот. Ограничения по верхним частотам приводят к увеличению длительности переходных процессов, растяжению фронтов и срезов импульсов. Для уменьшения этих искажений приходится вводить защитные интервалы и расширять полосу пропускания группового тракта.

Ограничение по низким частотам приводит к тому, что сигнал, передаваемый по данному каналу, вызывает искажение сигналов во всех других (не только соседних) каналах. Уменьшение этих искажений достигается путем коррекции амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик соответствующих трактов.

Кроме погрешностей, обусловленных возникновением переходных и перекрестных искажений, в системах с временным разделением каналов возникают специфические погрешности, вносимые дискретизацией передаваемых сообщений по времени. Их величина зависит от верхней частоты передаваемых сигналов и способа интерполяции принятой информации. Уменьшение этих искажений достигается правильным выбором периода коммутации датчиков, который в свою очередь определяется частотным спектром передаваемых сообщений.



В ряде случаев при построении многоканальных ПБТС с частотным разделением, использующих гидроакустическую линию связи, целесообразно отказаться от двухступенчатой модуляции и осуществить непосредственную модуляцию каждой из несущих частот с последующим их линейным суммированием. В этом случае передающая часть системы представляет собой по существу ряд независимых одноканальных передатчиков, каждый из которых работает на своей несущей частоте. Специфика приемного устройства такой системы состоит лишь в том, что разделение осуществляется не по поднесущим частотам, а по несущим, в связи с чем каждый канал имеет свой демодулятор несущей частоты.

### **Гидроакустические линии связи**

**Характеристики звуковых процессов.** В гидроакустическом канале связи переносчиком информации являются упругие продольные волны. Для характеристики этих волн, частоты которых лежат выше предела слышимости человеческого уха (16 кГц), часто употребляется термин «ультразвук».

Важнейшими характеристиками звуковых процессов являются скорость распространения колебаний, звуковое давление и колебательная скорость частиц, которыми определяются количество звуковой энергии, проходящей через единицу поверхности среды, и характеристики распространения волны давления.

В реальных водоемах такая фундаментальная характеристика, как скорость звука, не остается постоянной, а зависит от ряда факторов, прежде всего — от солености и температуры. Например, в Красном море скорость звука составляет 1548 м/с, в Черном — 1482, в Финском заливе Балтийского моря — 1466 м/с. Влияние солености проявляется в том, что от нее зависят такие упругие свойства среды, как сжимаемость и плотность. Кроме того, присутствие солей в воде обуславливает наличие в ней свободных и связанных ионов. Содержание этих ионов в единице объема воды изменяется под влиянием звуковых волн сжатия и разрежения, что вызывает потери энергии при их распространении [92, 96].

Существенное влияние на скорость распространения звука в воде оказывает также зависимость сжимаемости и плотности воды от температуры. Распределение температуры и солености в водоемах обусловлено разнообразными факторами, такими, как течение, конвекция, перемешивание, атмосферные осадки, образование и таяние льдов. Многие из этих факторов имеют случайный характер. Из изложенного ясно, что скорость звука в



воде, которая в значительной степени определяет и другие характеристики его распространения, подвержена систематическим и случайным изменениям.

Существенное влияние на процесс распространения звуковых волн, особенно на мелководье, оказывают границы раздела вода—воздух и вода—грунт. Отражение звука возможно также на границе раздела пресной и соленой воды в устьях рек. Скорость затухания звуковых волн зависит от частоты колебаний. Для гидроакустического канала связи характерен высокий уровень шумов в широком диапазоне частот. Эти шумы могут быть как естественного, так и искусственного происхождения.

Перечисленное многообразие явлений и факторов затрудняет строгий анализ и расчет гидроакустического канала связи. Как правило, большинство расчетов производится по средне-статистическим параметрам, полученным на основе многочисленных экспериментальных данных.

Характер изменения интенсивности звука при распространении в воде определяется поглощением, расширением фронта волны и рассеянием. Для морской воды коэффициент поглощения с учетом рассеяния больше, чем для пресной. В реках взвешенные частицы значительно увеличивают поглощение и рассеяние звука. Расширение фронта волны происходит в основном по сферическому закону.

Водоем как звукопроводящая среда характеризуется резко выраженными неоднородностями, изменяющимися как в пространстве, так и во времени. В результате взаимодействия с этими неоднородностями звуковые волны распространяются по криволинейным траекториям (явление рефракции), образуя зоны тени и фокусировки, а также зоны преимущественного распространения — волновые каналы. Образование этих зон обусловлено непостоянством скорости звука, связанным с изменениями солености, температуры и гидростатического давления.

Вертикальное распределение скорости звука в общих чертах соответствует сезонным изменениям температуры и солености, но на эти закономерные изменения часто накладываются случайные.

Обычно выделяют следующие типичные случаи вертикального распространения скорости звука [96]: практически постоянная скорость звука по всей глубине, возрастание скорости звука с глубиной, резкое уменьшение скорости звука с глубиной в поверхностном слое с последующим медленным уменьшением в глубинных слоях, уменьшение скорости звука с глубиной в поверхностном слое с последующим увеличением в глубинных слоях.

Первый тип распределения скорости звука встречается на мелководье в зимнее и осеннее время года, когда в результате охлаждения водоема более холодная (более плотная) вода опускается с поверхности в глубинные слои, а теплая поднимается вверх.

Второй тип распределения скорости звука встречается в глубоководных районах при циркуляции водных масс, когда наряду с температурой и соленостью существенное значение приобретает изменение гидростатического давления.

Для первых двух типов распределения, несмотря на распространение звуковых волн по криволинейным траекториям, создаются благоприятные условия приема гидроакустических сигналов в приповерхностном слое воды, где может образовываться приповерхностный звуковой канал и происходить концентрация звукового поля.

Третий тип вертикального распределения скорости звука наблюдается в летнее и весеннее время года, когда вода прогревается на небольшую глубину. Эти неблагоприятные условия существенно уменьшают дальность действия гидроакустических систем.

Четвертый тип распределения встречается в тех глубоководных участках океана, где при определенной стратификации температуры под воздействием давления и глубинных течений возникают глубоководные звуковые каналы, по которым низкочастотные звуковые колебания проходят большие расстояния без существенных потерь.

В реальных условиях распространение звука происходит сразу по нескольким траекториям, одна из которых, как правило, является преобладающей. При таком многолучевом распространении возникает несколько видов потерь энергии, зависящих от заглубления источника и приемника звука, а также от помех в толще воды и на границах раздела сред с разным акустическим сопротивлением. Следует отметить, что многолучевое распространение представляет собой существенную помеху для передачи информации по гидроакустическому каналу связи, приводящую к флуктуациям не только амплитуды, но и фазы сигнала.

Рассеивание акустических волн может возникнуть также на границе раздела поверхности моря и поверхности дна. При прохождении границ раздела часть энергии акустических волн отражается, часть поглощается, а часть рассеивается на неоднородностях границ раздела. Рассеянная часть энергии создает реверберационную помеху, которая в отличие от шумовой практически полностью проходит в усилительный тракт при-

емной аппаратуры. Реверберация является основным видом помех при определении местоположения гидробионтов гидролокационными средствами. В тех случаях, когда источник излучения малой мощности устанавливается непосредственно на гидробионтах, влиянием реверберационной помехи можно пренебречь.

Для гидроакустического канала связи характерен высокий уровень шумов, существенно превышающий собственные шумы входных каскадов приемной аппаратуры. Выделяют несколько областей шумов: область I (ниже 1 кГц) характеризуется шумами, обусловленными гидростатическими и сейсмическими явлениями; область II характеризуется шумами, обусловленными турбулентными явлениями в толще воды; область III соответствует шумам, вызванным движением судов; область IV отображает так называемый Кнудсеновский спектр (шумы, обусловленные состоянием поверхности водоема и силой ветра); область V — кавитационные и тепловые шумы.

При работе гидроакустической аппаратуры в районах интенсивного судоходства основную помеху создают шумы искусственного происхождения (от машин, винтов, корабельного оборудования) и гидродинамические шумы обтекания корпуса. Во внутренних водоемах основным источником помех становятся моторные лодки, быстроходные катера и суда на подводных крыльях.

В качестве примера на рис. 2 изображены спектры шумов, создаваемых 15-метровым траулером (а), 7-метровым катером (б), стеклопластиковыми лодками длиной 4—5 м с подвесными моторами мощностью 50 л. с. (в), 9 л. с. (г) и 6 л. с. (д), а также резиновой лодкой с мотором мощностью 6 л. с. (е).

Из рисунка видно, что при биотелеметрических исследованиях лучше пользоваться небольшими судами из стеклопластика или резиновыми лодками.

**Гидроакустические антенны.** В гидроакустическом канале связи генерацию упругих волн в передатчике, а также их прием и преобразование в электрические сигналы на приемной стороне осуществляют гидроакустические антенны. Основным элементом этих антенн — электроакустические преобразователи. Наиболее широкое применение в гидроакустических антеннах нашли обратимые магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи, способные осуществлять преобразование электрической энергии в акустическую, и наоборот.

Действие магнитострикционных преобразователей основано на эффекте деформации (сжатие—растяжение) ферромагнитных материалов, помещенных в магнитное поле. Если это поле

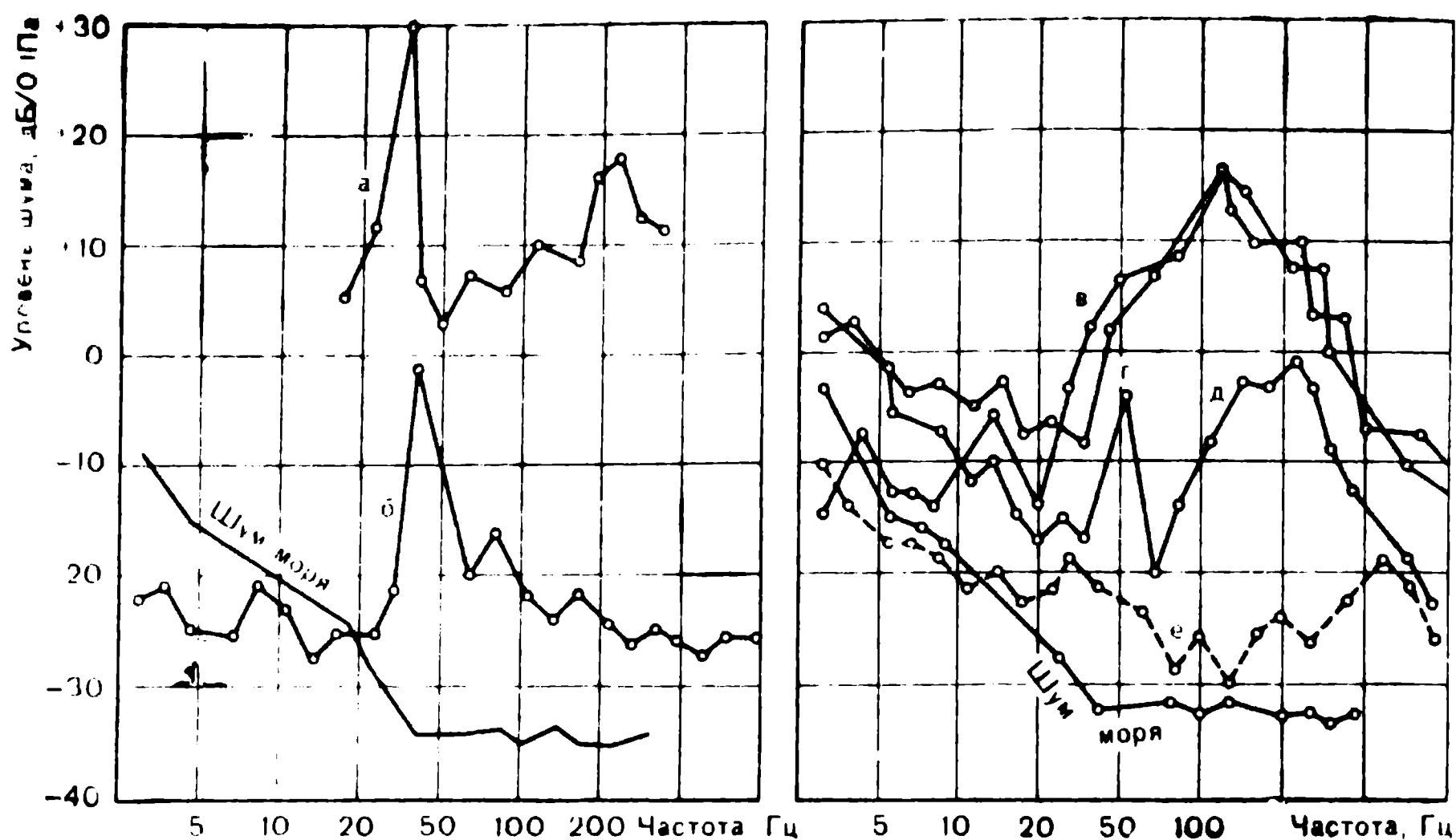


Рис. 2. Спектр шумов, создаваемых малыми металлическими судами и моторными лодками (расстояние от источника шума 30 м) [237].

переменно во времени, то деформации материала вдоль силовых линий поля могут быть переданы среде, в результате чего в этой среде создается звуковое поле. Обратный магнитострикционный эффект состоит в изменении магнитных свойств ферромагнетиков (прежде всего их магнитной проницаемости) под воздействием упругих деформаций, обусловленных звуковым полем. Магнитострикционные преобразователи применяются в основном в тех случаях, когда необходимо излучение большой мощности, а габариты и масса излучающих систем не столь важны.

Принцип действия пьезоэлектрических преобразователей основан на эффекте деформации некоторых естественных и синтетических материалов (кварца, титаната бария, цирконата—титаната—свинца и др.) под воздействием электрического поля. Это явление называется электрострикцией и лежит в основе генерации упругих волн изменяющимся во времени электрическим полем [109].

Как правило, электрострикторы обладают и пьезоэлектрическими свойствами, проявляющимися в том, что под воздействием звукового поля в пьезоэлектриках возникает переменная во времени электрическая поляризация. Конструктивно пьезоэлектрические преобразователи оформляются в виде стерж-

ней, пластин разнообразной формы, а также цилиндров и сфер (в том числе тонкостенных).

Гидроакустические антенны кроме собственно преобразователя включают ряд вспомогательных узлов, арматуру и обтекатели, снижающие шумы при перемещении конструкции относительно среды.

Гидроакустические антенны характеризуются рядом параметров, важнейшими из которых являются диаграмма направленности и коэффициент концентрации, отражающие пространственную избирательность, чувствительность, электроакустический коэффициент полезного действия, сопротивление излучения, эффективную добротность и другие свойства прибора [31, 105, 115, 228, 235].

Указанные параметры существенно зависят от геометрической формы и материала пьезоэлектрического преобразователя, а также от конструкции антенны, определяющей способ закрепления преобразователя и его связь со средой. В подводной биотелеметрии обычно применяют относительно несложные по конструкции приемные и излучающие антенны. В качестве излучающих антенн, устанавливаемых на гидробионтах, используют в основном пустотелые цилиндры, обладающие незначительным коэффициентом концентрации.

В приемных антеннах часто применяют плоские диски и прямоугольные пластины, а также пустотелые цилиндры с коническими рефлекторами. В тех случаях, когда требуется ненаправленный прием, используют пустотелые цилиндры или сферы.

Простейшим видом направленных антенн являются плоские дисковые с «круглым раскрывом», диаграммы направленности которых изображены на рис. 3.

Плоская антенна может быть выполнена не только в виде круга, но и в виде прямоугольника, квадрата, треугольника или ромба.

В ряде случаев для создания направленных приемных антенн используются цилиндрические пьезоэлементы. В этих антеннах направленность приема (излучения) достигается либо в результате соответствующего взаимного положения чувствительных элементов, работающих на общую мембрану, либо применением пассивных отражателей. Вторым вариантом отличается простотой и малыми габаритами. Считается, что антенны с пассивными отражателями (в частности, с отражателями в форме конуса) целесообразно применять в тех случаях, когда требуется получить ~~узконаправленное~~ ~~излучение~~ (угол менее  $15^\circ$ ).

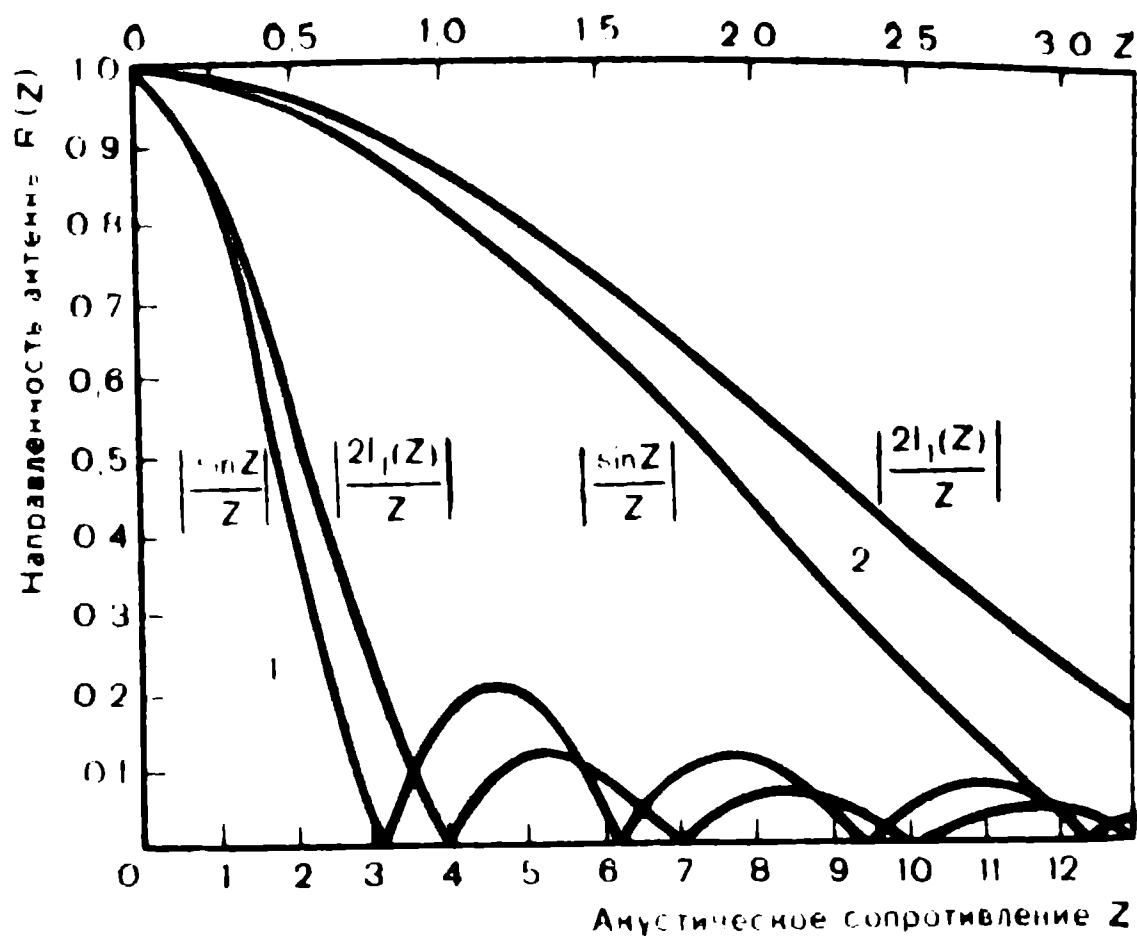


Рис. 3. Диаграммы направленности пьезоэлектрических антенн в форме дисков (1) и квадратов (2) [63]. Масштаб для кривых 2 нанесен сверху.

**Элементы расчета пьезоэлектрических преобразователей для гидроакустических антенн.** Для анализа и расчета пьезоэлектрических преобразователей обычно применяют метод эквивалентных схем, основанный на электромеханических аналогиях. Как правило, для систем подводной биотелеметрии используют серийные преобразователи с известными геометрическими размерами, выполненные из известного материала. Принцип расчета заключается в вычислении параметров эквивалентной схемы с целью определения основных характеристик излучения и оптимального согласования преобразователя с выходным каскадом передатчика или входным приемника.

Не вдаваясь в детали измерений и расчета эквивалентной схемы, изложенные в литературе [63], остановимся на некоторых моментах нахождения электроакустических параметров цилиндрических преобразователей.

По линейным измерениям пьезоматериала определяются высота цилиндра  $H$ , его внешний  $D$  и средний  $D_{ср}$  диаметры, толщина стенки  $\Delta$ , площадь излучающей поверхности  $S_{изл}$  и плотность  $\rho$ .

По данным эксперимента находятся частоты резонанса  $f_p$  и антирезонанса  $f_a$ , по которым определяются скорость звука ( $c$ ) в пьезоматериале и динамический коэффициент электро-механической связи  $k_{31}$ . Последний характеризует эффект преобразования энергии в пьезоматериале без учета потерь

$$c = \pi D_{ср} / \rho; \quad k_{31} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_p^2}{f_a^2}}.$$

Далее находим коэффициент трансформации  $n$

$$n = 2\pi d_{31} E_{10} H,$$

где  $d_{31}$  — поперечный пьезомодуль;

$E_{10}$  — модуль упругости при поперечном пьезоэффекте

Добротность  $Q$  пьезоматериала вычисляется по формуле

$$Q = \frac{2\pi m f_p \eta}{R_S},$$

где  $\eta$  — акустический к. п. д. (обычно равен 0,6—0,8);

$R_S$  — активная составляющая сопротивления излучения;

$m$  — масса пьезоматериала.

Акустическая мощность в полосе частот  $W_a$  определяется из уравнения

$$W_a = \left( \frac{u_m n \eta}{2R_S} \right)^2 \left[ 1 + Q^2 \left( \frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right)^2 \right]^{-1},$$

где  $f$  — задаваемая частота;

$u_m = u \sqrt{\frac{1}{2}}$  — амплитуда возбуждающего напряжения.

Звуковое давление  $p$ , создаваемое преобразователем на максимуме диаграммы направленности на расстоянии  $r$ , равно

$$p = \sqrt{\frac{W_a K R_S}{4\pi r^2 S_{нал}}},$$

где  $K$  — коэффициент концентрации, характеризующий отношение акустической мощности антенны к мощности излучения ненаправленного источника. По нему рассчитываются диаграммы направленности пьезоматериала.

Расчет чувствительности  $\gamma$  цилиндрического преобразователя в режиме приема производится следующим образом:

$$\gamma = \frac{36 \cdot 10^9}{\epsilon} \sqrt{\frac{2\lambda_0}{D}} \cdot \frac{f_p}{f} \frac{\Delta \rho_0 c d_{31} \eta}{\rho_0 c_0} \left[ 1 + Q \left( \frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость пьезоматериала;

$\rho_0$  — плотность;

$c_0$  — скорость распространения звука в воде;

$\lambda_0$  — длина волны в воде.

Приведенные соотношения позволяют рассчитать основные характеристики гидроакустических приемных и излучающих антенн, чувствительные элементы которых имеют относительно простые геометрические формы (диска, пластины, пустотелого цилиндра). Из этих соотношений видно, что такие важные параметры антенны, как диаграмма направленности, чувствительность в полосе частот, коэффициент концентрации, зависят прежде всего от геометрических размеров антенны.



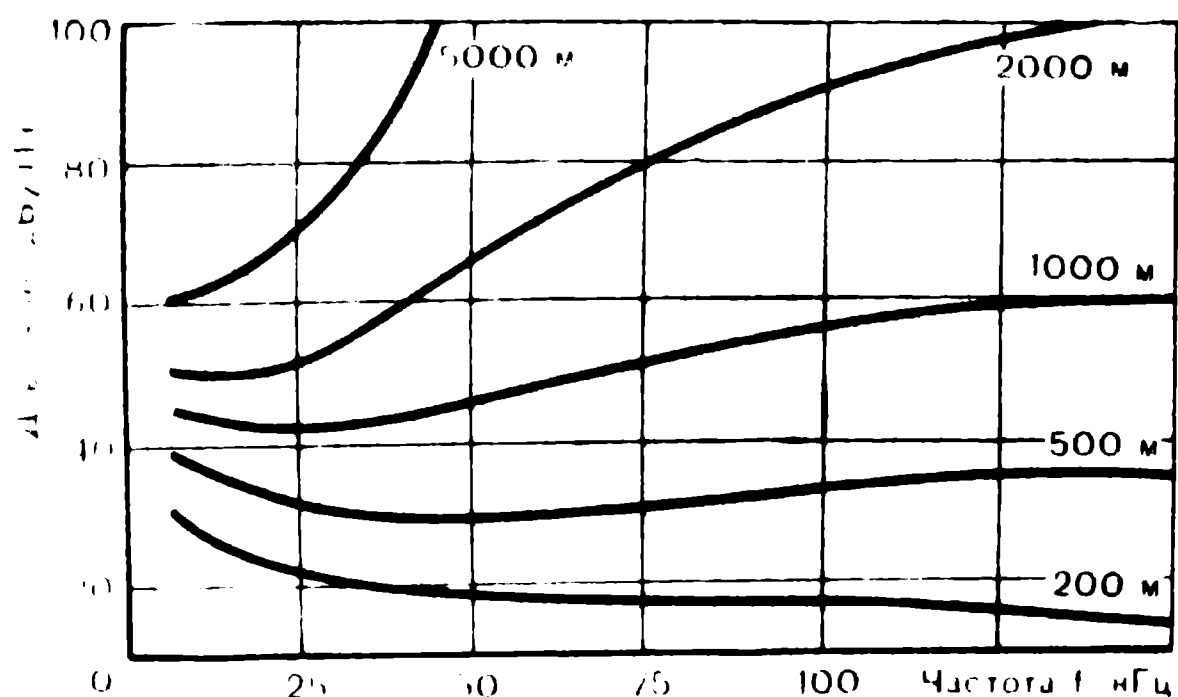


Рис. 4. Частотная характеристика давления, создаваемого излучателем [147].

Дальность действия излучающих антенн при выбранных геометрических размерах зависит от подводимой электрической мощности, электромеханического и механико-акустического к. п. д., а также от рабочей частоты. В принципе существуют такие частоты, при которых обеспечивается заданная дальность при минимизации излучаемой мощности.

После вычисления оптимальной частоты при выбранной дистанции необходимо рассчитать требуемую излучаемую мощность, обеспечивающую заданное превышение сигнала над шумом при выбранной интенсивности шумов и полосе пропускания приемного тракта.

На рис. 4 изображены зависимости звукового давления, которое должен создавать излучатель, от частоты при уровне шумов, соответствующих волнению моря 2 балла (по Кнудсену) и полосе частот приемного тракта 1 кГц. Из этих зависимостей видно, что оптимальные частоты, обеспечивающие дальность связи примерно 1—2 км при приемлемых значениях звукового давления лежат в диапазоне 50—100 кГц. Именно этот частотный диапазон реализуется в большинстве описанных в литературе подводных биотелеметрических систем.

### Электромагнитные линии связи

Электромагнитные линии связи нашли широкое применение для передачи информации в околоземном и космическом пространстве в огромном диапазоне частот (радиотелеметрия) [10, 100]. В подводной биотелеметрии также стремятся использовать электромагнитные колебания в качестве агента-переносчика информации.

К сожалению, в водной среде электромагнитные колебания значительно затухают в области высоких частот, а исследуемые



объекты-гидробионты, как правило, недостаточно велики, чтобы нести на себе громоздкие излучающие устройства длинноволнового диапазона. Несмотря на это, электромагнитные колебания как переносчик информации все чаще применяются в подводной биотелеметрии [150, 188, 189, 210]. В этой связи представляется целесообразным оценить возможности электромагнитной линии связи для решения задач подводной телеметрии и рассмотреть некоторые вопросы, связанные с распространением электромагнитных колебаний в водной среде.

Известно, что электрическая  $E$  и магнитная  $H$  составляющие поля плоской монохроматической волны в среде с проводимостью, отличной от нуля, определяются следующими выражениями [23]:

$$H = H_0 e^{-kz}; \quad E = z_B H_0 e^{-kz},$$

где  $k = \beta + \alpha x$  — коэффициент распространения волны в среде;  
 $\beta$  — коэффициент, характеризующий затухание при распространении электромагнитной волны;  
 $\alpha$  — постоянная, характеризующая фазовую скорость волны;  
 $z_B$  — волновое число.

Постоянные  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $z_B$  в общем случае являются комплексными величинами, зависящими от магнитной проницаемости среды  $\mu$ , диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , электропроводности среды  $\sigma$ , а также от частоты электромагнитных колебаний  $\omega$ .

Для гидросреды  $\mu \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $\epsilon \approx 7 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ ; электропроводность воды изменяется в очень широких пределах от  $10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  для горных озер и рек ледникового происхождения до  $(1 \div 3) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  для морской воды. Известны следующие зависимости:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2} \sqrt{\sigma^2 + \epsilon^2\omega^2} - \frac{\mu\epsilon\omega^2}{2}};$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2} \sqrt{\sigma^2 + \epsilon^2\omega^2} - \frac{\mu\epsilon\omega^2}{2}}.$$

Из приведенных формул видно, что при  $\sigma \rightarrow 0$ ,  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $\beta \rightarrow \omega \sqrt{\mu\epsilon}$ ; при  $\omega \rightarrow \infty$ ,  $\alpha \rightarrow \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ ,  $\beta \rightarrow \omega \sqrt{\mu\epsilon}$ . Зависимость коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  от частоты изображена на рис. 5 и 6.

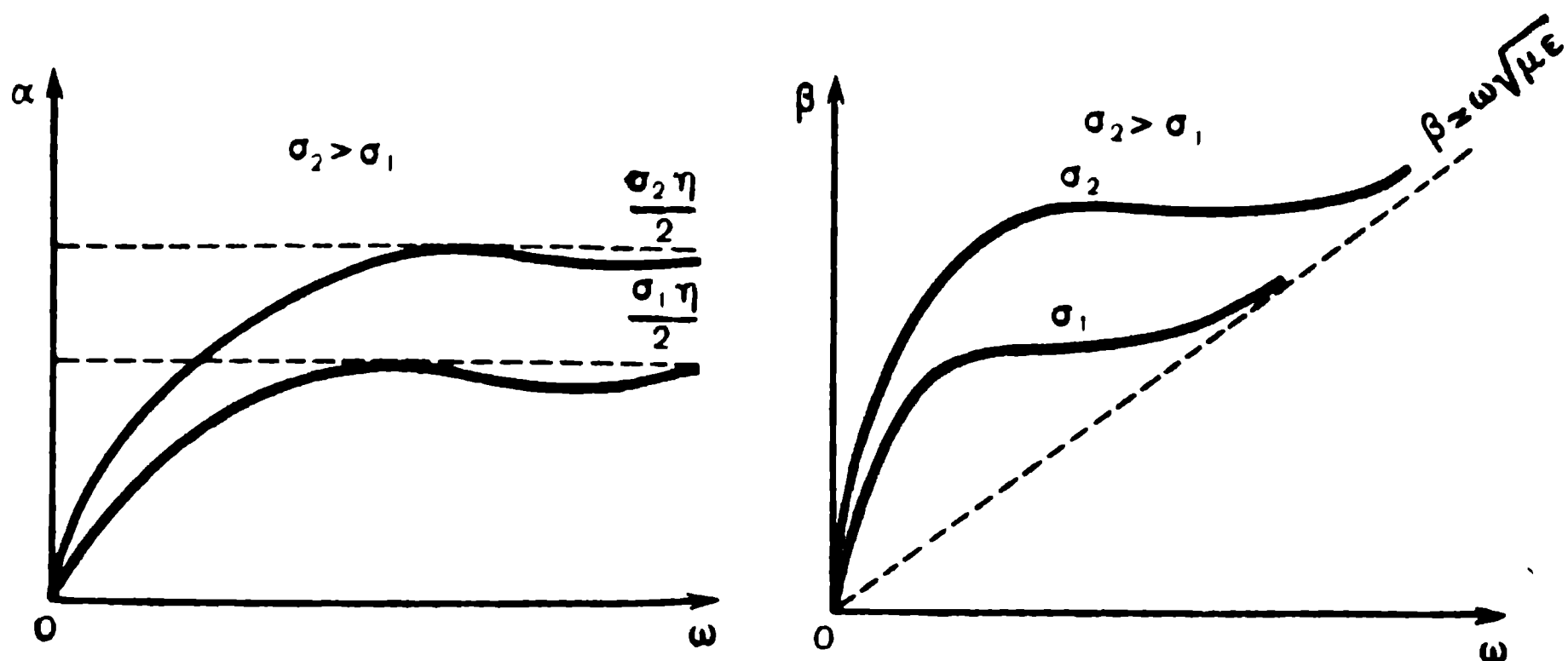


Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания электромагнитной волны от частоты при различных значениях проводимости среды.

Рис. 6. Зависимость фазовой скорости электромагнитной волны от частоты при различных значениях проводимости среды.

Из изложенного ясно, что для высоких частот ( $\omega \rightarrow \infty$ ) затухание электромагнитных волн не зависит от частоты, а фазовая скорость — от проводимости. Количественно это начинает подтверждаться на частотах примерно  $10^8$  Гц. Для этого диапазона частот  $\epsilon\omega \gg \sigma$ ,  $\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$  и  $\beta \approx \omega \sqrt{\mu\sigma}$ .

Оценим значение коэффициента затухания в морской и пресной воде. Для морской воды при электропроводности  $(0,5 \div 2) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  в частотном диапазоне десятков мегагерц коэффициент затухания в соответствии с приведенной выше формулой будет составлять приблизительно  $(100 \div 120) \text{ дБ} \cdot \text{м}^{-1}$ . Столь высокое значение коэффициента затухания чрезвычайно затрудняет практическое использование электромагнитной линии связи в морской воде. Дистанция контакта оператора с биологическим объектом, несущим радиопередатчик в морской воде, редко превышает несколько десятков метров. Коэффициент затухания для пресной воды существенно меньше. Для пресной воды с электропроводностью  $10^{-1} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  на частотах, превышающих единицы мегагерц, коэффициент затухания составляет примерно  $1,3 \text{ дБ} \cdot \text{м}^{-1}$  и практически не зависит от частоты.

Несмотря на то что затухание электромагнитных колебаний даже в пресной воде почти на два порядка больше затухания акустических колебаний в частотном диапазоне десятков килогерц, использование электромагнитной линии связи в подводной биотелеметрии весьма перспективно. Это обусловлено

прежде всего возможностью применения относительно портативной и недорогой КВ и УКВ радиоприемной аппаратуры, серийно выпускаемой промышленностью. Кроме того, использование электромагнитной линии связи позволяет располагать приемную аппаратуру на береговых базах, что создает дополнительные возможности отбора и обработки информации и снижает стоимость эксплуатационных затрат.

Практически достигнутая дальность контакта с подводным биологическим объектом, несущим радиопередатчик диапазона 100 мГц, в пресной воде составляет несколько сотен метров при глубинах погружения до 10 м. Однако уже разрабатываются радиотелеметрические системы, позволяющие получать телеинформацию с дистанции до 0,6 км при погружении меченого гидробионта на глубину до 45 м [180].

Как уже отмечалось, пресная вода представляет собой диэлектрик с весьма высокой диэлектрической проницаемостью. Это обстоятельство имеет важное значение для подводной биотелеметрии, обеспечивая возможность создания относительно малогабаритных антенн с высокой излучающей способностью. В подводной биотелеметрии обычно применяются простейшие типы излучающих антенн: линейная, рамочная и соленоидальная. Важной характеристикой перечисленных излучающих антенн является величина сопротивления излучения, характеризующая излучаемую антенной мощность.

Сопротивление излучения может быть найдено по следующим формулам:

для линейной антенны

$$R_L = \frac{1}{6\pi^2} \mu \epsilon^{\frac{1}{2}} (\omega l)^2;$$

для рамочной антенны

$$R_R = \frac{1}{6\pi} \mu^{\frac{5}{2}} \epsilon^{\frac{3}{2}} (\omega a)^4,$$

где  $l$  — длина линейной антенны;  
 $a$  — радиус рамочной антенны.

Излучения, создаваемые линейной и рамочной антеннами, имеют явно выраженную поляризацию. Антенна соленоидального типа представляет собой комбинацию линейной и рамочной антенн. Поляризация соленоидальной антенны имеет эллиптический характер [5, 8].

Итак, анализ физических принципов локации показывает, что в современных системах подводной биотелеметрии используются два канала связи: радио- и ультразвуковой. Каждый ка-

нал имеет свои преимущества и ограничения. Радиотелеметрические системы нашли широкое применение в наземной, особенно космической и медицинской, радиотелеметрии; они обеспечивают длительный срок надежной работы за счет малого потребления энергии. Наиболее существенное их ограничение — значительное поглощение радиосигнала водной средой. Ультразвуковая телеметрия, обеспечивая достаточный радиус действия, требует сложных разработок. Радиозвуковой канал связи получил распространение преимущественно в эколого-физиологических исследованиях, ультразвуковой — при изучении перемещений рыб в натуральных условиях. Это, однако, не значит, что радиотелеметрия не может быть использована для исследования поведения рыб непосредственно в водоемах. Более того, в определенных ситуациях, например в порожистых реках, у водопадов, где имеется множество звуковых помех, она просто незаменима. В то же время ультразвуковой канал может быть использован для получения информации об окружающей среде и физиологических параметрах меченой рыбы.

Отсюда следует, что выбор типа системы подводной биотелеметрии для изучения различных аспектов биологии водных животных определяется конкретными условиями эксперимента, задачей исследования и аппаратурными возможностями.

В ряде случаев возможно одновременное использование обоих каналов связи. В гибридных системах по радиоканалу идет информация о состоянии меченого объекта, а ультразвуковой канал обеспечивает надежное обнаружение этого объекта на больших акваториях.

## **СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ БИОТЕЛЕМЕТРИИ**

Полный набор технических средств биотелеметрии в настоящее время включает: ассортимент передатчиков-меток, комплекты приемной аппаратуры со сканирующим сонаром или гидролокатором горизонтального действия, рыбопоисковые эхолоты, секстаны или радиопеленгаторы местоположения судна-спутника, радиостанции для связи между судами-спутниками и береговыми станциями, набор средств для бесшокового мечения рыбы, комплект гидроизмерительных приборов с шумопеленгатором, гидрокаппаметры — измерители течений, освещенности, электропроводности, температуры воды и химические газоанализаторы, набор экологических картосхем участков наблюдений, навигационную карту водоема, журналы оперативной работы, орудия лова для первичного и повторных отловов рыбы.

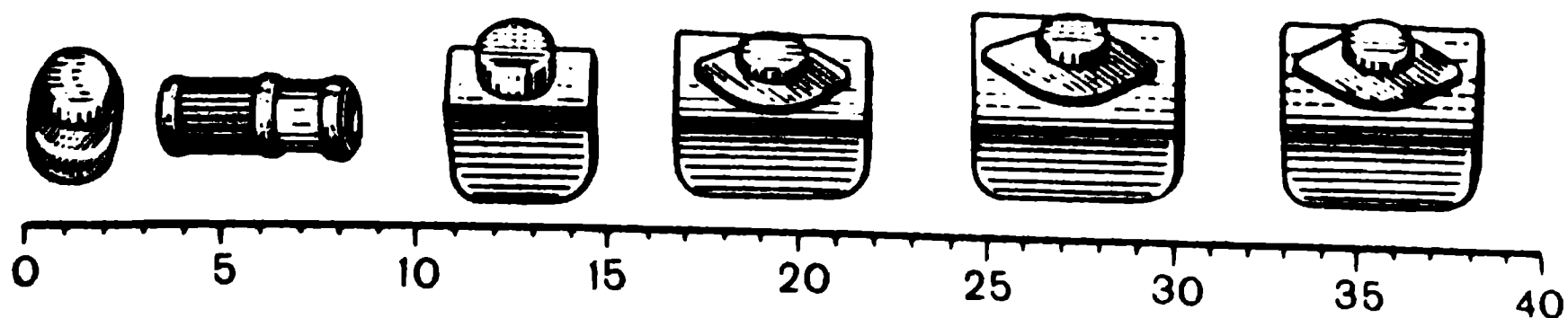


Рис 7. Внешний вид и размеры ультразвуковых передатчиков.

Основу набора составляют передатчики (рис. 7) и приемные устройства, позволяющие получать репрезентативные данные о поведении и состоянии меченого объекта. Совмещение приемника ультразвуковых (или комбинированных радио- и ультразвуковых) сигналов метки с гидролокатором обеспечивает определение местоположения меченых рыб относительно стай или скоплений немеченых особей, вида и повышает информативность биотелеметрических наблюдений.

Остальные технические средства предназначены для снятия необходимых фоновых характеристик среды и повышения эффективности работы оператора.

### Передатчики-метки

По назначению передатчики можно разделить на простые (маркерные), приемоответчики, комбинированные радиогидроакустические и информационные, т. е. несущие информацию об одном или нескольких параметрах среды или физиологическом состоянии рыбы [184, 205, 211, 249]. Деление это условное, поскольку один и тот же передатчик может быть, например, приемоответчиком и нести информацию о температуре воды или тела животного.

**Простые (маркерные) передатчики.** Основным информативным показателем простых передатчиков является наличие сигнала. Этот сигнал не несет никакой закодированной информации и служит только для определения местоположения меченого объекта. Эти передатчики в настоящее время наиболее широко применяются в биотелеметрических рыбохозяйственных исследованиях.

При выборе электрической схемы простого передатчика руководствуются рядом требований. Задающие генераторы передатчиков должны обеспечить устойчивую генерацию высокочастотных колебаний в условиях действия таких дестабилизирующих факторов, как изменение температуры воды (примерно

$\pm 10^\circ \text{C}$ ), напряжения (до 20%) и внутреннего сопротивления источника питания, которое в процессе разряда батареи может увеличиваться в несколько раз. Достаточно высокие требования и к стабильности несущей частоты:  $10^{-4}$  — для передатчиков, работающих в радиодиапазоне, и  $5 \cdot 10^{-3}$  — в диапазоне ультразвуковых частот.

Для обеспечения экономичности и уменьшения габаритов генератор передатчика должен работать в режиме малых токов (0,1—0,5 мА) при низком напряжении питания (1,5—4,58 В). В ряде случаев, например при разработке информационных передатчиков, к генератору несущей частоты предъявляются дополнительные требования, в частности управление частотой или обеспечение стабильной генерации в импульсном режиме при управляемой скважности.

Известен ряд сравнительно простых схем генераторов, практически удовлетворяющих сформулированным выше требованиям (рис. 8). Все они обладают примерно одинаковыми метрологическими характеристиками. Выбор той или иной схемы определяется конкретными условиями решаемой задачи. Типовые значения стабильности частоты генераторов составляют примерно 0,1—0,2% при изменении напряжения питания на  $\pm 10\%$  и температуры на  $\pm 10^\circ \text{C}$ . При работе в радиодиапазоне частота генератора стабилизируется кварцем. Методика инженерного расчета вариантов электрических схем генераторов с кварцевой стабилизацией частоты подробно разработана и изложена в соответствующей литературе [86].

В передатчиках, предназначенных для определения местоположения объекта, целесообразно применение импульсного режима работы [24]. Такой режим обеспечивает прежде всего снижение среднего энергопотребления, что при заданной энергоемкости батареи питания увеличивает срок службы передатчика. Кроме того, период повторения импульсов может служить информационным признаком, позволяющим идентифицировать данный объект при одновременной работе нескольких передатчиков, а также может быть эффективно использован как информационный параметр при дистанционном измерении параметров среды обитания объекта (температуры воды, глубины и др.) или физиологических показателей самого объекта (например, частоты сердечных сокращений).

Один из очевидных способов обеспечения импульсного режима — полная амплитудно-импульсная модуляция, осуществляемая с помощью ключевого устройства. Вариант разработанной нами схемы такого передатчика и его диаграммы напряжений изображены на рис. 9. Здесь отдельный генератор видео-

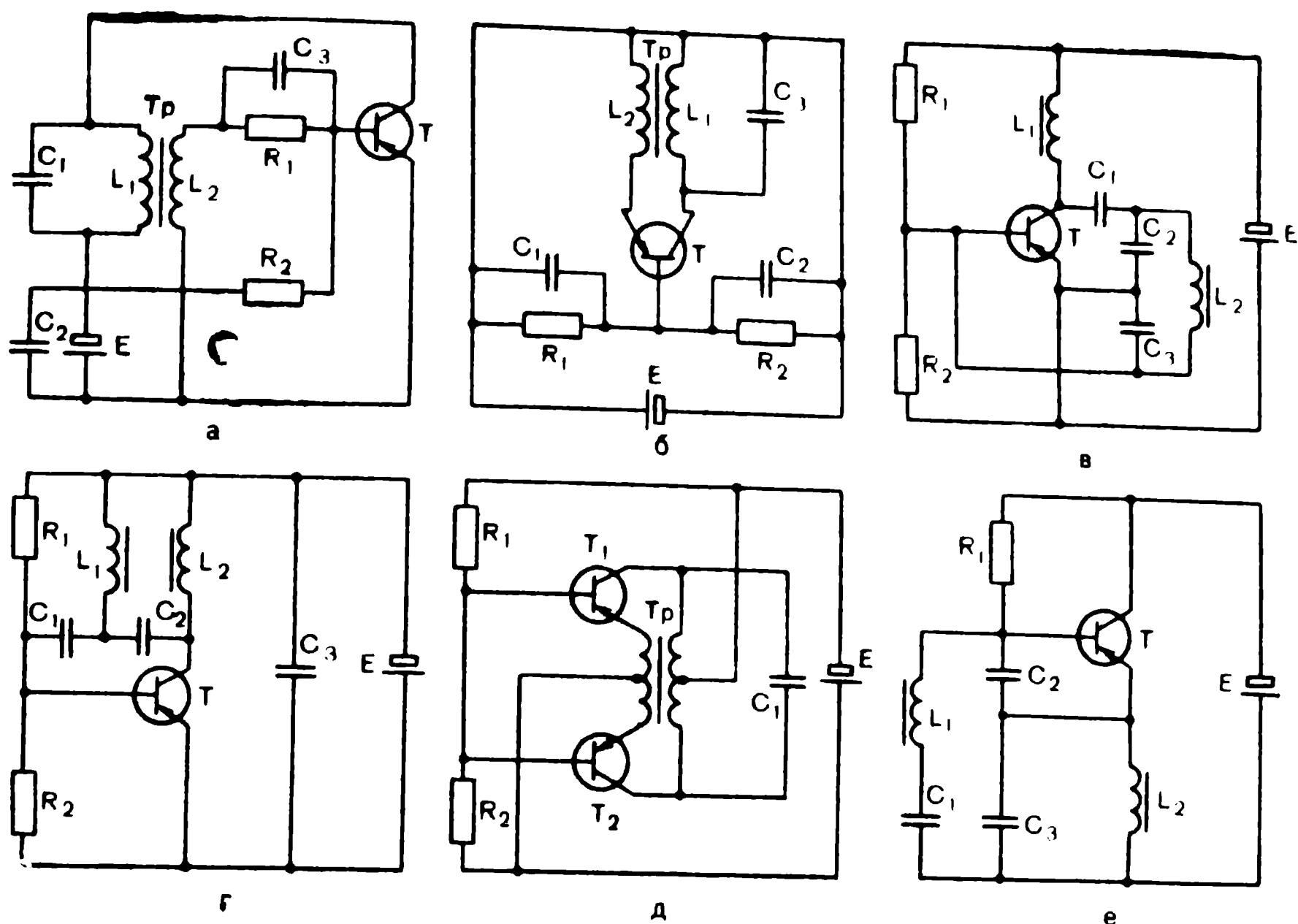


Рис. 8. Типовые схемы транзисторных генераторов несущей частоты:

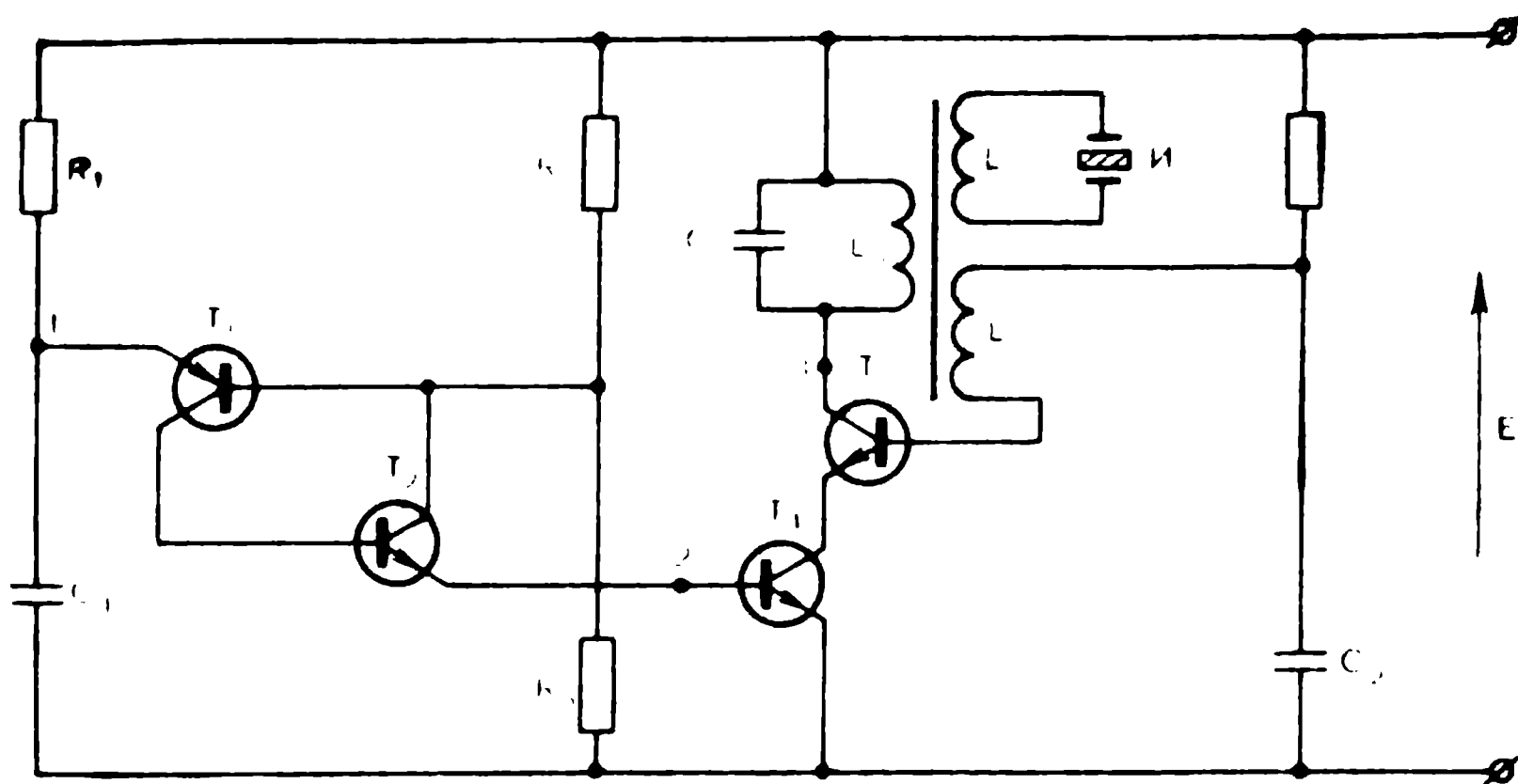
а, б — с трансформаторной обратной связью при включении транзистора с общим эмиттером и базой; в, г — на основе индуктивной и емкостной связи; д — на основе схемы Хартли; е — на основе схемы Клаппа.

импульсов собран на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$ . Генератор несущей частоты выполнен на транзисторе  $T_3$  по схеме с трансформаторной обратной связью. Транзистору  $T_4$  принадлежит роль ключа.

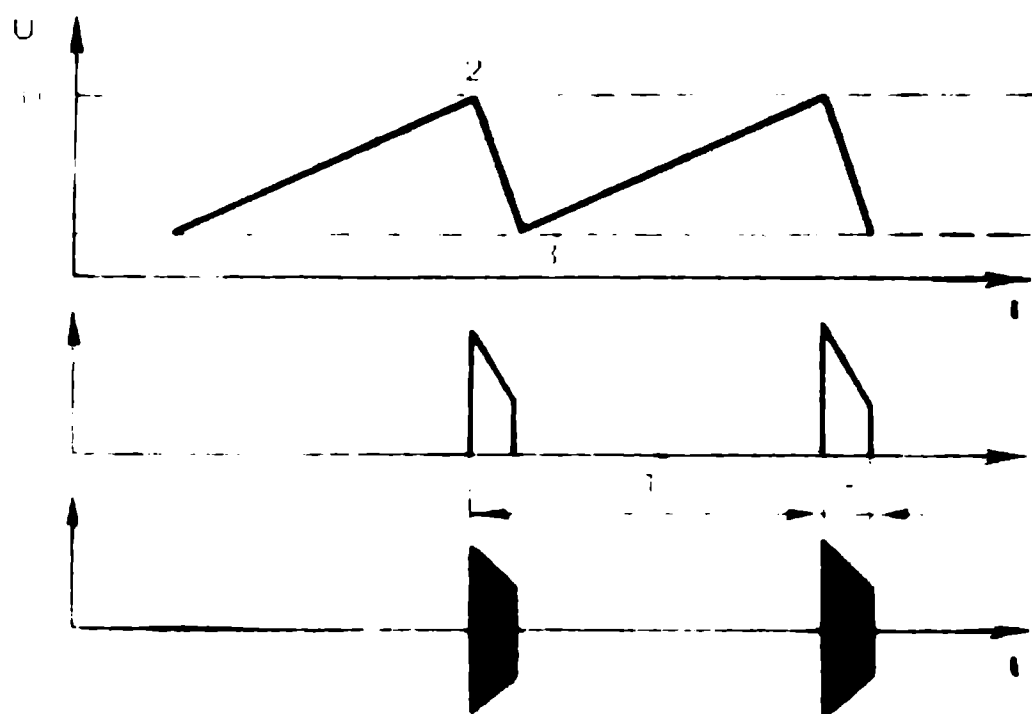
Период повторения импульсов  $T$  здесь определяется главным образом постоянной времени  $R_1 C_1$ , а их длительность — сопротивлением базово-эмиттерного перехода транзистора  $T_4$ . Разработан импульсный передатчик этого типа с повышенной стабильностью периода повторения импульсов [219].

Генератор видеоимпульсов этого передатчика собран по двухтактной схеме, сочетающей в себе хорошие метрологические характеристики с достаточно большой выходной мощностью. Он обладает весьма высокой стабильностью периода повторения: изменение периода составляет 0,05% при изменении напряжения питания на 10% и  $\pm 0,02\%$  — при изменении температуры на  $\pm 10^\circ \text{C}$ .

Стремление к повышению экономичности как по числу элементов, так и по потребляемой энергии отразилось в разработке таких схем импульсных передатчиков, в которых функции



а



б

Рис. 9. Генератор радио-импульсов, модулируемых генератором видеопульсов на основе управляющих  $p-n-p-n$  переключателей (а), и диаграммы напряжений (б) в характерных точках схемы.

переключающего устройства и генератора несущей частоты выполняются одним и тем же активным элементом. Один из вариантов схем таких передатчиков, наиболее распространенных в подводной биотелеметрии, показан на рис. 10.

Генератор передатчика здесь выполнен на транзисторе  $T_1$ , а усилитель мощности — на  $T_2$ .

Импульсный режим работы обеспечивается путем периодического самозапираания транзистора  $T_1$  по базе вследствие заряда времязадающего конденсатора  $C_1$  постоянной составляющей базового тока.

Период повторения импульсов  $T$  при заданном коэффициенте связи между коллекторной и базовой цепями и выбранном значении емкости конденсатора  $C_1$  определяется в основном значением резистора  $R_1$ , а длительность импульса  $\tau$  — значением резистора  $R_2$  [108].



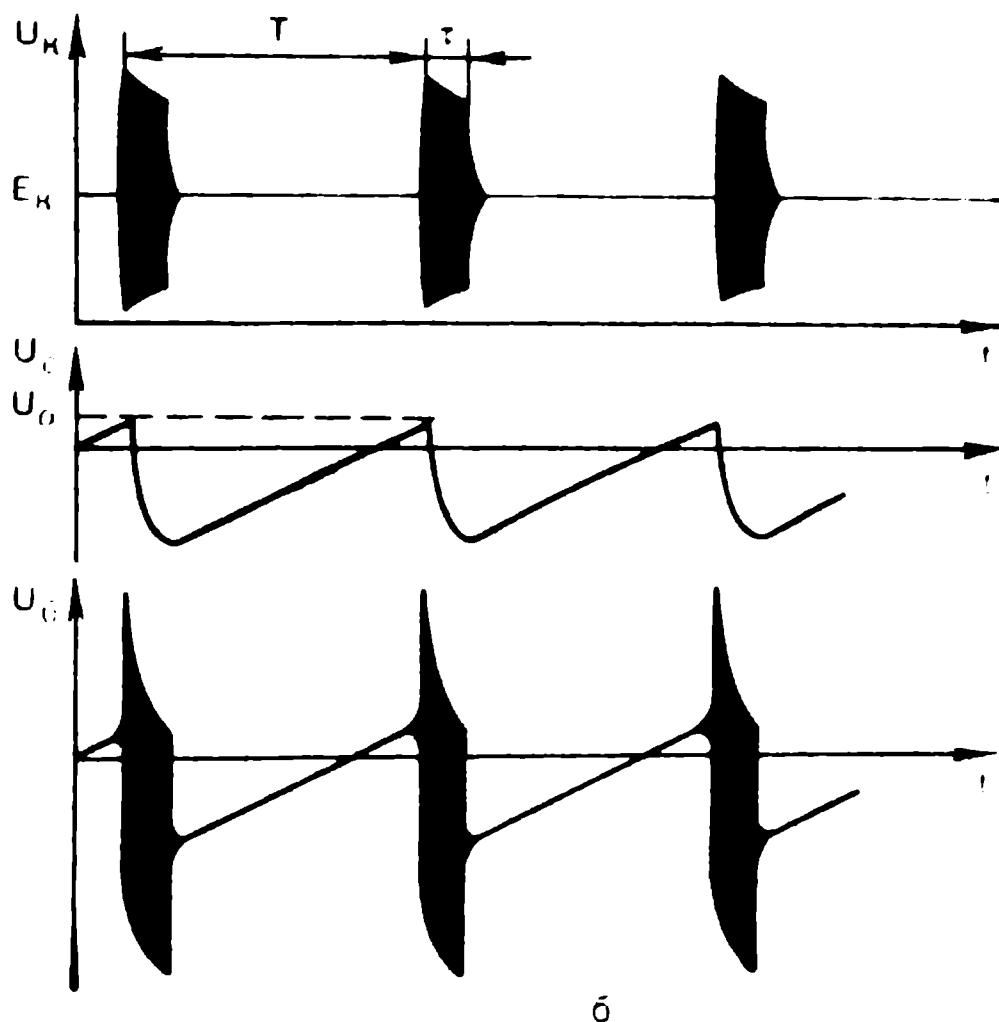
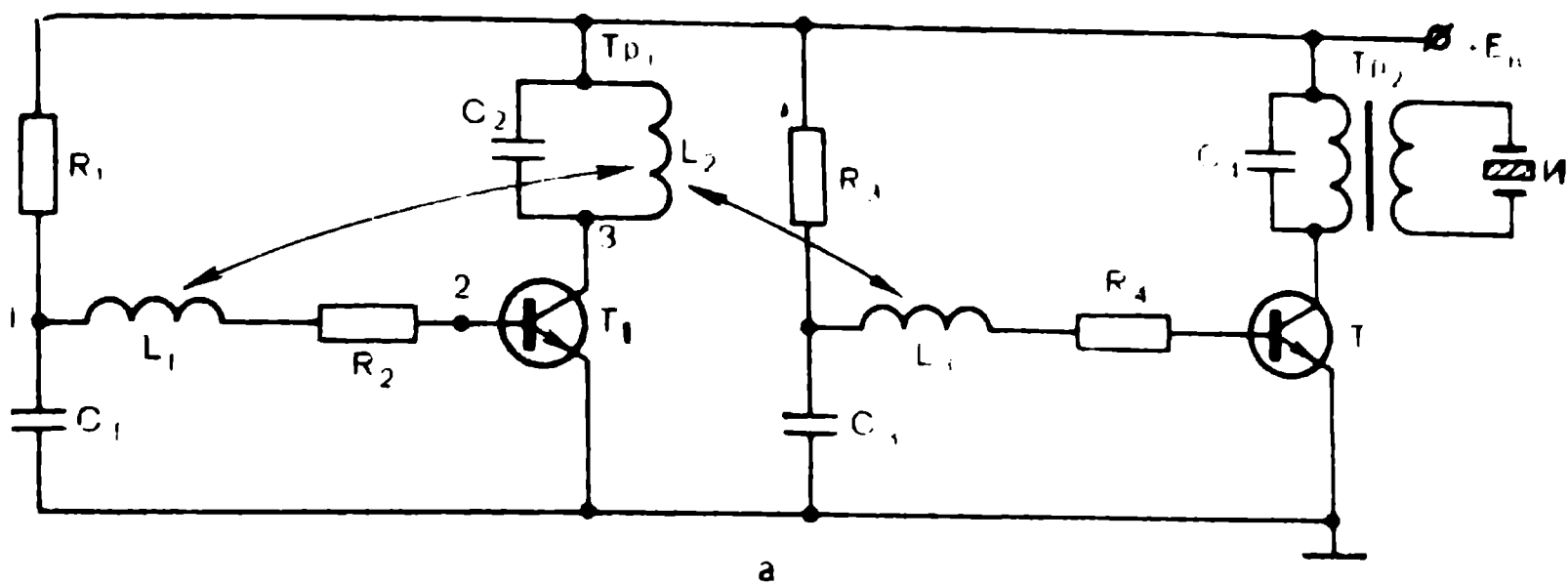


Рис. 10. Генератор радиоимпульсов с самозапира-нием [189], выполненный на основе схемы с трансформаторной обратной связью (а), и диаграммы напряжений (б) в характерных точках схемы.

Дальнейшее совершенствование маркерных передатчиков идет по пути ослабления зависимости частоты следования и длительности импульсов от изменения мощности, отдаваемой в нагрузку, а также их миниатюризации при сохранении хороших метрологических характеристик и сравнительно высокой излучаемой мощности.

**Приемоответчики (передатчики с переизлучением).** Одним из наиболее перспективных направлений развития подводной биотелеметрии является создание и применение систем связи с обменом сигналами между передатчиком, установленным на рыбе, и станцией сбора и обработки информации, находящейся в пункте наблюдения.

Такие системы, включающие в себя кроме аппаратуры двухсторонней связи специализированные ЭВМ и многоканальные регистраторы, позволяют не только следить за перемещениями

объекта, но и одновременно получать и оперативно обрабатывать разнообразную информацию об окружающей гидробионти среде, регистрировать расстояние до него, глубину следования и т. д. [184].

Важной частью системы с обменом сигналами является передатчик, в функции которого кроме сбора и передачи информации входят обеспечение приема сигнала запроса (вызова) и формирование сигнала ответа (переизлучения), в котором закодирована передаваемая информация. В зависимости от конкретных условий решаемой задачи вызов и переизлучение могут осуществляться на одной несущей частоте [205] или на разных частотах. Второй вариант создает возможность одновременной работы с группой передатчиков при сохранении селекции вызова и ответа для каждого из них.

Точность информации, передаваемой передатчиком с переизлучением, зависит прежде всего от точности используемых измерительных преобразователей и выбранного способа кодирования. В имеющихся системах с переизлучением информация о температуре окружающей среды передается, например, посредством частотной модуляции несущей. Практически достигнутая точность составляет  $\pm 0,2^\circ \text{C}$  в температурном диапазоне  $0-20^\circ \text{C}$  [184].

В качестве примера типового передатчика с переизлучением рассмотрим схему Р. Митсона и Т. Сторетон-Веста [205]. Эта схема (рис. 11) имеет следующие характеристики: чувствительность приемника 20 мкВ, чувствительность электроакустического преобразователя  $25 \cdot 10^{-5}$  В/Па, акустическая мощность излучения 70 Па/м, частота приема и излучения  $305 \pm 5$  кГц, энергоресурс при частоте посылок сигнала вызова 2 Гц и емкости батареи 85 мА·ч 50 ч. Суммарное усиление усилителя приемоответчика составляет 85 дБ, а ток покоя 300 мкА. Ток покоя генератора 12 мкА. Время работы в режиме ожидания порядка 300 ч.

К недостаткам этой схемы можно отнести излишнюю громоздкость, обусловленную наличием вспомогательных цепей, которые задают требуемую длительность ответного сигнала, разделение трактов приема и излучения и др. Для упрощения схемы нами применен ждущий генератор с самозапираанием, при этом необходимость во внешних времязадающих цепях отпадает. Несмотря на значительную сложность схемы, размеры передатчика весьма невелики: диаметр 1 см, длина 5 см и масса в воде около 4 г.

**Комбинированные радиогидроакустические передатчики.** В этих передатчиках реализуется предложенный нами пеленга-

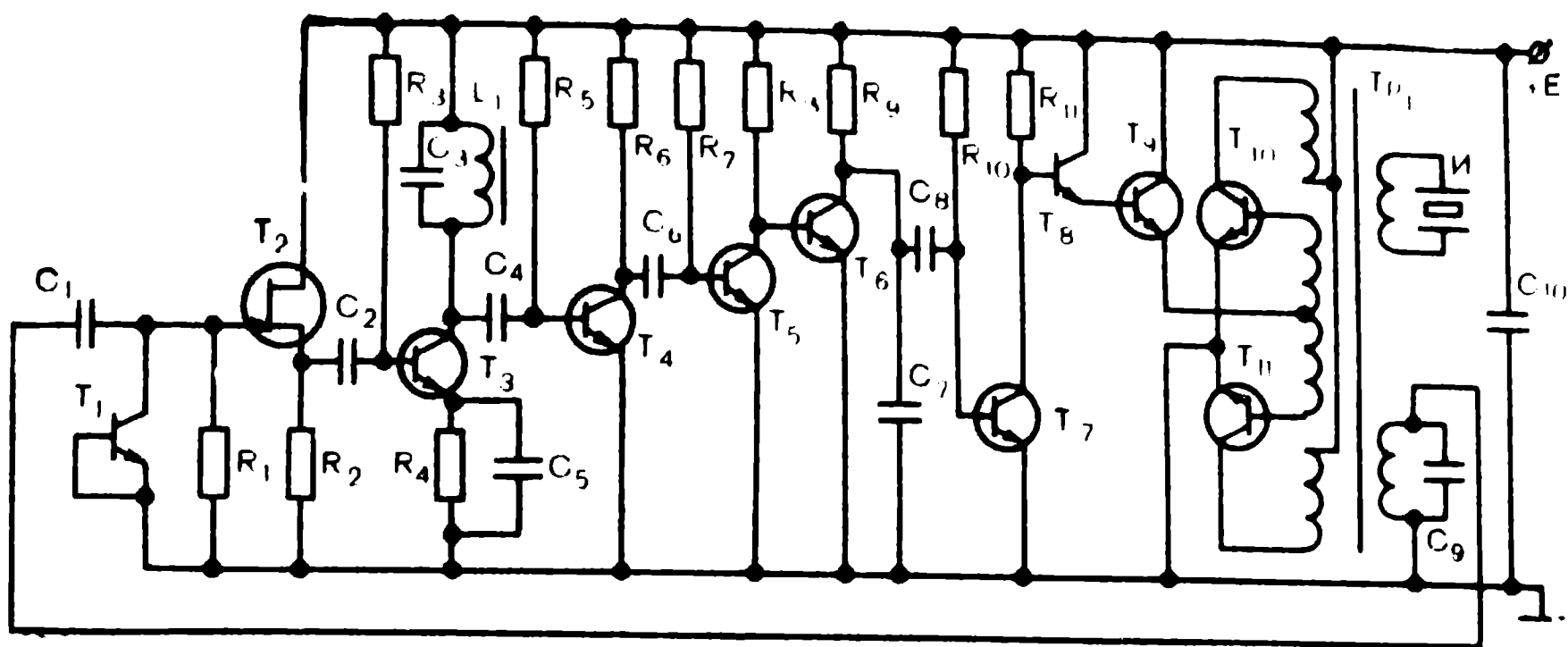


Рис. 11. Электрическая схема приемоответчика передатчика с переизлучением [205].

ционно-дальномерный метод определения местонахождения объектов. С помощью этого метода дальность цели определяется по разности времени прихода в пункт приема импульсных сигналов, одновременно излучаемых передатчиком в электромагнитную и гидроакустическую линию связи. Работа этих передатчиков основана на том, что временной интервал между моментами прихода радиосигнала, распространяющегося в воде со скоростью примерно  $33,2 \cdot 10^8$  м/с (т. е. практически мгновенно), и акустического сигнала, распространяющегося в воде со сравнительно небольшой скоростью — примерно  $1,5 \cdot 10^3$  м/с, с достаточной для практических целей точностью пропорционален расстоянию между пунктами излучения и приема гидроакустического сигнала.

Погрешность определения этого расстояния обусловлена главным образом непостоянством скорости звука и крутизной передних фронтов импульсных гидроакустических сигналов, искаженных в результате прохождения гидросреды и селективных трактов приемной аппаратуры.

Опыт применения таких комбинированных передатчиков показывает, что абсолютная погрешность определения местоположения передатчика с дистанции 100 м может быть сведена к нескольким десяткам сантиметров. Столь высокая точность открывает дополнительные возможности в изучении нюансов поведения маркированных объектов по отношению к пространственным градиентам физических полей, элементам рыбопропускных и заградительных сооружений, орудиям лова и т. п.

Комбинированные передатчики существенно проще, дешевле и миниатюрнее приемоответчиков.

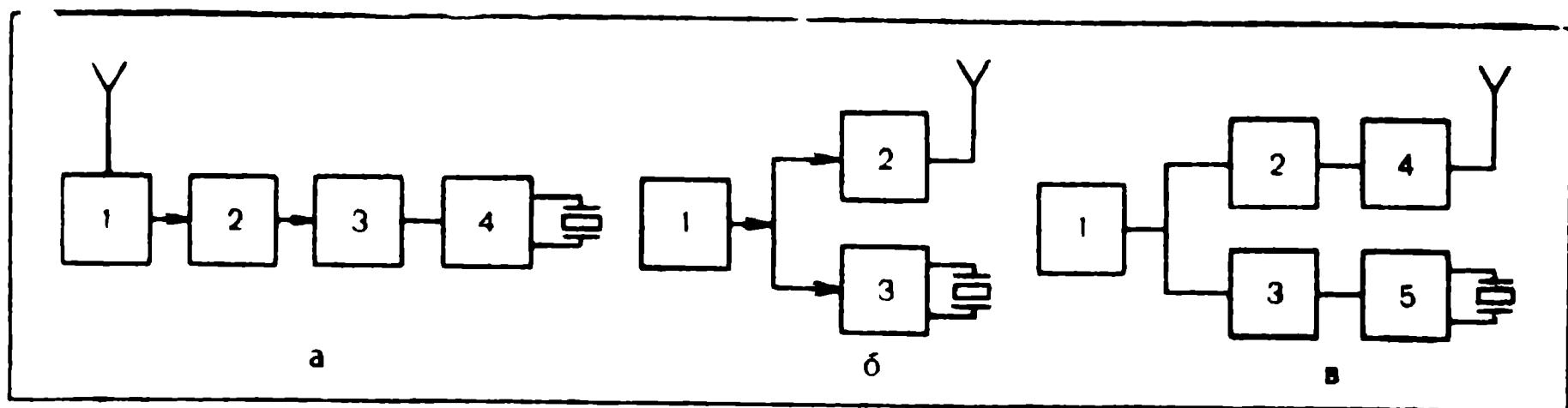


Рис. 12. Варианты функциональных схем комбинированных радиогидроакустических передатчиков.

При разработке комбинированных передатчиков основное внимание обращается на совпадение во времени передних фронтов импульсных сигналов, излучаемых антеннами передатчика в электромагнитную и гидроакустическую линии связи. Очевидно, что временные флуктуации фронтов вызывают пропорциональные этим флуктуациям погрешности определения дальности цели. Например, флуктуации фронтов на  $\pm 10^{-3}$  с вызывают погрешность определения дальности  $\pm 1,5$  м.

Варианты функциональных схем комбинированных радиогидроакустических передатчиков представлены на рис. 12. В первом варианте (а) генератор радиоимпульсов радиочастоты 1 работает в автоколебательном режиме, а генератор радиоимпульсов ультразвуковой частоты 4 — в заторможенном режиме. Каждый радиоимпульс генератора 1 детектируется видеодетектором 2, передний фронт полученного видеоимпульса формируется формирователем импульса запуска 3 и запускает заторможенный генератор ультразвуковой частоты 4.

Во втором варианте (б) одновременный запуск генераторов осуществляется специальным автоколебательным генератором тактовых импульсов 1. Оба генератора радиоимпульсов — как радиочастотный 2, так и ультразвуковой 3 — работают в заторможенном режиме.

В третьем варианте (в) генератор видеоимпульсов 1 через ключевые устройства 2 и 3 осуществляет полную амплитудно-импульсную модуляцию генераторов 4 и 5. Первые два варианта рассмотренных функциональных схем практически равноценны. Последний вариант обладает наиболее высокими метрологическими характеристиками.

Все комбинированные радиогидроакустические передатчики состоят в основном из тех же функциональных узлов, что и простые передатчики. Рациональная комбинация этих узлов производится с учетом конкретных условий решаемой задачи.

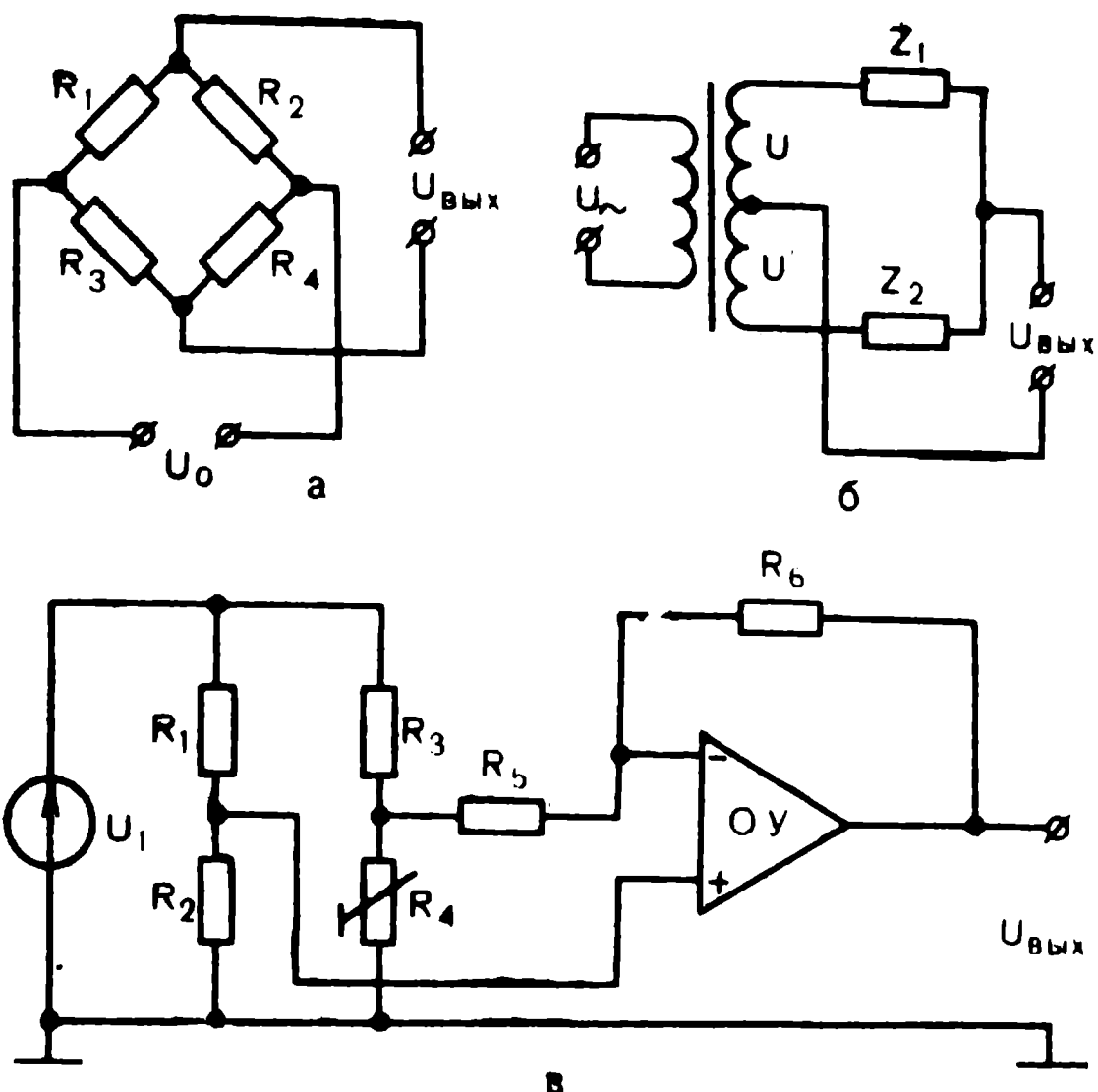


Рис. 13. Измерительные и согласующие устройства на основе мостовой (а), дифференциальной (б) схем включения датчиков и операционного усилителя (в).

**Информационные передатчики.** Одноканальные информационные передатчики разрабатываются на базе маркерных приемоответчиков и комбинированных радио-гидроакустических передатчиков. Особые требования предъявляются к их согласующим устройствам, модуляторам и датчикам.

В большинстве случаев электрические величины (сопротивление, напряжение, ток и др.) не могут быть непосредственно использованы для управления передающей частью ПБТС. Выделение сигналов датчиков, их усиление и согласование с модуляторами передатчиков осуществляются специальными измерительными схемами и согласующими устройствами. Часто в этих схемах и устройствах осуществляется компенсация погрешностей, возникающих из-за воздействия на преобразователи таких дестабилизирующих факторов, как изменение температуры, напряжения источников питания и др. [104].

В тех случаях, когда в качестве чувствительного элемента преобразователя используются датчики сопротивлений (резисторные, индуктивные и емкостные), измерительные устройства выполняют, как правило, по мостовой или дифференциальной схемам (рис. 13, а, б). Из теории мостовых и дифференциальных схем известно, что максимальная чувствительность по напряжению в режиме, близком к холостому ходу, в мостовой схеме наблюдается при  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_4$ , а в дифференци-

альной схеме — при  $U' = U''$  и  $z_1 = z_2$ . Для увеличения чувствительности эти схемы обычно работают в режиме, близком к равновесному.

Универсальным элементом, обеспечивающим согласование мостовой схемы с последующими каскадами передатчика, является операционный усилитель ОУ. Типовая схема включения ОУ для усиления выходного напряжения мостовой схемы (рис. 13, в) содержит: информационный резистивный датчик  $R_4$ ; резисторы балансировки моста  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и резисторы  $R_5$ ,  $R_6$ , определяющие коэффициент передачи ОУ.

Входное сопротивление усилителя для инвертирующего входа определяется сопротивлением  $R_5$ , а для неинвертирующего — дифференциальным сопротивлением усилителя, глубиной обратной связи и коэффициентом усиления ОУ с разомкнутой цепью обратной связи.

Нестабильность тока при стабильном питании в основном обусловлена дрейфом падения напряжения на эмиттерных переходах транзисторов и изменением глубины обратной связи. Эту нестабильность можно значительно уменьшить, применив идентичные пары транзисторов в интегральном исполнении и подобрав ток делителя  $R_1—R_2$  для компенсации температурного дрейфа переходов.

В тех случаях, когда требование к экономичности не очень строгое, применяются унифицированные согласующие устройства типа сопротивление—напряжение—ток. Однако в биотелеметрии это требование как по числу элементов, так и по потребляемой мощности при конструировании передатчиков является определяющим. В связи с этим в последние годы наметилась тенденция к совмещению функций преобразования, согласования и модуляции на базе одного активного элемента.

Спектры сигналов, передаваемых по ПБТС, простираются далеко в область низких частот и не могут быть непосредственно переданы по гидроакустической или электромагнитной линии связи. Для эффективной передачи этих сигналов необходимо перенести их спектр в область высоких частот, диапазон которых согласован с каналом связи. В таком преобразовании низкочастотного сигнала и заключается сущность модуляции. В подводной биотелеметрии целесообразно использовать частотную модуляцию, обладающую высокой помехозащищенностью.

Экономичными по питанию и числу элементов являются схемы частотных модуляторов с применением «реактивных» транзисторов. На рис. 14, а представлена схема одного из вариантов такого модулятора, разработанная в Физико-механи-

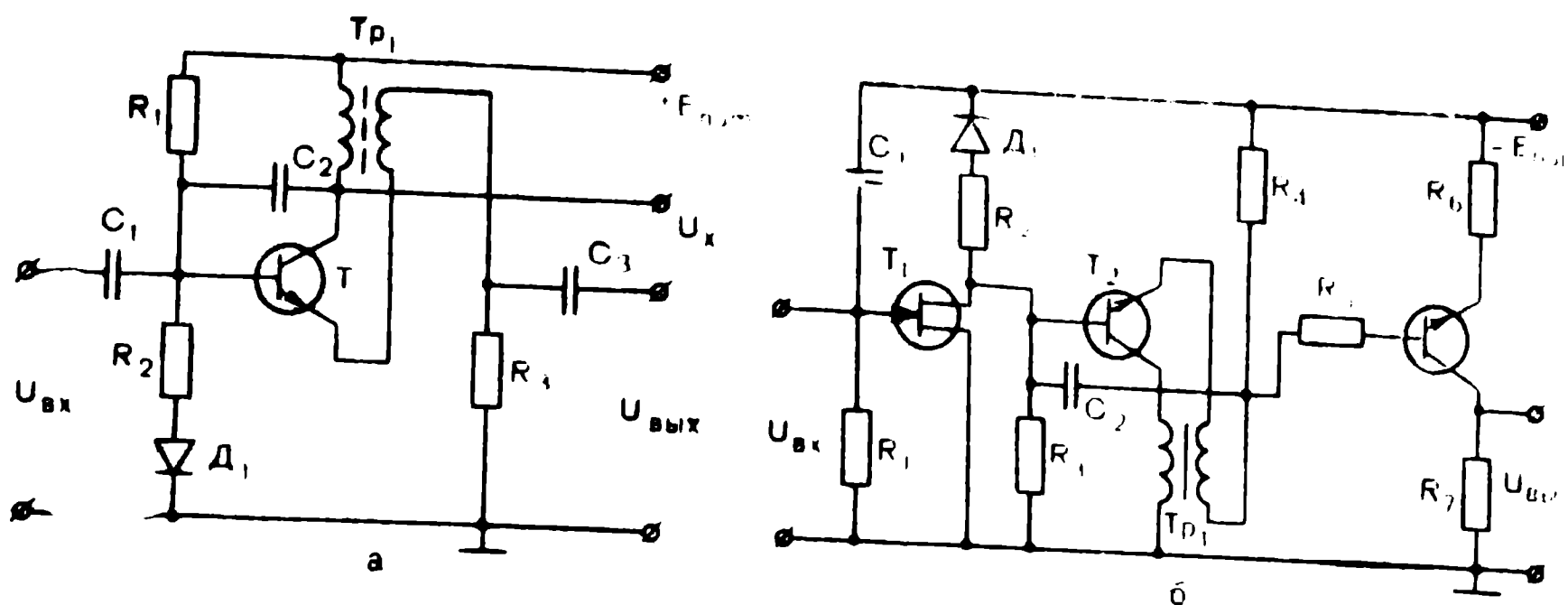


Рис. 14. Схемы частотных модуляторов на «реактивном» транзисторе  
 а — с индуктивной обратной связью, б — с согласующим каскадом на входе и выходе

ческом институте АН УССР под руководством Я. Е. Беленького. Каскад на транзисторе  $T_2$  представляет собой автогенератор с индуктивной обратной связью. Если в качестве «реактивного» использован транзистор типа КТЗ19А, то крутизна модуляционной характеристики составляет приблизительно 200 Гц/мВ. Уход частоты генератора в диапазоне температур 10—50°С не превышает 0,5%.

В схеме частотного модулятора, разработанного в том же институте С. М. Кидуном специально для систем подводной биотелеметрии (рис. 14, б), функции автогенератора и «реактивного» транзистора выполняются одновременно одним и тем же активным элементом. Положительная обратная связь осуществляется по цепи коллектор—эмиттер. В базовую же цепь включена фазово-вращающая  $RC$ -цепочка схемы «реактивного» транзистора.

Управление частотой генератора производится по эмиттерной цепи  $C_3$ — $R_3$ . Величина потребляемой мощности приведенного ЧМ-модулятора при напряжении источника питания 3,6 В не превышает 2 мВт. Временная нестабильность центральной частоты составляла приблизительно 0,5%.

В тех случаях, когда необходима передача сигналов в широком динамическом диапазоне, а к характеристике преобразования модулятора предъявляется требование особо высокой линейности, наметилась тенденция выполнять частотные модуляторы на элементах, работающих в ключевом режиме. В этих схемах частотно-задающий конденсатор  $C$  включен между двумя управляемыми  $p$ — $n$ — $p$ — $n$  переключателями, а входной управляющий ток подводится к противоположным обкладкам конденсатора

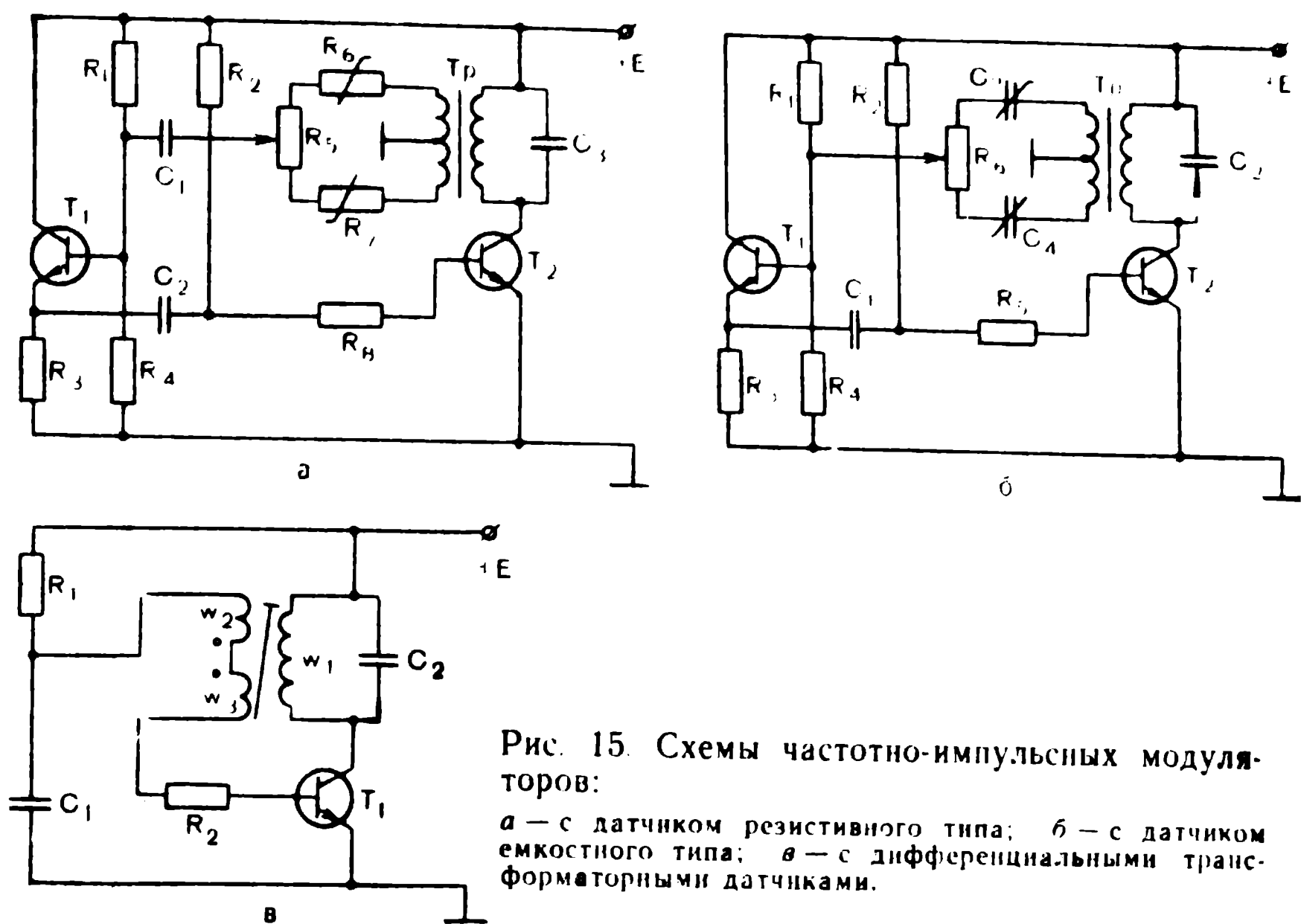
Как уже отмечалось, в ПБТС широко применяется импульсная модуляция, при которой один из параметров импульсной последовательности, например частота следования импульсов (ЧИМ) или их длительность (ШИМ), изменяется по закону измеряемой величины. Входными величинами таких преобразователей являются напряжения или токи, полученные с выходов датчиков или соответствующих согласующих устройств.

На рис. 15, а изображена разработанная нами схема модулятора, управляемая мостом переменного тока, в плечи которого  $R_6$ — $R_7$  могут быть включены любые резистивные датчики, например тензо- или терморезисторы. Согласование номинального значения сопротивления резистивного датчика с генератором осуществляется со стороны диагонали питания моста соответствующим выбором коэффициента трансформации  $Tr$ . Согласование со стороны измерительной диагонали обеспечивается эмиттерным повторителем, собранным на транзисторе  $T_1$ . Потенциометр  $R_5$  служит для установки номинального значения периода повторения. Эта схема наиболее пригодна для датчиков, номинальное значение которых находится в пределах десятков килоом. В случае применения низкоомных датчиков транзистор  $T_1$  целесообразно использовать не в режиме повторителя, а в режиме усилителя разбаланса моста. Во втором варианте схемы (рис. 15, б) управляемыми элементами моста переменного тока служат датчики емкостного типа. Такую схему целесообразно применять при высоких частотах заполнения (мегагерцы), в этом случае емкостные датчики работают достаточно эффективно. В следующей схеме модификации модулятора (рис. 15, в) изменение коэффициента передачи цепи обратной связи осуществляется дифференциальным трансформатором с подвижным сердечником из магнитомягкого материала типа оксифера.

Для передачи значений параметров среды и физиологического состояния рыбы по линии связи их необходимо предварительно преобразовать в электрические сигналы. Устройство, выполняющее эту операцию, называется датчиком или измерительным преобразователем. Входной величиной такого преобразователя является измеряемая неэлектрическая величина, а выходной — параметры электрических цепей и сигналов: активные, индуктивные или емкостные сопротивления и падение напряжения на этих сопротивлениях, э.д.с., частота или фаза переменного тока, частота следования и длительность импульсов и некоторые другие.

В подводной биотелеметрии используются разнообразные преобразователи, различающиеся как по конструкциям, так и





по принципу действия. Их конструированию и расчету посвящена обширная литература [42, 104, 227, 229]. Здесь мы рассмотрим лишь некоторые преобразователи, руководствуясь соображениями необходимости измерения тех или иных величин и конструктивными особенностями, обеспечивающими их небольшие размеры.

На современном этапе развития подводной биотелеметрии большое внимание уделяется глубине погружения, скорости и направлению движения объекта. Эти измерения, как правило, выполняются с помощью датчиков механических перемещений, например индуктивных или емкостных преобразователей. Обычно эти преобразователи включаются в цепи мостовых схем переменного тока или служат частотоподающими элементами генераторных схем.

В телеметрии находят широкое применение трансформаторные преобразователи, в которых используется изменение взаимной индуктивности обмоток преобразователя (а следовательно, и коэффициента связи между обмотками) под воздействием измеряемых механических перемещений. Обычно они применяются как элементы связи либо непосредственно, либо выполняют роль источников управляющих сигналов для амплитудных или частотных модуляторов.

В последние годы в связи с освоением промышленностью широкого ассортимента тензорезисторов в подводной телеметрии находят все большее применение измерительные преобразователи, в которых перемещение вначале преобразуется в механическую деформацию некоторого упругого элемента. Указанная деформация измеряется с помощью тензорезисторов [103].

Для измерения гидростатического давления (глубины) и скорости движения объекта (по изменению гидродинамического напора) в качестве упругих элементов применяются сильфоны и тонкие мембраны. Однако несмотря на кажущуюся простоту принципа действия мембранных и сильфонных преобразователей перемещения и давления, их изготовление в миниатюрном исполнении весьма трудоемко.

Промышленностью освоены новые типы элементов, чувствительных к давлению. Эти элементы представляют собой кремниевую или ситалловую мембрану, в областях наибольшей чувствительности которой напылены или выращены металлические или полупроводниковые тензорезисторы, соединенные по мостовой схеме. При этом одна часть тензорезисторов работает на растяжение, а другая — на сжатие, что обеспечивает высокую чувствительность, а высокая степень идентичности этих тензорезисторов — малый температурный дрейф. Примером такого элемента может служить TQL 360S [190], чувствительность которого при токе питания моста 0,5 мА составляет  $4 \cdot 10^{-5}$  мВ/Па, а входное сопротивление моста в среднем — 1000 Ом.

Для измерения температуры в подводной биотелеметрии чаще всего используются полупроводниковые термисторы (терморезисторы). В настоящее время выпускается большой ассортимент полупроводниковых терморезисторов самого различного конструктивного оформления. Наиболее распространенные терморезисторы изготавливаются на основе медно-марганцевых (ММГ и СТЗ), кобальто-марганцевых (КГМ и СТ1) оксидных полупроводников. Основной характеристикой терморезистора является зависимость его сопротивления от температуры. Как правило, эта зависимость имеет экспоненциальный характер. Из отечественных терморезисторов наиболее подходящими по своим параметрам и конструкции для измерения температур в подводной биотелеметрии являются терморезисторы СТ1-19 и СТЗ-19 [38].

Широкое применение в подводной биотелеметрии получили также фотоэлектрические преобразователи и прежде всего полупроводниковые фоторезисторы. Они используются как для измерения естественного светового потока в месте расположения

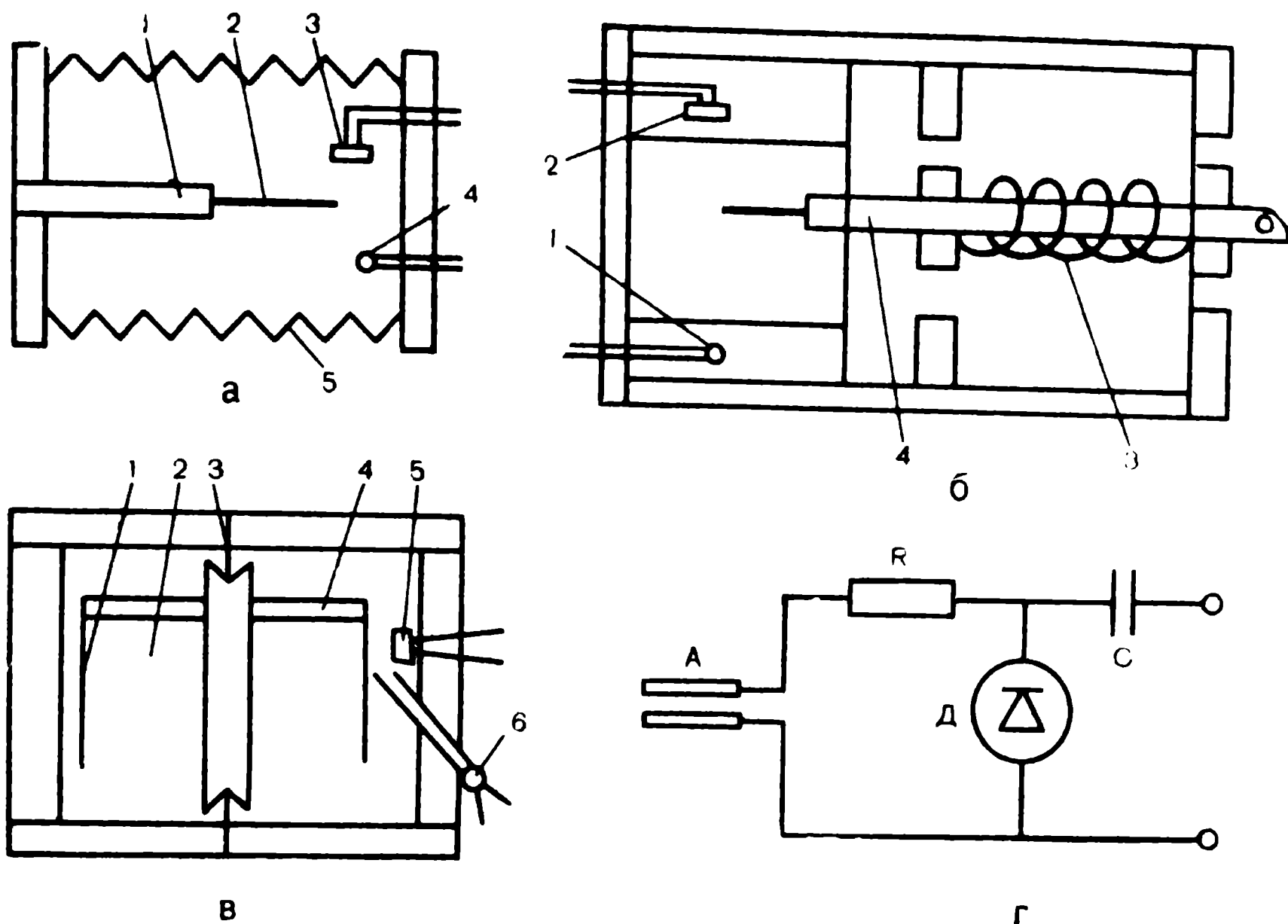


Рис 16. Преобразователи механических величин.

*а* — сильфонный датчик давления [229]; *б* — датчик скорости [229]; *в* — датчик компасного курса [229]; *г* — датчик двигательной активности [255].

гидробионта, так и для построения миниатюрных датчиков механических величин. Для целей подводной биотелеметрии применяются фоторезисторы СФ2-1, СФ2-4, СФ3-1, СФ3-2, СФ3-4, ФСК-М1, ФСК-П1 [38].

В ряде случаев представляется целесообразным использовать фоторезисторы в качестве вторичных преобразователей датчиков перемещения [229]. На рис. 16, *а* изображен сильфонный датчик давления с использованием фотоэлементов. Он состоит из гибкой мембраны (сильфона) 1, герметично закрытой с обеих сторон пластинами. На одной из них укреплены источник светового излучения 2 и фоторезистор 3. Между источником и фоторезистором на регулирующей оси 4 находится непрозрачная пластина 5. При изменении давления мембрана сжимается или расширяется, перемещая пластину 5 и меняя тем самым световой поток, идущий на фоторезистор. При этом, естественно, изменяется сопротивление фоторезистора.

Такой же принцип использован в датчике скорости (рис. 16, *б*), который состоит из источника светового излучения 1, фоторезистора 2, возвращающей пружины 3 и подвижной оси 4, прикрепленной к буйку, выведенному из передатчика. Умень-

шение или увеличение скорости подводного объекта вызывает передвижение оси и изменение светового потока, поступающего на фоторезистор.

На рис. 16, в изображен датчик компасного курса. В этом приборе используется не проходящий, а отраженный от поверхности световой поток. В заполненной маслом емкости 1 находится магнит 2, укрепленный на вращающейся оси 3. На магните расположен барабан 4 с градиентом отражения. Свет от излучателя 5 отражается от барабана и попадает на фоторезистор 6. В зависимости от компасного курса рыбы меняется величина светового потока, попадающего на фоторезистор.

Для измерения двигательной активности рыб разработан оригинальный датчик [255] из биморфного пьезокерамического элемента (рис. 16, г). При изменении скорости плавания меченой рыбы расстояние между пластинами А меняется, что соответствующим образом отражается в электрической цепи передатчика.

В настоящее время наиболее просто в подводной телеметрии решается задача передачи информации о температуре и освещенности окружающей среды [18]. В типичных схемах передатчиков температуры и освещенности датчики включены в разрядные цепи генератора с самозапираанием. Нестабильность частоты следования радиоимпульсов при 10%-ном изменении напряжения питания не превышает у них 1—1,5%.

Для передатчиков освещенности коэффициент перекрытия по периоду составляет примерно 200% вследствие высокой чувствительности фоторезисторов, поэтому в большинстве случаев ее приходится уменьшать добавлением ограничивающих цепочек. Выбирая соответствующие соотношения сопротивлений, можно смещать рабочий диапазон освещенности передатчика в ту или иную сторону.

Для увеличения крутизны преобразования и уменьшения погрешности измерения в узком интервале температур применяется мостовое включение термодатчиков с последующим усилением разбаланса моста дифференциальным каскадом. Применение такого передатчика позволило снизить погрешность измерения до 1% при значительных колебаниях температуры. Недостаток его — низкая экономичность, обусловленная постоянным потреблением мощности резистивным мостом и усилительной схемой. Повысить экономичность преобразования при сохранении той же крутизны оказалось возможным с помощью генератора с самозапираанием и регулируемым коэффициентом связи между коллекторной и базовой цепями. Отличительная особенность этой схемы — применение в качестве выходного каскада

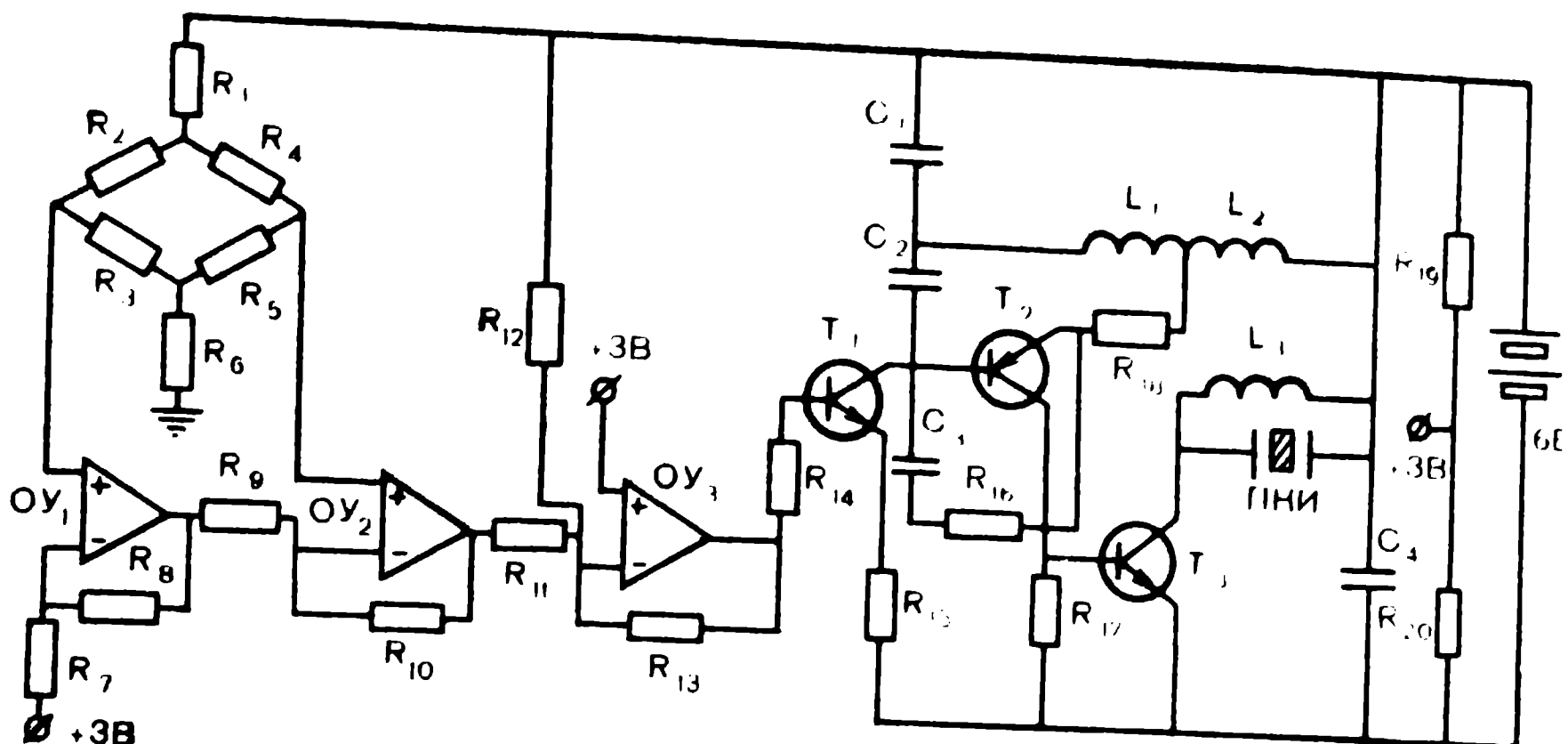


Рис. 17. Электрическая схема информационного передатчика глубины [190].

двухтактного генератора с трансформаторной обратной связью, управляемого видеодетектором по цепи базового смещения. Такое решение позволило существенно повысить частоту наполнения импульсов задающего генератора, т. е. обеспечить высокое сопротивление коллекторной нагрузки при малой индуктивности обмотки. Этот передатчик позволяет измерять температуру с погрешностью не более 0,7% при ее перепаде 10°С. Средняя потребляемая мощность всего передатчика не превышает  $10^{-2}$  Вт.

Важнейшей характеристикой, позволяющей детализировать поведение гидробионтов, служит глубина их плавания. Как уже отмечалось, обычно глубина плавания определяется относительно поверхности воды по измерению гидростатического давления. В качестве примера информационного передатчика глубины рассмотрим передатчик, разработанный канадскими исследователями [190]. Электрическая схема этого передатчика изображена на рис. 17. Здесь элементом, чувствительным к давлению, является тензометрический мост, выполненный на тензорезисторах  $R_2--R_5$ . Напряжение разбаланса этого моста, усиленное тремя операционными усилителями ( $OY_1$ ,  $OY_2$  и  $OY_3$ ), управляет частотой следования радиопульсных сигналов, вырабатываемых генератором с самозапирированием, который собран на транзисторе  $T_2$  по схеме индуктивной трехточки. Выходное напряжение этого генератора усиливается резонансным усилителем мощности на транзисторе  $T_3$  и преобразовывается в ультразвуковые упругие колебания с помощью пьезокерамического излучателя ПКИ. Несущая частота передатчика 75 кГц, дальность

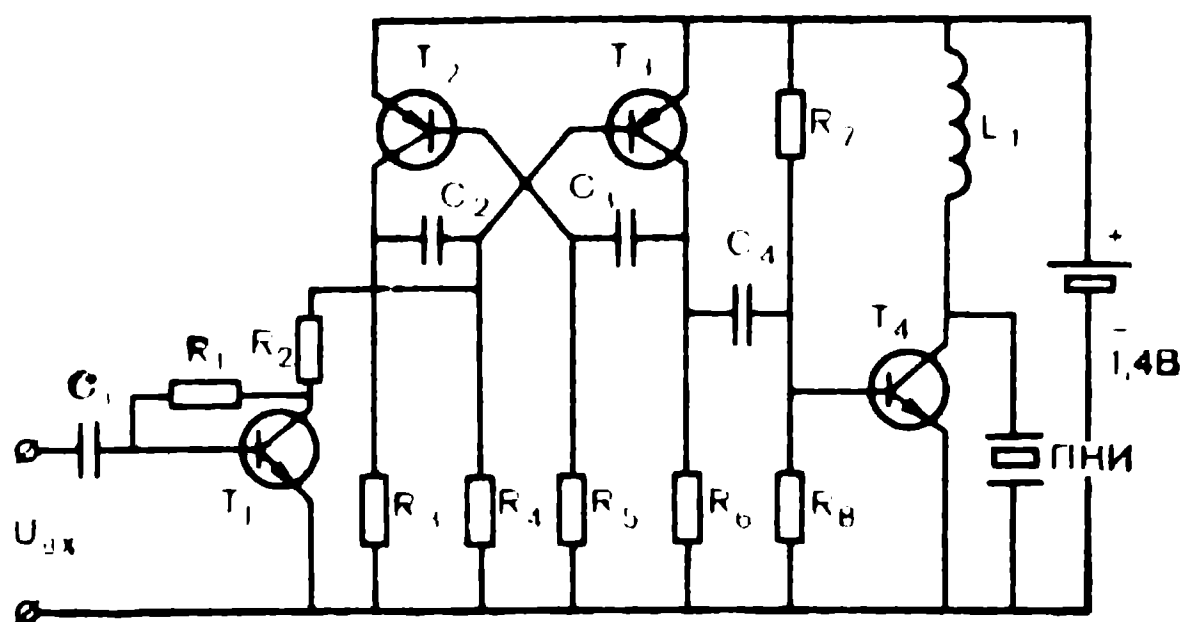


Рис. 18. Электрическая схема передатчика ЭКГ [174].

связи до 1 км, энергоресурс 3 сут, точность  $\pm 0,35$  м при диапазоне глубин от 0 до 40 м. Размеры передатчика  $7 \times 1,6$  см, масса в воде 17 г.

В последние годы разработан ряд передатчиков для съема информации, характеризующей физиологическое состояние гидробионтов [167, 174, 210, 215, 252]. Вариант электрической схемы передатчика ЭКГ изображен на рис. 18. Частотный модулятор этого передатчика выполнен по схеме автоколебательного мультивибратора на транзисторах  $T_2$  и  $T_3$ . Управление частотой мультивибратора осуществляется путем шунтирования сопротивления смещения  $R_3$  с помощью транзистора  $T_1$ , на базу которого подается передаваемый сигнал ЭКГ [174]. Выходной сигнал мультивибратора, снимаемый с коллектора  $T_3$ , усиливается резонансным усилителем на транзисторе  $T_4$  и излучается в гидросреду. Несущая частота этого передатчика 50 кГц, частотная девиация входного сигнала приблизительно 200 Гц/мВ, энергоресурс пять суток, дальность связи около 100 м.

Многоканальные информационные передатчики предназначены для одновременной передачи на пункт приема сведений о состоянии нескольких параметров среды и гидробионта. Рассмотрим схему передатчика с временным разделением каналов для изучения поведения свободноплавающих акул [229]. Этот передатчик обеспечивает сбор по гидроакустической линии связи данных о глубине, скорости движения, положении тела гидробионта в геомагнитном поле, а также о температуре и освещенности окружающей среды. Характерная особенность этого передатчика — широкое использование современной интегральной техники (электронные ключи, логические элементы) и унификация элементов и узлов.

Схема обеспечивает формирование радиоимпульсов постоянной длительности (8 мс) с изменяющимся в пределах от 0,2 до 1 с периодом повторения, зависящим от значения сопротивле-

ния датчика, которое в свою очередь определяется значением информационного параметра. Питание передатчика осуществляется от ртутно-цинковой батареи напряжением 8,4 В, емкостью 0,75 А·ч. Керамический пьезонизлучатель типа ЦТС выполнен в виде пустотелого цилиндра. Резонансная частота излучателя 40 кГц. В генераторе несущей частоты предусмотрена стабилизация частоты при изменении температурного напряжения источника питания. Так, при изменении напряжения питания на 1 В уход несущей частоты не превышает 600 Гц.

Максимальная дальность, при которой еще обнаруживается передатчик в морской воде, по данным разработчиков, составляет 3 мили. Продолжительность работы передатчика без замены батарей примерно одна неделя. Специальное распределительное и коммутационное устройство — мультиплексор — последовательно подключает к генератору тактовых импульсов различные датчики. Мультиплексор состоит из счетчика, собранного на микросхеме, схемы установки счетчика, схемы управления ключами и схемы электронных ключей. Схема управления вводит очередной ключ и подсоединяет к генератору следующий датчик. Параллельно и последовательно с датчиками включены ограничивающие сопротивления, обеспечивающие работу генератора даже в случае короткого замыкания или разрыва цепи.

Для съема информации использованы рассмотренные выше модификации датчиков перемещения.

**Влияние передатчиков-меток на рыбу.** Передатчик может влиять на рыбу своим звуковым и электрическим излучением, нарушать ее плавательную способность, раздражающе действовать на немеченых особей стаи или группы рыб.

Степень воздействия передатчика на рыбу оценивается по уровню ее двигательной активности, скорости и характеру плавания, отношению к раздражителям, потреблению кислорода, по времени выработки и сохранения условных рефлексов.

**Влияние излучений.** Доказано, что при использовании для беспроводной связи радиоканала (радиотелеметрии) радиоволны рыбой, как и другими животными, не воспринимаются. Иначе обстоит дело с гидроакустическим каналом. Рыбы великолепно слышат и направленно реагируют на источник звука [82], поэтому при выборе диапазона работы гидроакустического передатчика следует учитывать не только физические особенности распространения и поглощения упругих (звуковых и ультразвуковых) волн, но и функциональные особенности слухового аппарата рыб. Звуковое излучение передатчика должно лежать за пределами восприятия рыбами этих колебаний, т. е.



его частота должна быть за пределами слышимости, а интенсивность — за пределами болезненных ощущений.

Большинство рыб воспринимают звук в диапазоне от 16 Гц до 4—5 кГц (некоторые виды — до 8 кГц) при пороге восприятия — 20—60 дБ [82]. По остроте слуха они не уступают человеку, различая  $\frac{1}{4}$  тона —  $\frac{1}{2}$  октавы. Пропускная способность слухового органа рыб (время опознавания звукового образа) 0,2—0,4 с, а помехоустойчивость (отношение сигнал—шум) примерно 1 : 1 [57]. Частоты звуковых колебаний свыше 5—8 кГц могут восприниматься рыбой только при очень значительных интенсивностях звукового поля. Например, хамса и азово-черноморская сельдь реагируют на звуки частотой до 12 кГц только при звуковом давлении  $(2 \div 3) 10^8$  Па [41], а молодь воблы, уклей, окуня и густеры способна проявлять двигательную реакцию на ультразвук частотой до 30 кГц, если его интенсивность на выходе составляет 5—6 Вт/см<sup>2</sup> [56]. Как отмечает Б. П. Мантейфель [53], регистрируемые изменения поведения рыб в ультразвуковом поле связаны с болевыми воздействиями колебаний высокой энергии. Многочисленные эксперименты на разных видах рыб показывают, что слабые ультразвуковые колебания в диапазоне выше 20 кГц на рыб не действуют [61, 118].

Как уже отмечалось, в водной среде имеются оптимальные условия для прохождения ультразвуковых волн с частотой 50—100 кГц, лежащей в диапазоне, не воспринимаемом рыбой, и не способной исказить ее поведение после мечения настроенным на эти частоты передатчиком. Таким образом, применяемые в настоящее время передатчики-метки по диапазону частот полностью удовлетворяют биологическим требованиям.

Высокая чувствительность к электрическим полям свойственна всем рыбам и, видимо, широко используется ими для ориентации, распознавания особей своего и других видов и даже пола [39, 83]. Напряженность электрического поля, создаваемого большинством рыб в радиусе 5—10 см, достигает 8—15 мкВ/см. Воспринимаемое ими поле может быть на порядок больше [202]. Наиболее чувствительны рыбы к импульсным токам. Вопрос о влиянии на меченых рыб электрического поля, наводимого передатчиком, изучен пока недостаточно. Имеются сведения о том, что у молоди атлантического лосося не вырабатывается сердечный условный рефлекс на наводку передатчика [149]. Также безуспешными оказались многократные попытки автсров книги выработать условный рефлекс на электрическую наводку ультразвукового передатчика у леща. Однако при разработке следует стремиться свести к минимуму или вообще исключить электрическую наводку передатчика.



Влияние на рыбу размера и гидродинамических свойств передатчика. Влияние передатчиков-меток можно проследить, наблюдая за перемещениями меченых рыб в больших аквариумах, прудах, мелководных отгороженных заливах.

В одном из таких экспериментов наблюдали за поведением рыб, меченных цилиндрическими макетами передатчиков разного размера. Наблюдения велись с мостика, перекинутого через пруд, на высоте около 3 м. Сравнивали время активного плавания меченых и контрольных особей одного вида и размера. В качестве контроля служили особи, прошедшие процедуру мечения (т. е. отлов, имитацию мечения), но без макетов-передатчиков. Замеры производили в течение четырех дней по 2 ч утром, в полдень и вечером. Результаты наблюдений за лещами (длиной 40—45 см) приведены в табл. 1.

Наблюдения показали, что наибольшие изменения двигательной активности как контрольных, так и меченых рыб происходят в первый день, а наибольшее влияние на продолжительность плавания оказывает не длина меток, а их диаметр, что, видимо, связано с лобовым сопротивлением, возрастающим при увеличении скорости плавания рыбы [226].

Эксперименты также показали, что поведение меченых рыб (леща, синца, плотвы) особенно заметно отличается от поведения намеченных в первый час, иногда первые 2—3 ч после

Таблица 1

Время плавания меченых и контрольных лещей

Размеры макета		Длительность плавания рыб, % от общего времени наблюдений					
диаметр, см	длина, см	1-й день		2-й день		4-й день	
		меченые	контроль-ные	меченые	контроль-ные	меченые	контроль-ные
1	5	43	35	24	32	21	27
	8	29	41	18	28	20	18
	10	25	27	29	31	19	24
2	5	32	26	19	24	10	17
	8	21	49	17	33	17	19
	10	23	44	19	27	14	21
3	5	16	30	10	22	8	24
	8	19	45	12	17	13	31
	10	23	61	7	29	9	25

выпуска. Рыбы с макетами передатчиков то резко, неравномерными бросками перемещаются по всему пруду, то замирают на одном месте. Судя по тому, что такие же аномалии поведения проявляются и у некоторых контрольных рыб, на которых имитировали мечение, это вызвано не только действием макета, но и самой процедурой мечения.

В рыбоводных прудах и заливах были проведены визуальные наблюдения за перемещениями крупных осетров и севрюг, меченных передатчиками-катамаранами размером  $4 \times 5 \times 1,5$  см. Никаких видимых изменений поведения этих рыб по сравнению с немечеными особями не было обнаружено. Те и другие совершенно одинаково реагировали на оптические и звуковые раздражители и перемещались по водоему в поисках выхода в реку.

Сравнивая общую двигательную активность форелей, прошедших имитацию мечения и меченных буксируемыми передатчиками, по числу пересечений контрольного участка аквариума за определенное время, Б. Шеферд [224] отметил, что в первые пять дней цилиндрические передатчики диаметром 0,9 и длиной 4 см не влияют на плавание рыб размером 18—25 см. В последующие дни рыбы с передатчиками чаще, чем контрольные, останавливались вблизи дна (рис. 19, а).

Более точным показателем влияния на рыб передатчиков является потребление кислорода, отражающее обменные процессы и энергетику плавания. Б. Шеферд экспериментально показал, что при буксировании форелью передатчиков на малых скоростях потребление кислорода по сравнению с контролем возрастает незначительно. Но эта разница резко возрастает при больших скоростях плавания рыб (рис. 19, б).

Особенно существенно искажающее воздействие наружных передатчиков сказывается при бросковых реакциях рыб. Так, в наших опытах немеченая щука длиной 0,5 м при испуге преодолевала за 1 с расстояние в 2,5—3 м (по результатам киносъемок в аквариуме размером  $2 \times 10$  м). Эта же рыба, но с закрепленным на спине передатчиком диаметром 1,8 и длиной 6 см, точно в такой же ситуации проплывала всего 1,5—1,8, редко 2,0 м. Примерно в 1,2—1,5 раза уменьшались бросковые скорости и у меченых лещей и судаков.

Д. Макклив и К. Стред [203] исследовали влияние внутренних и наружных передатчиков разного размера, весивших в воде от 1,25 до 3,94 г, на критическую скорость плавания смолгов атлантического лосося длиной 20—26 см. Мечение производили под анестезией. Контролем служили две группы рыб: немеченые и прошедшие имитацию мечения. Оказалось, что внутренние передатчики диаметром 8 мм не ухудшают плаватель-

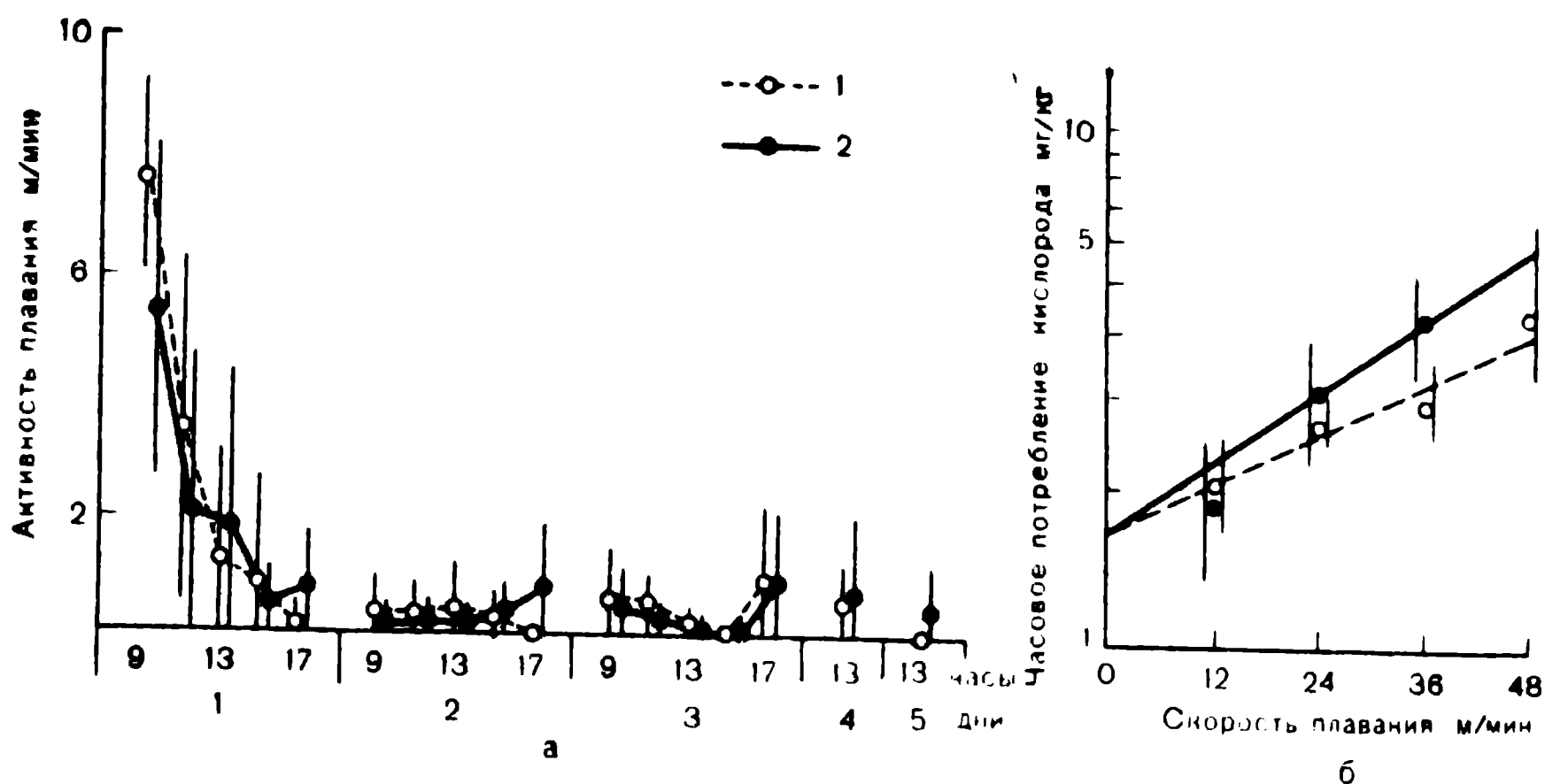


Рис. 19. Двигательная активность (а) и потребление кислорода (б) у меченых (1) и немеченых (2) рыб [224].

ную способность смолтов и, по заключению авторов, пригодны для исследований молоди лосося размером более 20 см. Увеличение диаметра передатчиков с 8 до 10 мм вызывает уменьшение критической скорости плавания почти на 10% (табл. 2).

Статистический анализ результатов этих опытов показал, что даже среди меченых рыб с небольшими вариациями длины тела ( $23 \pm 3$  см) у более крупных особей плавательная способность изменяется не столь значительно.

Более существенно снижается скорость плавания у смолтов с наружными метками-передатчиками, прикрепленными к их спинной части крючками (контроль 56.5 см/с, опыт 44.8 см/с). Было также отмечено, что внешние передатчики, неплотно прилегая к телу, мешают движению рыбы.

Плотность передатчика должна быть близка к плотности воды. В этом случае передатчик имеет нейтральную плавучесть и не вызывает у меченой рыбы смещения центра тяжести и необходимости дополнительных затрат энергии на корректировку плавучести и устойчивости. Плотность передатчика можно снизить созданием воздушных полостей в корпусе и использованием обкладок из легкого пористого материала.

Безусловно, полное соответствие плотности передатчика и воды в разных горизонтах водоема невозможно, поскольку последняя варьирует в зависимости от глубины, температуры, концентрации солей. Как отмечают А. Хаслер и Х. Гендерсон [111], следует избегать изменения эффективной плотности передатчика в зависимости от гидростатического давления.

Подопытные рыбы	Число особей	Скорость плавания	
		см/с	длин тела в секунду
Немеченые	55	$51,62 \pm 9,94$	$2,37 \pm 0,45$
После имитации мечения	55	$53,99 \pm 8,94$	$2,47 \pm 0,43$
С внутренними передатчиками длиной и диаметром, мм			
33 и 8	55	$50,30 \pm 7,31$	$2,30 \pm 0,32$
25 и 8	55	$52,03 \pm 8,64$	$2,36 \pm 0,41$
19 и 10	55	$48,50 \pm 11,87$	$2,22 \pm 0,52$
С наружными передатчиками длиной 31 и диаметром 18 мм	25	$44,77 \pm 5,45$	$1,89 \pm 0,28$

Это достигается приданием корпусу определенной прочности, противодействующей его сплющиванию на больших глубинах.

Установлено, что открытопузырным рыбам, например атлантическому лосою массой 50—170 г, для быстрой компенсации плавучести передатчика массой в воде 4 г требуется заглотить воздух. Восстановление нейтральной плавучести у них начинается спустя 1 ч и заканчивается через 2—6 ч после мечения. При отсутствии доступа к поверхности воды смолты не могут компенсировать дополнительный груз даже через сутки, но если они все же выходят к поверхности, то нейтральная плавучесть постепенно восстанавливается [151].

Более тяжелые последствия мечение может вызывать у закрытопузырных рыб, компенсирующих дополнительную массу передатчика выделением газа в плавательный пузырь. Г. Голлипп, Дж. Мэгнузон [152] показали, что ушастый окунь массой 130 г после мечения передатчиком, масса которого составляет 2,4% массы рыбы, опускается на дно и остается там 1,5 ч при глубине водоема 0,45 м и 4 ч — при глубине 1,6 м. После выпуска у меченых рыб резко увеличивается частота движения грудных плавников.

При расчетной скорости выделения газа в плавательный пузырь (0,1 мл на 1 кг живой массы) и температуре воды 21°С меченый ушастый окунь способен восстановить нейтральную плавучесть только через 6 ч после выпуска. Большая дополнительная масса передатчика искажает поведение рыб при вертикальных миграциях, во время которых они постоянно регулируют свою плавучесть, и даже может привести к их гибели.

Естественно, плотность передатчика оказывает особенно значительное влияние на плавучесть рыб малых размеров [151, 152]. Если мечению подвергаются крупные особи (осетры, лососи, судак, щука и др.), для которых масса передатчика соизмерима с массой пищевых объектов и не превышает 0,5% их собственной массы, влиянием передатчика на плавучесть можно пренебречь [72].

Наиболее удобно мечение рыбы внутренними передатчиками-метками. Размеры их должны быть такими, чтобы изучаемая рыба могла их свободно проглотить [111]. Это требование в настоящее время выполнимо в основном для крупных или среднеразмерных хищных рыб с большим раскрытием рта, имеющих желудок.

Внутренние передатчики лучше выполнять в виде пилюль минимального диаметра. Материал корпуса передатчика и его антенны должен быть нейтральным к желудочному соку рыб для предотвращения нежелательных химических реакций.

Многие виды рыб — бентофаги, планктофаги, перифитофаги — имеют относительно небольшой рот при подчас значительных размерах тела, поскольку их ротовой аппарат приспособлен для питания мелкими животными или растительностью. Кроме того, некоторые виды рыб, например карповые, не имеют желудка. Введение таким рыбам передатчика внутрь может поранить эпителиальную ткань кишечника и закупорить кишечный тракт, поэтому для мечения этих рыб следует применять наружные передатчики, которые могут быть выполнены в виде цилиндра, овального или каплевидного буйка, буксируемого рыбой, уплощенного седла и катамарана. Основные требования к наружным передатчикам — хорошая обтекаемость корпуса, снижающая лобовое сопротивление воды при движении рыбы, небольшая масса (не более 1% от массы тела меченой особи), удобная система крепления (рис. 20).

Влияние цвета передатчика на поведение рыб. Для предотвращения отпугивания от меченой рыбы других особей стаи, в которой она находится, или ее демаскировки при охоте и затаивании наружные передатчики должны иметь нейтральный цвет.

Конечно, для рыб, живущих в глубинных слоях воды, цвет передатчика не играет существенной роли. Более того, для возврата передатчиков-меток со вторично пойманных меченых рыб или погибших по какой-либо причине и всплывших на поверхность, яркий цвет лучше, на него быстрее обратят внимание и вернут по указанному адресу, сообщив время и место поимки или обнаружения рыбы.

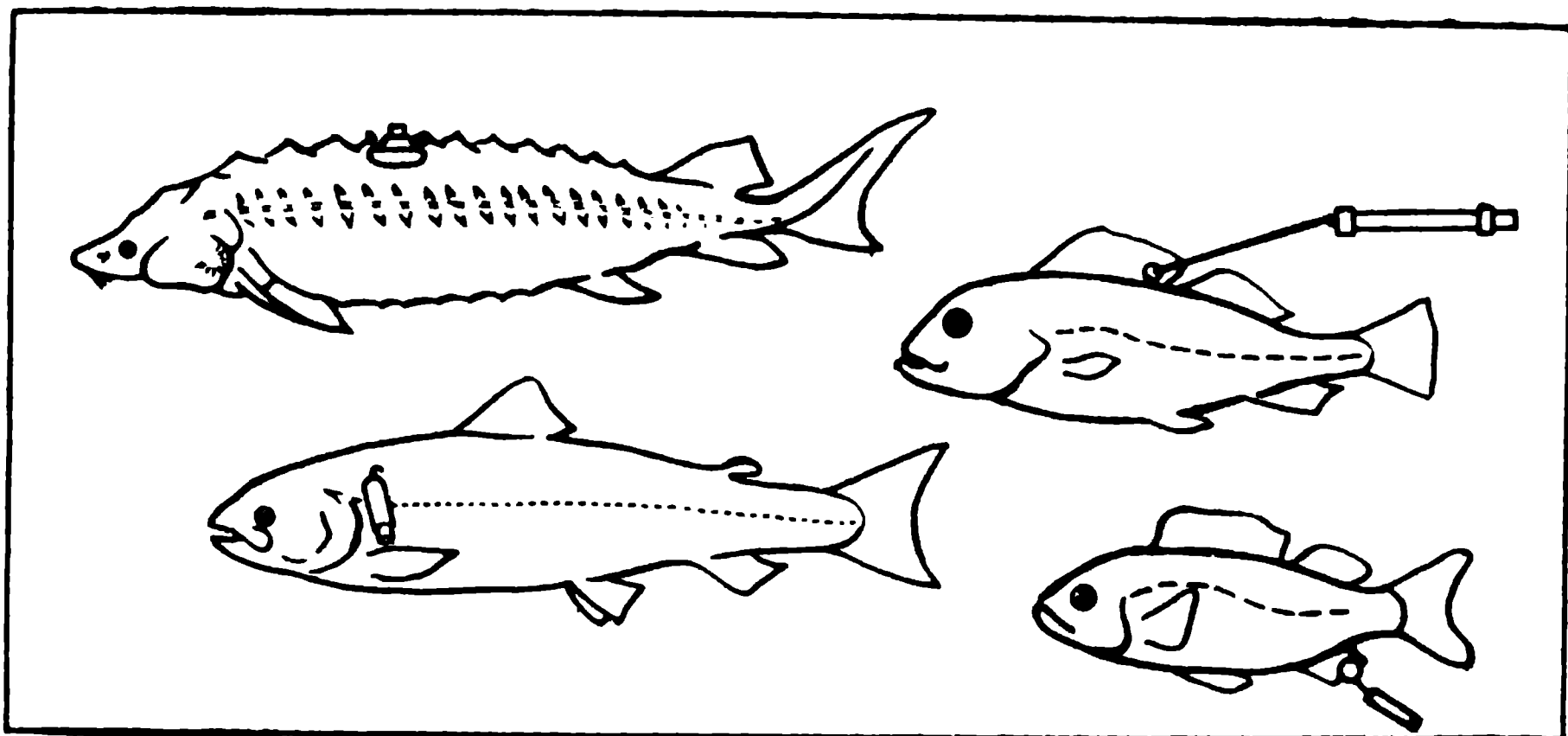


Рис. 20. Способы крепления наружных передатчиков.

Длительность и радиус действия передатчиков. Продолжительность работы передатчика выбирают, исходя из цели и задачи конкретного исследования, но в любом случае минимальный срок работы передающего устройства должен превышать период искаженного поведения, вызванного процедурой мечения, который у разных видов рыб варьирует от 1—3 ч до 1 сут.

В ряде случаев возникает необходимость в строго ограниченном сроке работы передатчика. Например, под плотинами рек, где на сравнительно небольшом участке концентрируется огромная масса рыб, для индивидуального прослеживания целесообразно, чтобы после окончания наблюдений за одной рыбой передатчик прекратил работу для беспрепятственного прослеживания других особей.

Радиус действия передатчика должен составлять не менее 100 м для мелких водоемов и 1,5—2 км — для крупных водохранилищ и озер. Сокращение радиуса действия приводит к тому, что экспериментатор с приемным устройством вынужден подходить на судне очень близко к исследуемому объекту, что, естественно, может отразиться на его поведении.

При работе в больших водоемах необходимо принимать во внимание тот факт, что временная потеря контакта с передатчиком приводит, как правило, к длительным перерывам в наблюдении, поскольку на больших просторах водоема отыскать передатчик, слышимый на малом расстоянии, практически очень трудно.

## Приемная аппаратура

Приемная часть подводной биотелеметрической системы обеспечивает прием сигналов передатчика, их выделение из фона мешающих шумов и помех, выбор из принятых сигналов информации о местоположении объекта, его физиологическом состоянии и параметрах среды.

Структурные схемы построения приемной части могут быть весьма разнообразны, и их конкретная реализация определяется спецификой решаемой задачи. Здесь имеется в виду прежде всего аппаратное обеспечение выбранного метода определения местоположения, а также характер и способ кодирования передаваемой информации.

Несмотря на существующее многообразие, в приемной части ПБТС могут быть выделены следующие функциональные структуры: структура, обеспечивающая определение местоположения объекта, несущего передатчик-метку; структура, обеспечивающая прием и декодирование передаваемых сообщений; структура, обеспечивающая первичную обработку, визуализацию и регистрацию принятых сообщений; сервисные узлы, обеспечивающие нормальное функционирование переменных структур и повышающие удобство работы оператора. Каждая из перечисленных структур приемной части подводной биотелеметрической системы может состоять из множества функциональных узлов и блоков, в связи с чем современные ПБТС представляют собой, как правило, сложные комплексы.

Нами разработан портативный шлюпочный вариант приемоиндикаторного устройства «Пеленг», позволяющий осуществлять слежение за подводными объектами, маркированными ультразвуковыми передатчиками (УЗП) [79], которые обладают достаточной точностью, универсальностью и высокой экономичностью.

Приемоиндикаторное устройство «Пеленг-1» принимает акустические сигналы с частотой наполнения 16—100 кГц, частотой следования 1—25 Гц и длительностью импульса не менее 2 мс.

Устройство включает гидроакустические антенны и приемоиндикаторный блок. Оно обеспечивает следующую обработку сигналов передатчиков: частотную селекцию сигналов из маскирующих шумов и помех, перенос частоты наполнения принятых сигналов в звуковую часть частотного спектра, преобразование сигнала в различные формы, воспринимаемые органами чувств оператора. Индикация осуществляется в виде импульсных звуковых и световых сигналов.



«Пеленг-1» обеспечивает также измерение частоты следования периодических акустических сигналов и формирование сигналов для регистрирующих и измерительных устройств. Его чувствительность в полосе принимаемых частот 2,5 кГц при отношении сигнал—шум 2 : 1 не ниже 0,5 мкВ; диапазон частот усиливаемых и преобразуемых сигналов 16—100 кГц; коэффициент усиления до выхода на звуковую индикацию  $5 \cdot 10^4$ . Изменение усиления производится ступенчато по 6 дБ в пределах 40 дБ; частота сигналов звуковой индикации 2,5—5 кГц; ширина полосы пропускания звеньев частотной селекции 2,5 кГц; пределы измерения частоты следования периодических сигналов 0—25 Гц; диапазоны измерения частоты 1, 2,5, 5, 10, 20 Гц при точности измерения частоты около 1%; масса прибора не превышает 5 кг; потребляемый ток не более 50 мА при напряжении 9 В.

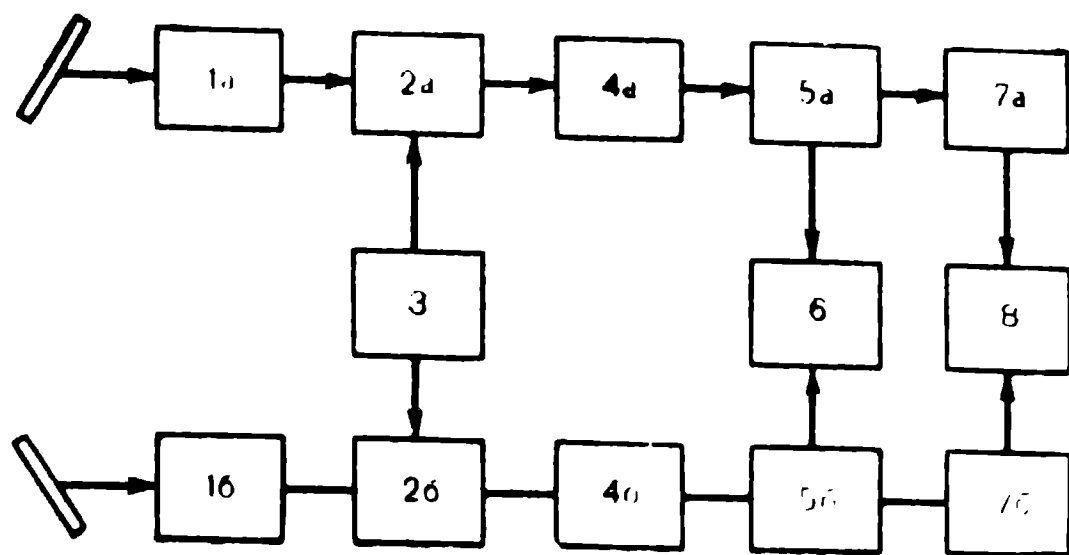
Структурная схема приемоиндикаторного устройства «Пеленг» изображена на рис. 21. Устройство представляет собой двухканальный приемник супергетеродинного типа и двухканальную схему обработки сигналов.

Сигналы с акустических антенн поступают на усилители высокой частоты каналов *1а* и *1б*, где происходят предварительное усиление и ограничение полосы частот этих сигналов в пределах 20—100 кГц. Смесители *2а* и *2б* осуществляют перенос частотного спектра усиливаемых сигналов путем смешивания их с сигналами перестраиваемого по частоте гетеродина *3* и выделения сигналов разностной частоты фильтрами *4а* и *4б*. Фильтры также обеспечивают частотную селекцию сигналов из шумов. Наличие перестраиваемого гетеродина дает возможность выбора частоты сигналов звуковой индикации, наиболее удобной для оператора. После усиления в усилителях мощности *5а* и *5б* сигналы обоих каналов подаются на стереофонический звуковой индикатор *6*, позволяющий определить равносигнальное направление по одинаковой интенсивности звуковых сигналов в каждом из каналов. Дополнительные возможности определения равносигнального направления обеспечиваются с помощью видеодетекторов *7а* и *7б*, выходные сигналы которых обрабатываются в блоке визуальной индикации *8*.

В одноканальном приемном комплексе ГАП, разработанном Институтом механики и физики при Саратовском университете и также применяемом в отечественной биотелеметрической практике, пеленгация ультразвукового передатчика осуществляется за счет узкой диаграммы направленности антенны по максимуму сигнала на выходе приемника [97]. Эта аппаратура



Рис. 21. Структурная схема приемоиндикаторного устройства «Пеленг».



может работать в трех частотных диапазонах: 17—23, 42—48 и 75—81 кГц. Остальные технические данные примерно такие же, как и у описанного выше приемника «Пеленг».

В аппаратном комплексе, разработанном П. Трефесеном [249], приемная часть состоит из блока антенн, автоматически устанавливающегося с помощью сервосистемы в направлении на источник ультразвука, эхо-дальномера, автоматически измеряющего наклонную дальность цели путем локации объекта, приемно-усилительной и индикаторной аппаратуры, позволяющей видеть угловые координаты передатчика и дальность цели на экране электронно-лучевой трубки с круговой разверткой. Глубина нахождения рыбы вычисляется по расстоянию до нее и углу наклона блока приемных антенн и эхо-дальномера.

Ультразвуковой передатчик, установленный на рыбе, излучает упругие колебания частотой 132 кГц. Дальность уверенной связи между передатчиком и приемником в первых экспериментах составляла 200 м; энергоресурс передатчика 7 ч. В дальнейшем эффективную дальность удалось увеличить до 1 км.

Станция слежения за меченой рыбой, разработанная в Японии под руководством проф. Т. Куроки [184], включает три гидрофона, ориентированных таким образом, что оси симметрии двух гидрофонов взаимно перпендикулярны, а третий гидрофон (базовый) располагается на пересечении осей симметрии двух первых. Плоскость симметрии совмещается с вертикальной плоскостью. Базовый гидрофон излучает импульсы с частотой заполнения 75 кГц и периодом повторения 1 с. Приемответчик (метка на рыбе) посылает обратно ответы на частоте 50 кГц, которые содержат информацию о местоположении рыбы и температуре среды (частотная модуляция несущей). Измеряются следующие временные интервалы (рис. 22):  $t_0$  — время, через которое будет получен ответ на базе  $R_0$  (0, 0, 0) (за начало отсчета времени выбирается момент послыки зондирую-

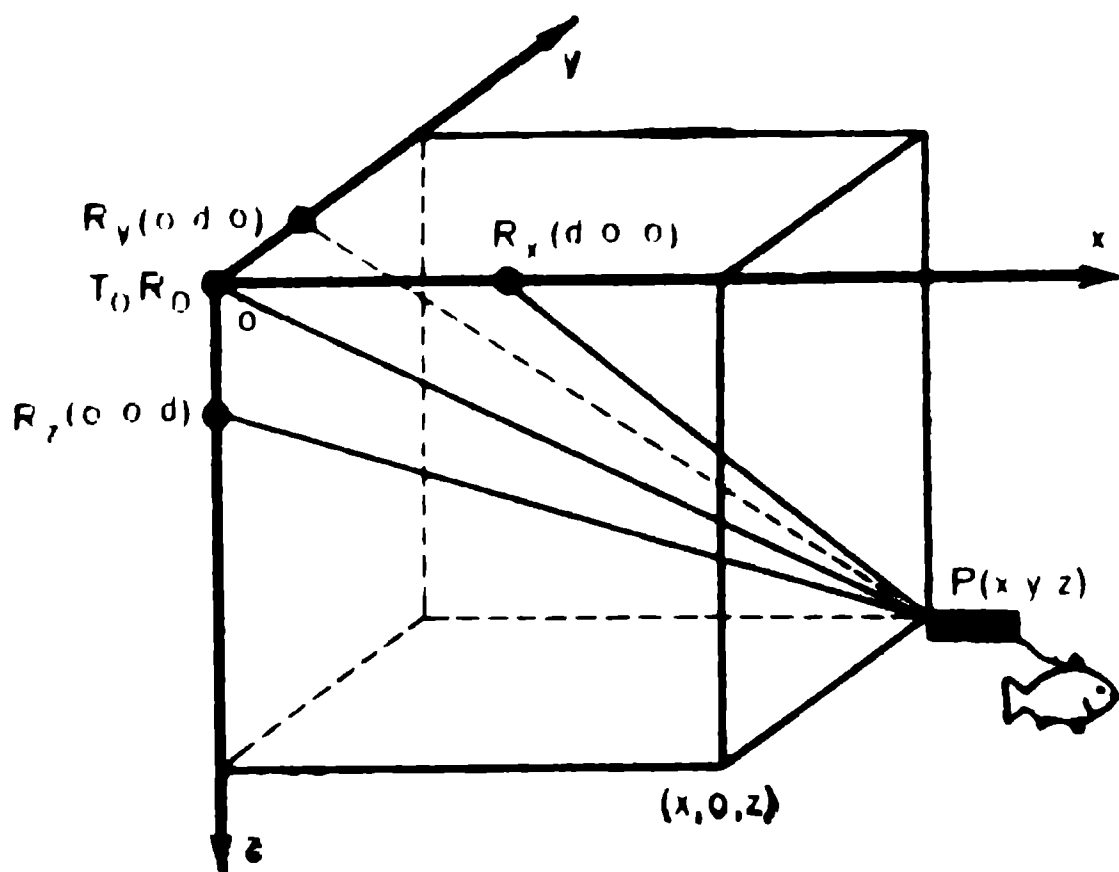


Рис. 22. Взаимосвязь между элементами приемопередающего биотелетрического комплекса [184]. Координаты:  $P$  — приемоответчика (метка на рыбе);  $T_0$  — передатчика;  $R_0$ ,  $R_x$ ,  $R_z$  — приемников.

щего импульса вызова),  $t_x$  — время прихода ответного сигнала к гидрофону в точке  $R_x (d, 0, 0)$ ,  $t_z$  — время прихода ответного сигнала к гидрофону в точке  $R_z (0, 0, d)$ .

Координаты рыбы  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , несущей приемоответчик, вычисляются компьютером по формулам:

$$x = \frac{v^2 t_0 (t_0 - t_x)}{2d};$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{v t_0}{2}\right)^2 - x^2};$$

$$z = \frac{v^2 t_0 (t_0 - t_z)}{2d};$$

где  $v$  — скорость звука в воде.

Вычисленные координаты  $x$  и  $y$  регистрируются двухкоординатным самописцем. Дополнительным двухканальным самописцем регистрировались глубина  $z$  и температура среды.

Полевые испытания аппаратуры в озере показали, что эффективная дальность и угол поиска составляли соответственно 600 м и  $50^\circ$ , точность регистрации местоположения около  $\pm 5\%$ , точность регистрации температуры  $\pm 0,3^\circ \text{C}$ .

В принципе для телеметрических исследований в природных условиях в качестве приемного устройства можно использовать гидроакустические рыбопоисковые станции, работающие в режиме горизонтального поиска. В этом случае частота наполнения импульсов ультразвукового передатчика должна соответствовать частоте этих станций.

Из отечественных приборов для исследований на внутренних водоемах наиболее пригоден гидролокатор «Лещ». Двухлетний опыт применения этого локатора при изучении перемещений волжских осетров показал, что сигнал передатчика можно принимать с расстояния до 1,5—2 км, однако точное определение местоположения меченой рыбы возможно только на малых дистанциях (50—100 м). В морских биотелеметрических исследованиях можно использовать серийные рыбопоисковые станции типа «Палтус» и «Сарган».

При телеметрических исследованиях трески в Баренцевом море Д. Дален [140] в качестве приемного устройства использовал сонар «Симрад СК-120», при этом передатчики работали на частоте 120—123 кГц. Точность определения местоположения меченой рыбы относительно исследовательского судна составляла при угле луча сонара  $4,5^\circ$  100—120 м на расстоянии 700 м и глубине 220—250 м.

Следует отметить, что синхронизация рабочих частот передатчика и гидролокатора в принципе может обеспечить запись сигнала на эхо-диаграммную ленту самописца. Это позволяет изучать не только перемещения меченых рыб, но и «видеть» все живое население, окружающее их во время наблюдений. Для этого необходимы передатчики-приемоответчики, способные на запрос выдавать сигналы, строго синхронизированные с работой приемного тракта гидролокатора.

\* \* \*

Выше были рассмотрены передатчики и приемные устройства ПБТС. Параллельно с данными о местоположении и физиологическом состоянии рыбы при биотелеметрических исследованиях необходимо собирать информацию о состоянии водной среды, а часто — и о метеорологической обстановке в районе работ.

Для удобства и быстрого снятия в воде показателей освещенности, температуры, рН, электропроводности регистрирующие приборы целесообразно смонтировать в один гидроизмерительный блок. Нами разработан гидрокаппаметр, объединяющий электротермометр, измеритель подводной освещенности и реохордный мост для измерения электропроводности воды [21].

Для измерения температуры в гидрокаппаметре применена электрическая схема с транзисторным датчиком. Известно, что повышение температуры эмиттерного перехода на  $1^\circ\text{C}$  уменьшает падение напряжения на нем на 2,0—2,5 мВ [106]. Это вызывает соответствующее изменение тока базы, которое усили-

вается самим транзистором и создает падение напряжения на нагрузке коллектора. Оно и служит показателем изменения температуры. Схема такого электротермометра может быть рассчитана на широкий диапазон температур от 0 до 30° С с точностью отсчета до  $\pm 0,2^\circ$ .

Измеритель электропроводности собран на основе реохордного моста Р-38 с питанием от сухих элементов «Сатурн» или КБС.

Для измерения освещенности в пределах 0,5—20 000 лк в приборе использован метод неуравновешенного моста, в котором величина измеряемого светового потока определяется напряжением или силой тока в диагонали моста. Датчиком может служить герметизированный фоторезистор типа ФСК-Г1. Для стабилизации параметров фоторезисторов их необходимо подвергнуть искусственному старению в лабораторных условиях. В качестве измерительного прибора могут быть использованы микроамперметры с пределами измерений 25—100 мкА.

Показания гидрокаппметра переводят по тарировочным таблицам в истинные значения регистрируемых факторов. Такой прибор удобен в работе и позволяет измерять сумму параметров на любых глубинах внутренних водоемов в заданных точках за 1—2 мин.

В морских условиях для контроля за условиями среды обычно пользуются серийными океанологическими приборами [107], необходимые сведения о погодных условиях (температуре воздуха, атмосферном давлении, осадках, облачности, направлении и силе ветра и др.) оператор-биотелеметрист получает с помощью серийных судовых метеостанций или через централизованную сеть гидрометеослужбы.

## **ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ БИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В организационно-методическом плане комплекс полевых биотелеметрических наблюдений включает подготовку полигона исследований, отлов и мечение рыбы, съем репрезентативной информации о ее местоположении и жизнедеятельности и первичную обработку полученных данных.

### **Подготовка полигона**

Перед началом работ необходимо получить возможно более подробное представление об экологической ситуации на предполагаемом участке трасс движения меченых рыб в соответству-

ющий задаче исследования отрезок времени. Обычно это достигается предварительным рекогносцировочным обследованием будущих полигонов с последующим составлением экологических картосхем, содержащих сведения о рельефе дна, течениях, качестве грунта, местоположении резкоградиентных зон температуры и химических показателях воды. Обязательно учитываются возможные ориентиры или помехи антропогенного происхождения: местоположение трасс судового хода, подводных трубопроводов и кабелей, воздушных высоковольтных линий электропередач, источников инфразвука и т. п.

Из биологических факторов большой интерес представляют распределение и обилие на полигонах ценозов водной растительности и наличие зон аккумуляции биомассы [72].

Знание экологической и навигационной ситуации существенно упрощает последующее слежение за меченой рыбой и облегчает проведение других подготовительных работ: расстановку на полигоне дополнительных ориентиров для пеленгации местоположения судна-спутника и рыбы и выбор точек гидрофизических и химических измерений.

## **Отлов и мечение рыб**

Отлов рыбы для мечения обычно производится активными орудиями лова в ночные часы, но целесообразнее пользоваться ставными ловушками. Травмированная при отлове и затем использованная в опыте рыба, как правило, дает некачественную экологическую информацию. Перед мечением пойманных рыб выдерживают в садке или прорези не менее 4—5 ч при небольшой плотности посадки.

Пребывание в руках экспериментатора вызывает у рыбы повышенное мускульное напряжение, быстро ее утомляющее. Это особенно заметно по изменению состава крови [128]. Для предотвращения этого при мечении некрупных рыб применяют анестезию [129]. Практика мечения рыб простыми метками показывает, что анестезия не уменьшает величину возврата рыб к своему домашнему участку [197, 198]. Анестезированных рыб легче и быстрее метить и метками-передатчиками. После мечения и прекращения действия наркотизирующих веществ нормальное поведение рыбы быстрее восстанавливается, что очень существенно при телеметрических наблюдениях, когда время опыта ограничено сроком работы передатчика. В качестве анестезирующих веществ используют уретан, этилалкоголь, феноксиэтанол, метасульфонат (MS-222), бензокаин [160, 200, 232, 241]. Дозировку обычно подбирают экспериментально так,

чтобы полностью снять мускульное напряжение рыбы на время крепления метки.

Крепление передатчика-метки на рыбу должно быть выполнено оперативно и без серьезных телесных повреждений. Как уже отмечалось, в зависимости от типа передатчика, вида рыбы, а иногда и от задачи исследования применяются различные способы крепления. В одних случаях передатчик вводится рыбе в желудок или полость тела (внутренняя метка), в других — он крепится к телу рыбы (наружная метка). Введение передатчика в желудок легко производится с помощью трубки, внутренний диаметр которой несколько больше диаметра метки. Раскрыв пасть рыбы пружинным зевником, вставляют в глотку эту трубку, а через нее стержнем вводят передатчик (рис. 23). Опытный оператор вводит таким образом метку за 20—40 с.

На достаточно крупных особях рыб при длительных полевых исследованиях возможно хирургическое вживление передатчиков непосредственно в полость тела [257, 265]. Л. Харт и Р. Саммарфелт [159] провели серию опытов по вживлению передатчиков, масса которых составляла 0,6% массы подопытной рыбы, на сомиках *Pylodictis olivaris*, большеротом и полосатом окунях. Анестезированным рыбам скальпелем делали разрез в вентральной части тела (в 38—76 мм от брюшных плавников) в соответствии с размерами передатчика. В разрез вставляли предварительно продезинфицированный передатчик и рану зашивали нейлоновыми нитками. После вживления передатчика рыб двое-трое суток выдерживали для профилактики в растворе антибиотика (50 мг/л окситетрациклина). В случаях, когда оперированных рыб приходилось сразу выпускать в водоем, антибиотик инъецировали непосредственно в брюшную полость из расчета 55 мг на 1 кг живой массы. При поимке меченых особей через 5—24 мес было выявлено, что темп роста всех оперированных рыб был примерно одинаков. Разрезы хорошо заживали, и шрам от них был малозаметен. Следует добавить, что в случае необходимости датчик может быть выведен наружу отдельно от имплантируемого передатчика.

Наружные передатчики крепятся с помощью крючков (часто обычных рыболовных) и различных зажимов. Очень крупных рыб (акул, тунцов) иногда метят с помощью гарпуна, который вонзают в тело рыбы с таким расчетом, чтобы не задеть нервных центров [124, 132]. У острия гарпуна, которое остается в теле рыбы, вмонтирован передатчик.

На небольших рыбах передатчики крепят сбоку около жаберных крышек, а чаще — на спине, впереди или позади спин-

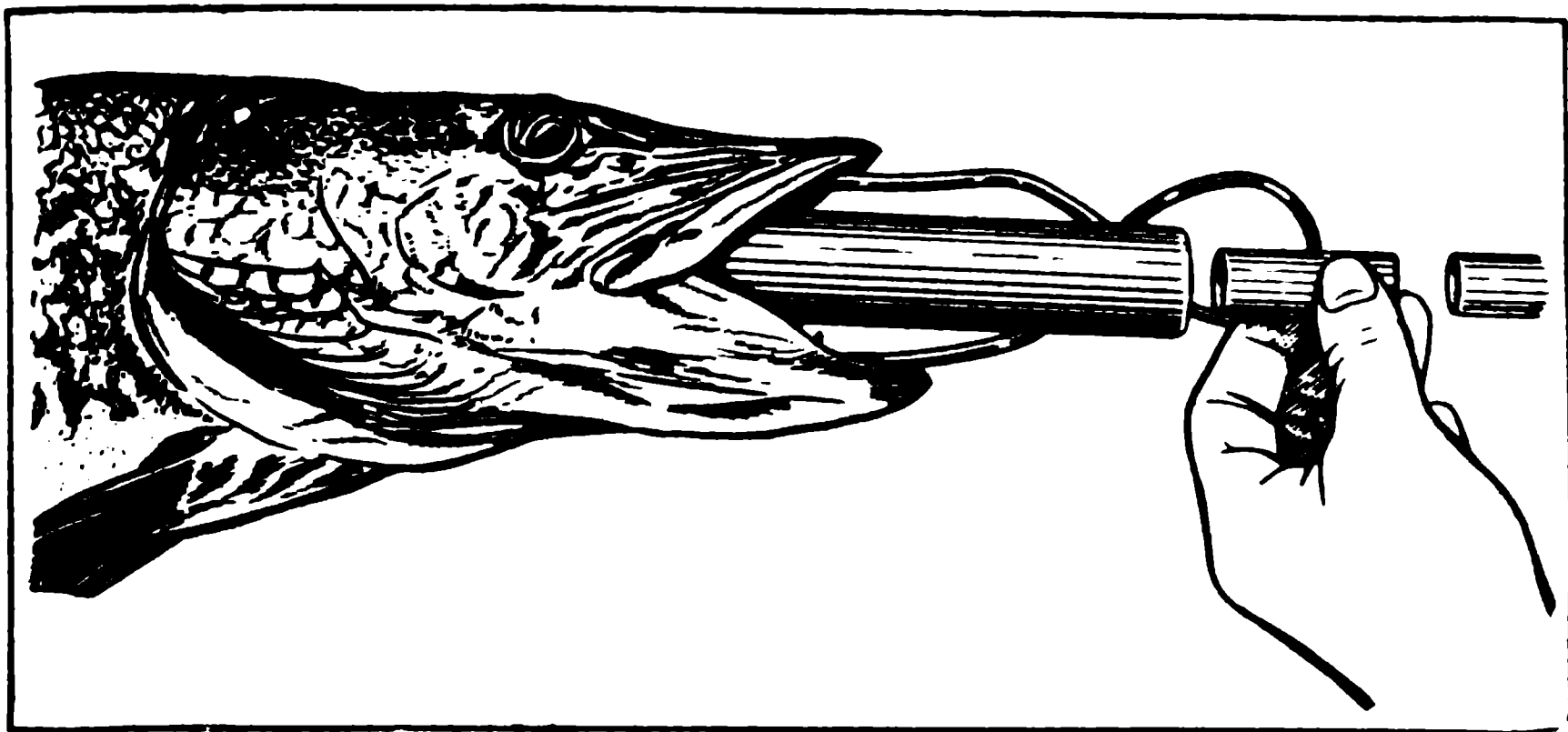


Рис. 23. Мечение рыбы внутренними передатчиками.

ного плавника, непосредственно на тело или как буксируемый буюк. Передатчики с отрицательной плавучестью лучше крепить непосредственно к телу рыбы.

На осетровых передатчик, выполненный в виде катамарана обтекаемой формы, легко крепится проволочными зажимами через отверстия в двух смежных спинных пластинках (жучках). Вся операция мечения рыбы занимает в этом случае 1—2 мин.

После мечения с анестезией или без нее рыбу, особенно небольших размеров, нужно выдержать некоторое время в садках, с тем чтобы она успокоилась и огдохнула. Д. Джонсон [171] уже в первых опытах установил, что рыбы, после мечения дольше находившиеся в садке, быстрее начинали направленное движение. Проведенные нами наблюдения за поведением меченых севрюг в прорезях показали, что все рыбы, выпущенные в реку сразу после мечения, длительное время скатываются вниз по течению, удаляясь от точки выпуска в отдельных случаях за сутки на 20—40 км. Отдельные особи при этом вообще прерывали свою нерестовую миграцию и выходили в море. Много меченых севрюг скатывались и после длительного многосуточного выдерживания в прорези. Оптимальным временем выдерживания кубанской севрюги в наших опытах оказалось 7—10 ч после поимки до мечения и 3—12 ч перед выпуском после мечения. В результате такого выдерживания удавалось свести дальность ската меченых рыб к 1—3 км и добиться последующего возобновления анадромной миграции рыбы, прерванной поимкой и мечением.



В случае необходимости выпуска рыбы в участки водоема с показателями температурного, газового и солевого состава воды, отличающимися от исходных, ей необходимо дать время для адаптации, постепенно уменьшая различия между средами. Известно, например [241—244], что адаптация угрей к перепаду солености, равному 30‰, наступает через 12 ч. Разница в температуре воды, равная 12°С, может вызвать реакцию отпугивания у леща и плотвы и полностью нарушить ход их миграции [73].

Сохранность передатчиков-меток зависит от их типа, вида рыбы и качества крепления. Как отмечает А. Стаско [231], передатчики-метки, введенные лососям в желудок, остаются в них до года. Миграции, подъем на нерест в реку и последующий скат в море у меченых рыб происходят нормально. Угри, по данным этого автора, способны выбрасывать внутренние передатчики почти сразу после выпуска в водоем. Это свойственно и многим другим видам рыб. Примечательно, что даже одни и те же виды у разных исследователей по-разному реагируют на введение внутренних (желудочных) меток. Например, Д. Кэнвиш с соавторами [174] отмечают частое выбрасывание меток атлантическим лососем и тунцом-скипджэком, в то время как у других исследователей эти виды сохраняют передатчики длительное время. В наших опытах щука с передатчиком в желудке более месяца жила в бассейне, нормально питаясь молодью рыб, а у Е. Кендла и Л. Морриса [178] она сразу же выбрасывала передатчик. Как показал наш опыт, для лучшего удержания внутренней метки целесообразно снабжать ее воронкообразной лепестковой манжеткой.

Важное значение при креплении передатчиков, несущих информацию о физиологических параметрах организма (ЭКГ, частота дыхания, температура тела), имеет расположение регистрирующих датчиков и электродов. В качестве электродов для регистрации ЭКГ и ритма дыхания предпочтительнее использовать золотые (платиновые) крючки или провода [150], уменьшающие величину потенциала поляризации. Размещение электродов вблизи сердца рыбы позволяет регистрировать одновременно оба показателя, но в этом случае возникают сложности с дешифровкой информации. Минимум помех от работы мышц достигается расположением электродов: одного — в области верхушки сердца, другого — позади ануса [150]. Для получения более чистой картины работы сердца электроды вводят симметрично по обе стороны грудной полости так, чтобы неизолированные части проводов касались предсердия и желудочка [120], но такое расположение электродов, видимо, целесообразно



только в лабораторном физиологическом эксперименте, где для исследователя чистота поведенческих реакций меченых рыб не имеет особого значения. Более совершенным следует считать размещение электродов на поверхности тела рыбы. Так, Е. Лонсдейл [187] разработал передатчики, которые могут регистрировать частоту биения сердца, и дал оптимальный для этих измерений вариант размещения электродов.

Если передатчик вводят рыбе в желудок, то для снятия ЭКГ один электрод выводят наружу под жаберными дугами и закрепляют вблизи сердца. Индифферентным электродом в этом случае служит металлический корпус передатчика [174].

Регистрация частоты дыхания может быть осуществлена по движению жаберных крышек. Для этого токорегистрирующие электроды вводят под кожу рыбы по обеим сторонам глотки [210]. Датчики температуры располагают на теле рыбы. В зависимости от цели эксперимента их вводят в анус, мышечную ткань или вместе с передатчиком в желудок [132].

При изучении физиологических процессов в желудке, кишечнике, кровеносных сосудах рыбы регистрирующие датчики вводят отдельно или вместе с передатчиком по методикам, разработанным в экспериментальной и клинической медицине для теплокровных животных и человека [7].

Массовое мечение рыб полостными метками для полевых биотелеметрических наблюдений, видимо, мало перспективно, так как оно вызывает не только искажение поведения рыб, но и их гибель. Известно, например, что смертность сельди при полостном мечении простыми магнитными метками размером  $19 \times 4 \times 1$  мм может достигать 49% общего числа меченых рыб [264].

### **Определение координат меченой рыбы**

Местоположение меченой рыбы может быть определено пятью методами: пеленгационным, триангуляционным, дальномерным, разностно-дальномерным и пеленгационно-дальномерным.

**Пеленгационный метод.** Пеленгатор, встроенный в приемную часть ПБТС, включает в себя блок направленных приемных антенн, приемно-усилительное и индикаторное устройства. Направление на источник излучения (передатчик-метку) определяется по максимуму, минимуму сигнала или по равносигнальной зоне. Наиболее удобен последний способ, удачно сочетающий высокую пеленгационную способность с широким углом обзора. Пеленгация по равносигнальной зоне основана на

сравнении с помощью соответствующей аппаратуры амплитуд, принятых по двум идентичным приемным антеннам с пересекающимися характеристиками направленности.

Если характеристики направленности обеих антенн идентичны, а направление на источник совпадает с прямой, проходящей через начало координат и точку пересечения характеристик направленности, называемой равносигнальным направлением, то амплитуды сигналов на выходе первой и второй антенны равны (рис. 24). В случае отклонения от равносигнального направления амплитуда сигнала в одной из антенн возрастает, а в другой — уменьшается. Разностный сигнал на выходе приемной аппаратуры

$$\Delta U_p(\Delta\psi) = U \left[ R_1 \left( \frac{\gamma}{2} + \Delta\psi \right) - R_2 \left( \frac{\gamma}{2} - \Delta\psi \right) \right],$$

где  $\gamma$  — угол смещения характеристик направленности;

$\psi$  — угол рассогласования;

$R_1$  и  $R_2$  — коэффициенты усиления каналов.

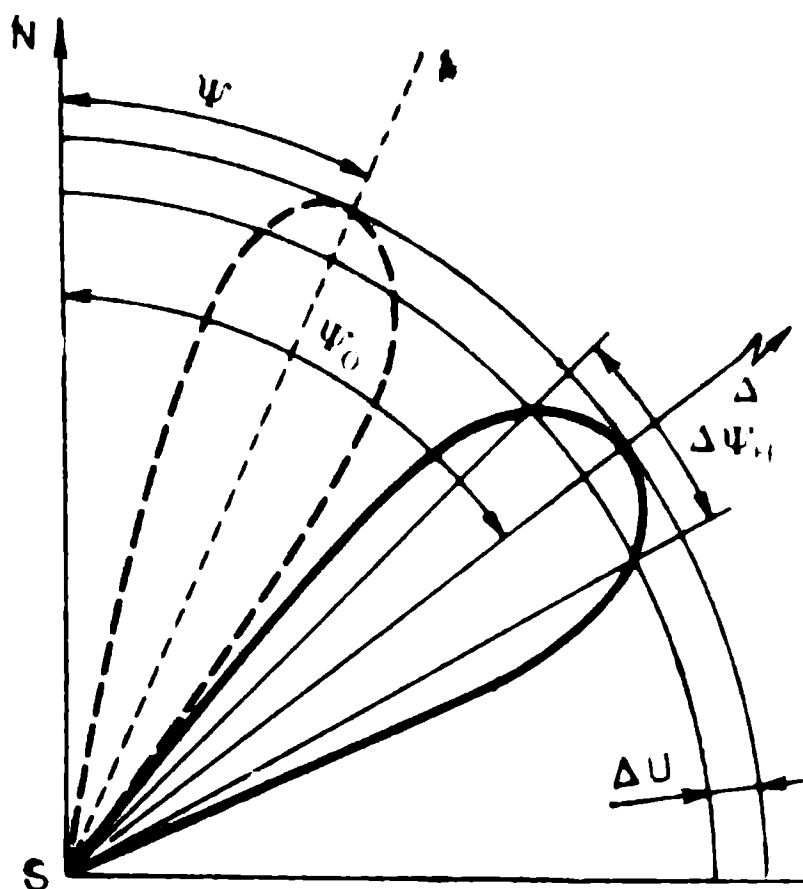
Таким образом, при наличии отклонения  $\Delta\psi$  между направлением на объект и равносигнальным направлением появляется разностный сигнал  $\Delta U_p(\Delta\psi)$ , величина и знак которого определяются углом рассогласования  $\Delta\psi$ . Выбирая угол смещения характеристик направленности таким образом, чтобы их пересечение происходило в области большой крутизны, можно получить высокую точность пеленгования с ошибкой  $\sigma_\psi$ , не превышающей единиц градусов. Следует отметить, что столь малая погрешность отсчета наблюдается при достаточно большом угле обзора. Например, при отклонении источника излучения от равносигнального направления на угол  $\pm 45^\circ$  суммарный сигнал на выходе приемника уменьшается всего на 50%.

Очевидно, что погрешность отсчета еще не определяет реальной точности метода пеленгации, а лишь указывает на его предельные возможности. Реальная точность пеленгования зависит не только от погрешности отсчета, но и от уровня помех, индивидуальных особенностей и производственных навыков оператора и точности определения базового направления.

Как показывает опыт, фактическая точность пеленгации указанным способом составляет  $\pm 2^\circ$  при дальности действия пеленгатора 1 км, что вполне удовлетворяет требованиям полевой биотелеметрии при массовых наблюдениях за миграцией рыб и других водных животных.

**Триангуляционный метод.** Пеленгацией можно определять не только направление на передатчик, но также и его местоположение в пространстве относительно пеленгационных станций.

Рис. 24. Пеленгация по методу равносигнальной зоны.



Этот метод основан на пеленгации объекта из нескольких пунктов наблюдений, расстояния между которыми (база) известны. В бистелеметрии нашла применение лишь одна модификация этого метода, когда изучаемый объект несет передатчик-метку, излучающий ненаправленные волны, а пеленгация осуществляется направленными приемными антеннами пеленгаторов. После взятия пеленга определение местоположения сводится к построению треугольника по двум углам (пеленгам) и прилежащей к ним стороне (базе). При этом пеленгацию можно осуществить не только в горизонтальной плоскости (по азимуту), но и в вертикальной плоскости (по углу наклона пеленга относительно плоскости горизонта). В общем случае с помощью этого метода можно определять местоположение меченой рыбы в пространстве.

Погрешность определения местоположения объекта в этом случае связана с линейной ошибкой, численно равной наибольшему расстоянию между его истинным положением и определенным в результате измерений. При совместной работе двух пеленгаторов каждый из них производит измерение со своей погрешностью, которая характеризуется поперечной линейной ошибкой.

Из теории ошибок [15] известно, что в случае, когда погрешность обусловлена суммарным действием многочисленных и разнообразных факторов, статистический закон распределения вероятности возникновения той или иной ошибки будет нормальным, или гауссовым. Вероятность  $P$  того, что отклонение пеленга от среднего значения не превысит некоторую наперед

заданную величину  $\Delta\psi_0$ , может быть найдена по следующей формуле [15]:

$$P[(\Delta\psi) < \sigma_\psi] = \int_{-\Delta\psi_0}^{\Delta\psi_0} W(\Delta\psi) d(\Delta\psi) = \Phi\left(\frac{\Delta\psi}{\sqrt{2} \sigma_\psi}\right),$$

где  $\Phi$  — табулированный интеграл вероятности;

$\sigma_\psi$  — среднеквадратичное значение погрешности определения пеленга;

$W$  — функция плотности вероятности.

При полевых работах общепринятым критерием точности пеленгации является значение погрешности  $\Delta\psi_b$ , которое не превысит ошибки пеленгации с вероятностью  $P_0$ . Значение  $\Delta\psi_b$  может быть найдено из таблиц интеграла вероятности.

Так, полагая, что среднеквадратичное отклонение пеленга  $\sigma_\psi = 0,2 \psi_n$  (угол нечувствительности), находим, что при пеленгации способом максимума  $\Delta\psi_{0,68} = 4^\circ$ ;  $\Delta\psi_{0,9} = 6,6^\circ$ ;  $\Delta\psi_{0,997} = 12^\circ$ . Соответственно, при пеленгации способом равносигнальной зоны  $\Delta\psi_{0,68} = 44'$ ;  $\Delta\psi_{0,9} = 1^\circ 13'$ ;  $\Delta\psi_{0,997} = 2^\circ 13'$ .

Очевидно, что точность определения местоположения маркированного гидробионта на местности зависит не только от погрешностей пеленгации, но и от расстояний между объектом и пунктами наблюдений [6, 30].

Наиболее эффективный способ повышения точности определения местоположения объекта — это уменьшение среднеквадратичной погрешности пеленгования. Однако, как показывает опыт, уменьшение погрешности гидроакустических пеленгаторов до  $1,5\text{—}2^\circ$  связано с рядом технических трудностей, преодоление которых вызывает существенное усложнение аппаратуры и увеличение ее стоимости. Точность приблизительно  $1\text{—}0,5^\circ$  была достигнута лишь в пеленгаторах, установленных на специально оборудованных судах или стационарных пунктах наблюдения.

**Дальномерные методы.** Эти методы определения местоположения объектов основаны на измерении модуля радиусов-векторов (дальности), характеризующих положение объекта относительно нескольких (минимум двух) пунктов наблюдения. После определения дальности задача сводится к вычислению координат объекта или построению треугольника по трем сторонам. Одна из этих сторон (база) заранее известна по величине и направлению, а две другие стороны определяются по результатам измерения. Определение дальности в дальномерных системах сводится к измерению временного запаздывания  $\Delta t_0$ , пропорционального дальности  $D$ .

При непосредственном приеме излученного сигнала

$$\Delta t_0 = \frac{D}{c},$$

где  $c$  — скорость распространения излученных колебаний в среде

При приеме излученного сигнала после его отражения от объекта

$$\Delta t_D = \frac{2D}{c}.$$

При приеме сигнала после его переизлучения объектом (приемоответчиком)

$$\Delta t_D = \frac{2D}{c} + t_3,$$

где  $t_3$  — время задержки переизлучателя.

В зависимости от вида излучаемого сигнала определение временной задержки  $\Delta t_D$  производится путем измерения фазового, частотного или непосредственно временного сдвига принимаемого сигнала относительно опорного. В водной среде наибольшее распространение получил импульсный метод измерения дальности. Этот метод заключается в том, что в режиме «Передача» дальномер излучает кратковременный импульс высокочастотных колебаний, который, распространяясь в среде, достигает объекта и отражается или переизлучается им. Отраженный или переизлученный сигнал принимается приемным устройством дальномера и после соответствующей обработки подается на индикатор, позволяющий измерить запаздывание принятого сигнала по отношению к моменту времени послышки зондирующего импульса [115].

При определении местоположения подводных биологических объектов импульсно-дальномерный метод успешно применяется как в чистом виде [205], так и в сочетании с другими методами — разностно-дальномерным [184] и пеленгационно-дальномерным [249].

Реализация импульсно-дальномерного метода не требует пространственной ориентации приемных антенн на источник излучения. Эта особенность является несомненным достоинством метода и позволяет с помощью сравнительно несложных технических средств обеспечить автоматизацию процесса измерения. Важное достоинство метода также состоит в том, что измеряемой величиной являются временные интервалы, техника измерения которых разработана достаточно хорошо. В табл. 3 приведены результаты локализации приемоответчика, находящегося на разных дистанциях и глубинах.

## Точность импульсно-дальномерного метода [184]

Глубина погружения приемоответ- чика, м	Дистанция измерений, м		
2	49,5	99	198
	47—50	106—109	209—210
5	49,7	99	198
	48—50	107—109	209—211
10	50,5	99	198,5
	48—50	108—109	211—212
20	53,4	99,5	199
	49—51	108—110	211—213
40	63,7	101	202
	—	190—110	213—215
60	77,8	107	207
	—	113—116	—

Примечание. В числителе приведено фактическое расстояние между приемной антенной и передатчиком, замеренное с точностью  $\pm 0,5$  м в диапазоне 50—70 м,  $\pm 1$  м в диапазоне 99—107 м и  $\pm 2$  м в диапазоне 198—207 м; в знаменателе — результаты измерений этих расстояний импульсно-дальномерным методом по сигналу приемоответчика.

Из таблицы видно, что практически реализованная точность достаточно высока; погрешность локализации, усредненная по результатам многих измерений, лежит в пределах  $\pm 5—6\%$ .

К сожалению, столь высокая точность определения местоположения подводных биологических объектов импульсно-дальномерным методом может быть реализована лишь в тех случаях, когда объект несет на себе не простой ультразвуковой передатчик (УЗП), а приемоответчик и расстояние между приемными станциями приблизительно равно расстоянию от станции до объекта.

Первое из отмеченных обстоятельств накладывает ограничения по отношению к размерам, энергопотреблению и стоимости передатчика, поскольку приемоответчик значительно сложнее, чем обычный УЗП-маркер.

Второе обстоятельство практически исключает возможность использования импульсно-дальномерного метода при определении местоположения рыбы с движущегося судна, поскольку

обеспечить согласованное перемещение нескольких пунктов наблюдения при сохранении между ними с требуемой точностью определенного взаимного расположения весьма затруднительно.

Учитывая изложенное выше, можно заключить, что импульсно-дальномерный метод целесообразно применять в тех случаях, когда оправдана необходимость организации стационарных пунктов наблюдения для регистрации поведения гидробионтов на небольшом по акватории участке, например в зоне гидроузлов, орудий лова, на местах нереста.

Разностно-дальномерный метод определения местоположения гидробионта основан на связи между разностью расстояний от объекта до двух пунктов приема и его местоположением. Причем, если объект перемещается в пространстве таким образом, что разность расстояний будет оставаться постоянной, то он будет описывать траекторию в виде гиперболы. Пункты приема сигналов будут фокусами этой гиперболы. Разность расстояний определяется путем измерения времени запаздывания сигнала, принятого, например, на второй станции относительно первой. Для этой цели передатчик, установленный на гидробионте, излучает сигнал, параметр которого меняется с определенным периодом. Этим параметром может быть как частота наполнения, фаза наполнения, так и амплитуда. Наиболее простой и широко применяемый вид сигналов — периодически повторяемые радиоимпульсы. Разность времени прихода  $\Delta t$  измеряется как разность между передними фронтами радиоимпульсов.

Для определения координат разностно-дальномерным методом находят точку пересечения двух гипербол, построенных для двух различных пар станций (баз). При этом одна из этих станций может быть общей для каждой пары. Такой вариант показан на рис. 25, здесь станция *B* является общей в системе станции *AB* и *BC*.

Рассмотрим, как осуществляется привязка результатов измерений при разностно-дальномерном методе к географическим координатам акватории. Эта привязка может быть выполнена несколькими способами, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Простейший способ — географическое определение точки пересечения линий положения, соответствующих измеренным значениям  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ . Очевидно, что этот способ требует предварительного построения на мелкомасштабной карте выбранной акватории семейства гипербол, определяемых уравнением

$$Ax^2 + Bx + Cy + Dxy - Ey^2 = 0,$$

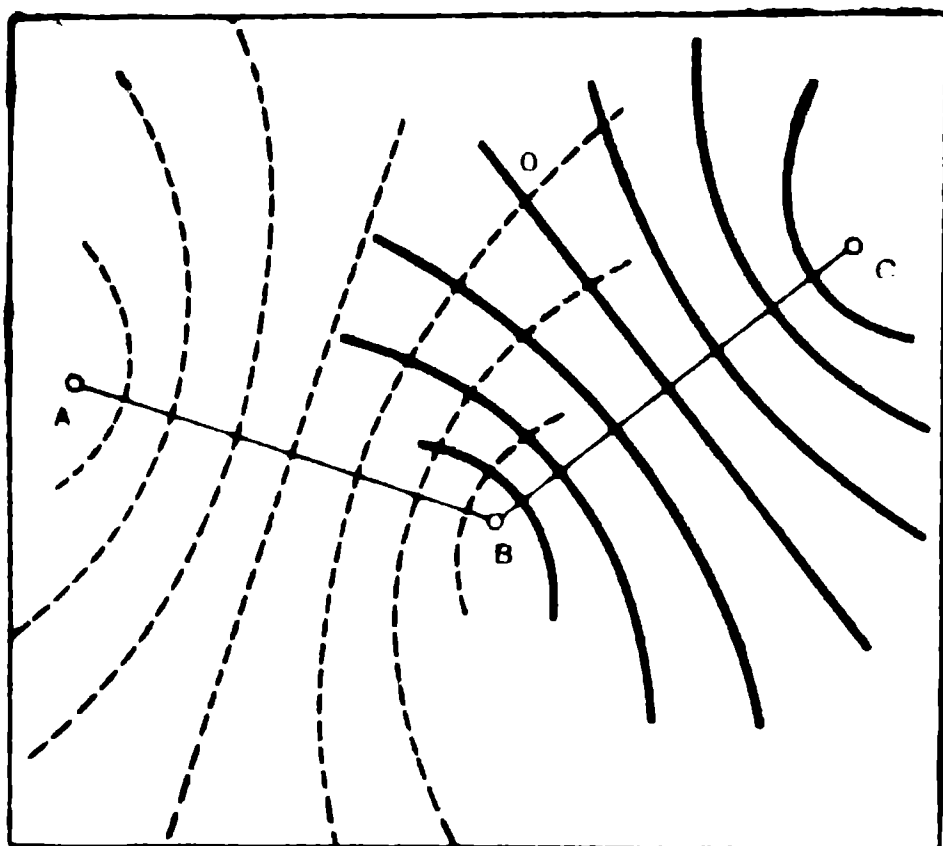


Рис. 25. Семейства гипербол, построенных для двух пеленгаторных баз.

где  $x$  и  $y$  — текущие координаты гиперболы в прямоугольной системе координат, привязанной к карте акватории;

$A, B, C, D$  и  $E$  — коэффициенты, зависящие от координат центра, длины, угла поворота базы относительно оси  $x$ , а также от параметра гиперболы  $\Delta\tau$ .

Расчет и построения таких семейств, а тем более систем семейств с требуемой дискретностью по  $\Delta\tau$  — весьма трудоемкий процесс, но такая работа также может оказаться полезной при детализации передвижения объекта в ограниченной акватории с помощью стационарных станций. Если необходимо проводить наблюдения за объектом в нескольких районах, что связано с перемещением пунктов наблюдения и переориентацией баз, а следовательно, и построением новых семейств гипербол, графический способ местоопределения представляется малопродуктивным и весьма громоздким. Более оперативным является аналитический способ. В этом случае определение географических координат объекта сводится к совместному решению двух уравнений второй степени, каждое из которых характеризует семейство гипербол:

$$\begin{cases} A_1x^2 + B_1x + C_1y + D_1y - E_1y^2 = 0, \\ A_2x^2 + B_2x + C_2y + D_2y - E_2y^2 = 0, \end{cases}$$

где  $A_1, A_2, B_1, B_2$  и т. д. — функции положения баз (фокусов гипербол);  
 $x$  и  $y$  — текущие координаты в прямоугольной системе координат, привязанной к географической карте выбранной акватории.

Приведенная система уравнений сводится к полному уравнению четвертой степени, имеющему четыре решения. Это



приводит к неоднозначности в определении координат, которая может быть исключена в результате соответствующего исследования корней.

Оперативное выполнение работы в таком объеме вручную практически невозможно и требует применения электронных вычислительных машин. Это обстоятельство значительно усложняет методику и технику выполнения работ и делает возможным применение разностно-дальномерного метода также главным образом в стационарных условиях.

Успешное применение разностно-дальномерного метода описано А. Хокинзом с соавторами [164] при прослеживании трески в одном из заливов Шотландии. Изучаемая ими акватория имела площадь  $450 \times 250 \text{ м}^2$ . Сигналы передатчика, установленного на рыбе, обнаруживались с помощью пяти гидрофонов и после предварительного усиления передавались по кабельным линиям связи к мобильной лаборатории, расположенной на берегу. Сигналы от всех гидрофонов после предварительной обработки регистрировались на специальном многоканальном магнитофоне с последующей обработкой на ЭЦВМ.

Для предварительной оценки местоположения рыбы использовались два семейства гипербол, заранее рассчитанных с помощью ЭЦВМ для нескольких вариантов визуального расположения приемных станций, нанесенных на мелкомасштабную батиметрическую карту залива. Полученная этим методом погрешность определения местоположения не превышала  $\pm 1 \text{ м}$ .

Пеленгационно-дальномерный метод определения местоположения гидробионтов представляет собой комбинацию триангуляционного и дальномерного методов. Местоположение объекта можно представить не только в декартовой системе координат, но и в полярной. При этом местоположение определится радиусом-вектором, опущенным из начала координат. Однако радиус-вектор характеризуется модулем и направлением, т. е. расстоянием до объекта и полярным углом относительно выбранного направления. Таким образом, определяя дальность дальномерным способом, а угол — пеленгацией, можно из одной точки и относительно этой точки определить координаты объекта.

В литературе описано несколько модификаций этого метода применительно к задачам подводной биотелеметрии. Впервые пеленгационно-дальномерный метод в подводной биотелеметрии был применен в 1957 г. [249]. Используемое оборудование представляло собой комбинацию пеленгатора ультразвуковых сигналов и гидролокатора. Приемноизлучающие антенны этих устройств были совмещены в едином блоке. Пеленгация

объекта, несущего маркерный УЗП, осуществлялась как в горизонтальной, так и вертикальной плоскости методом равносигнальной зоны, а определение дальности цели — с помощью гидролокатора. При этом использовалось отражение лоцирующих сигналов от плавательного пузыря рыбы. Антенна гидролокатора наводилась на объект, несущий УЗП, с помощью пеленгатора, работающего в автоматическом режиме. Используемая в этой работе методика и принципы построения приемной аппаратуры не утратили свою актуальность и в настоящее время.

Интересная модификация пеленгационно-дальномерного метода была предложена Р. Митсоном и Т. Сторетон-Вестом [205] с использованием приемоответчиков (передатчиков с переизлучением). Однако, несмотря на то что дальность систем с переизлучением выше, чем у простых передатчиков, проведение исследований в условиях мелководья этим методом также затруднительно.

Для проведения экспериментов в пресноводных водоемах нами предложен метод, позволяющий определять местоположение гидробионта на средних и малых дистанциях с точностью, которую обеспечивают пеленгационно-дальномерные методы. Сущность этого метода заключается в использовании двух каналов связи, в одном из которых скорость распространения значительно выше, чем в другом. В качестве первого канала используется радиоканал в диапазоне УКВ, второго — ультразвуковой. Расстояние до объекта определяется здесь разностью между временем прихода гидроакустического и радиосигналов и ограничено лишь дальностью действия радиоканала.

Как видно из изложенного, применение высокоточных методов определения местоположения меченой рыбы требует сложных инженерно-технических средств и высококвалифицированных специалистов для их обслуживания. Это не всегда оправдано, особенно при проведении полевых наблюдений, требующих прослеживания пути массы меченых объектов на большой акватории с различными характеристиками. В этих случаях получение информации о поведении рыбы осуществляется с помощью судна, оснащенного приемной аппаратурой и постоянно следующего за сигналом передатчика [45, 47, 51, 72, 144, 162, 241].

В связи с тем что дальность действия ультразвуковых передатчиков ограничена и лишь в редких случаях превышает 2—3 км, для определения местоположения рыбы, постоянно движущейся в одном направлении и способной уйти на расстояние, превышающее радиус действия передатчика, судно должно постоянно находиться вблизи от рыбы, но не подходить к ней

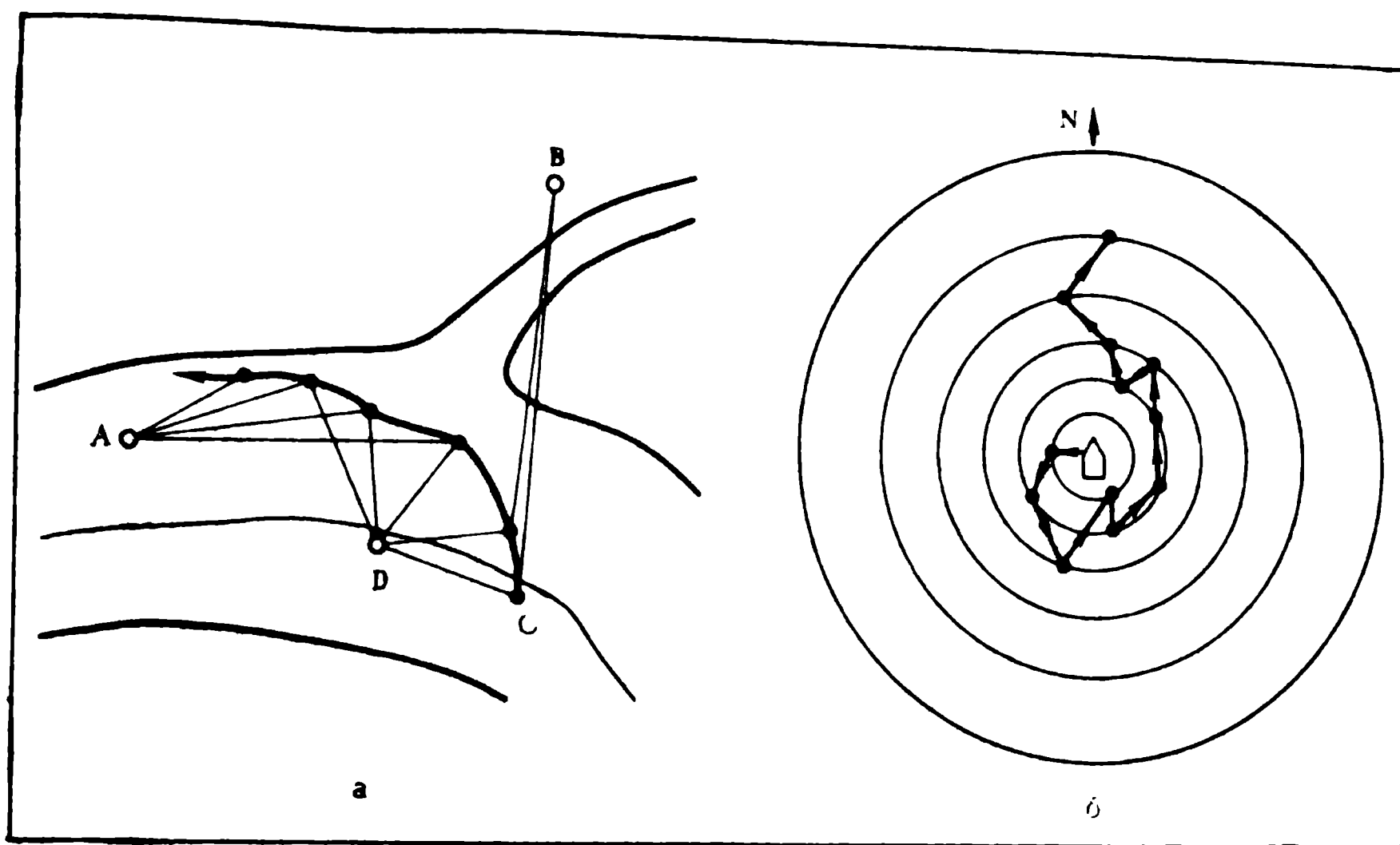


Рис. 26. Определение местоположения меченой рыбы:

*а* — пеленгация судна по двум неподвижным ориентирам *АВ* и *ВС*; *б* — пеленгация рыбы относительно судна по углу и величине приходящего сигнала

вплотную, чтобы на ее поведении не отразились шумы винтов или тень корпуса.

Это усложняет пеленгацию повременного расположения меченой рыбы, поскольку здесь возникает необходимость определения двух мобильных точек: судна и рыбы. Для определения местоположения объекта в этих случаях применяется упрощенный триангуляционный метод.

Положение судна определяется секстаном по углам между двумя-тремя известными и нанесенными на карту района работ ориентирами *ABCD* (рис. 26, *а*). При этом более точное определение координат будет тогда, когда угол между смежными ориентирами составляет около  $45^\circ$ . При перенесении этих углов на карту получим местоположение судна в данный момент. При наличии на судне радиолокатора предпочтительнее определять координаты по нему, что не только упрощает процесс пеленгации, но и повышает ее точность.

Одновременно с пеленгацией судна необходимо определить расположение рыбы относительно судна в полярной системе координат по углу разворота антенн и расстоянию, вычисляемому по величине приходящего в приемник сигнала (рис. 26, *б*).

В некоторых случаях пеленгацию катеров, ведущих наблюдение за движением меченых рыб, удобно вести по следующей схеме: судно-база, оборудованное радиолокатором и находящее-

ся на якорной стоянке, пеленгует исследовательский катер. После выхода катера из зоны действия радиолокатора судно-база меняет стоянку, выходя в зону видимости катера. В этом случае определение координат меченой рыбы состоит из трех этапов: сначала судно-база определяет свое местоположение относительно береговых ориентиров, затем оно радиолокатором пеленгует исследовательский катер и, наконец, с катера определяют вектор направленности на рыбу.

Оценим погрешности, возникающие при определении координат рыбы, таким способом. Погрешности в отсчетах пеленга можно разделить на две группы. Первые определяются конструктивными особенностями пеленгационной аппаратуры (секстанов, радиолокаторов, компасов). Величины этих погрешностей известны и указаны в описаниях соответствующих приборов. Вторая группа погрешностей трудно учитываема и связана с распространением звука в воде, волнением на поверхности водоема, когда работа с навигационными приборами на качающемся судне затруднена недостаточной видимостью ориентиров, и с таким субъективным фактором, как степень опытности оператора.

Погрешность определения местоположения меченой рыбы  $\Delta\sigma$  состоит из суммы погрешностей пеленгации судна  $\Delta\sigma_c$  и пеленгации рыбы относительно этого судна  $\Delta\sigma_p$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_p.$$

Погрешность пеленгации судна  $\Delta\sigma_c$  в идеальном случае зависит только от точности навигационных приборов (секстанов, радиолокаторов) и может быть известна. Погрешность пеленгации рыбы относительно судна определяется точностью угла направленности приемных антенн и расстоянием между рыбой и судном. Первый показатель связан с конструктивными особенностями телеметрической аппаратуры и составляет для приборов типа «Пеленг»  $\pm 2-3^\circ$ . Второй показатель зависит от погрешности определения величины сигнала, условий прохождения ультразвука в воде (рельефа дна, течений, количества взвешенных частиц) и, поскольку диаграмма направленности излучателя обычно не строго круговая, — от ориентации излучателя передатчика относительно приемных антенн. Необходимо также учитывать и то обстоятельство, что по мере истощения источника питания мощность излучаемого сигнала падает. Последнего можно избежать стабилизацией питания, т. е. ограничивать работу передатчика таким образом, чтобы при резком падении напряжения, когда величина сигнала начинает уменьшаться, передатчик отключался.



За местоположение меченой рыбы принимается четырехугольник  $ABCD$ , стороны которого можно вычислить по расстоянию до рыбы и угловой погрешности:

$$AB = 2 (s_p - \Delta s_p) \operatorname{tg} \frac{\Delta \sigma_c + \Delta \sigma_p}{2} ;$$

$$CD = 2 (s_p - \Delta s_p) \operatorname{tg} \frac{\Delta \sigma_c + \Delta \sigma_p}{2} ,$$

где  $\Delta \sigma_p$  — угловая погрешность направления пеленга на рыбу;  
 $\Delta s_p$  — абсолютная погрешность в определении расстояния от катера до рыбы.

$$AD = BC = 2\Delta s_p \text{ при } s_p = 200 \text{ м.}$$

При максимальной ошибке, равной 30%,  $\Delta s_p = \pm 30$  м. Отсюда:

$$AB = 2 (200 - 30) \operatorname{tg} \frac{5^\circ + 3^\circ}{2} = 25 \text{ м;}$$

$$CD = 2 (200 + 30) \operatorname{tg} \frac{5^\circ + 3^\circ}{2} = 32 \text{ м;}$$

$$AD = BC = 60 \text{ м.}$$

Таким образом, при удалении катера от рыбы на расстояние 200 м она находится в пределах четырехугольника со сторонами 25, 32, 60, 60 м.

При работе в больших водоемах расстояние между катером и выбранными ориентирами значительно больше. Точность определения координат судна и соответственно меченой рыбы при этом резко уменьшается. Здесь необходимо устанавливать дополнительные ориентиры (буи, вехи) или, если это невозможно, периодически подходить к меченой рыбе на минимально близкое расстояние и принимать местоположение катера за положение рыбы. Общая погрешность при этом будет определяться только погрешностью пеленгации судна. Например, при удаленности береговых ориентиров, по которым ведется отсчет координат, на 1 км за местоположение рыбы (судна) принимается четырехугольник со сторонами  $x_c = 2 \times \times 1000 \times 0,43 = 86$  м, или при масштабе карты 1:10 000 — квадрат со сторонами 1 см. При изучении перемещений проходных рыб, например осетровых, которые мигрируют со скоростью около 1 км/ч, эта погрешность не мешает достоверно трассировать путь рыб и рассчитывать суточные ритмы их активности.

Иначе обстоит дело, если в качестве изучаемого объекта взята малоподвижная или немигрантная рыба, для которой

требуется детализация поведенческих реакций на ограниченной акватории. В этих случаях определение местоположения меченой рыбы с минимальной заданной точностью наиболее просто осуществляется регистрацией углов направленности приемных антенн с нескольких стационарных точек [94]. Точка пересечения этих углов и дает положение рыбы. Следует отметить, что существенным недостатком этого способа является множество сопоставлений курсовых углов, что замедляет обработку данных, однако она может быть ускорена автоматизацией процесса считывания.

Угловые направления от приемных устройств до рыбы образуют здесь так называемый четырехугольник ошибки. Форма и размеры этого четырехугольника зависят от положения меченого объекта относительно приемников. Ошибка минимальна, если угол между направлениями пеленга от двух приемников равен  $90^\circ$ . Здесь четырехугольник принимает форму квадрата со сторонами  $x$

$$x = 2s \operatorname{tg} \frac{\Delta\sigma_c}{2}.$$

При расстоянии рыбы от приемников, равном 100 м, для приемного устройства ГАП ( $\Delta\sigma_c \pm 3^\circ$ )  $x = 4,5$  м.

### Ход наблюдений

После того как меченая рыба выпущена в точке, определенной программой наблюдений, при непосредственном следовании судна за рыбой оператор по появлении сигнала передатчика на приемном устройстве направляет приемную антенну точно на рыбу, определяет курсовой угол и примерное расстояние до нее или периодически подходит вплотную к рыбе на катере, если она идет на глубине. Затем он пеленгует местоположение катера по береговым ориентирам. Моторист-рулевой, ориентируясь по стрелочному приспособлению, дублирующему положение приемной антенны, поддерживает курс судна соответственно движению рыбы, не подходя к ней ближе, чем на 100—150 м. Оператор через определенный интервал времени определяет местоположение рыбы и катера и наносит данные на навигационную крупномасштабную карту. Если передатчик снимает дополнительную информацию о физиологическом состоянии рыбы, глубине и скорости ее плавания, температуре воды и тела рыбы и т. п., то в моменты определения местоположения рыбы оператор одновременно считывает и записывает данные о частотах следования, наполнения



и длительности импульсов, в которых зашифрована эта информация. В процессе слежения постоянно ведется журнал наблюдений, регулярно по ходу движения рыбы с помощью гидроизмерительной аппаратуры и визуально замеряют параметры среды (облачность, видимость солнца, погодные условия, глубина, температура, рН, электропроводность и прозрачность воды и др.).

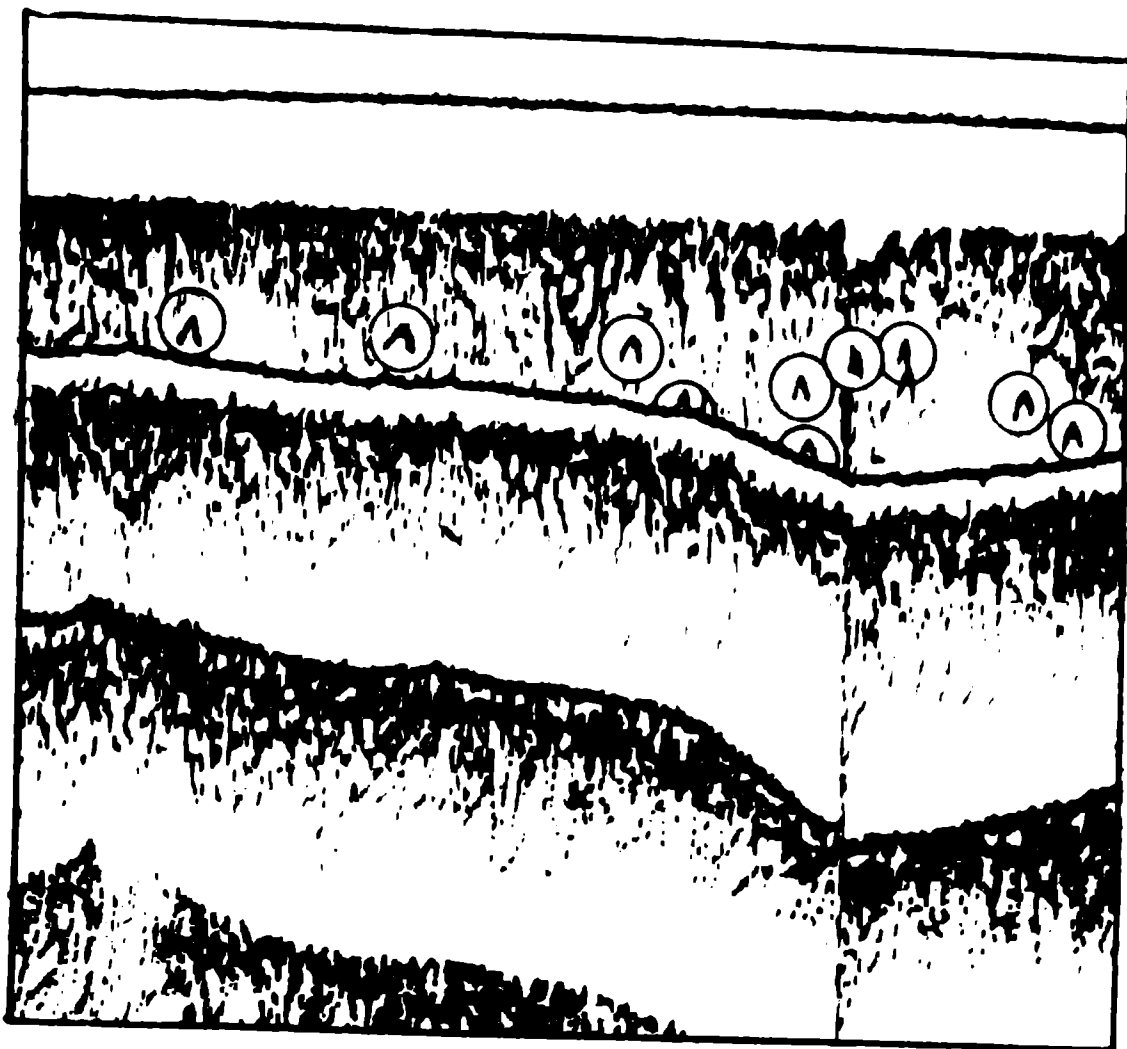
При возможности использования более совершенных образцов телеметрической аппаратуры, снабженной буквопечатающими или магнитными запоминающими устройствами, данные о среде и физиологическом состоянии рыбы расшифровываются позднее, и оперативная работа в процессе слежения упрощается.

В связи с тем что телеметрические наблюдения проводятся непрерывно в течение длительного времени, для работы на аппаратуре требуется несколько операторов, подготовку которых желательно производить до начала экспериментов. Отработку с операторами способа отыскания местоположения рыбы по сигналам передатчиков можно вести в соответствии с основными положениями теории поиска [3] и руководствуясь известной схемой спортивной радиоигры «Охота на лис».

Резкое повышение информативности наблюдений и точности определений местоположения меченой рыбы достигается, если судно-спутник оборудовано гидролокатором горизонтального действия, совмещенным с приемной частью ПБТС. В этом случае оператор на ленте самописца и экране локатора в нужный момент видит и регистрирует всех рыб исследуемого и других видов, может оценить их численность, степень агрегированности особей, положение в толще воды относительно дна (рис. 28) и по сигналам передатчиков-меток — местонахождение меченых рыб в стаях и скоплениях. Получаемые при этом данные о групповом поведении рыб представляют большой самостоятельный интерес и одновременно существенно расширяют сведения о «биологическом фоне», на котором реализуются поведенческие реакции и рецепторно-аналитическая деятельность меченых особей.

При работе на ограниченной акватории, когда необходимо документировать относительно короткие перемещения меченых рыб и их реакции на естественные или вводимые раздражители, используется стационарная служба биотелеметрических наблюдений. В этом случае комплекты приемной аппаратуры, установленные в двух-трех характерных береговых точках полигона, «просматривают» нужную акваторию, регистрируя заход, перемещение и выход из нее меченых рыб. Точ-

Рис. 28. Образец эхо-записи в районе нахождения меченой рыбы.



ная пеленгация передатчиков осуществляется при этом триангуляционным или одним из дальномерных методов.

При триангуляционном методе операторы, обслуживающие приемные устройства, должны регистрировать угловые направления антенны на рыбу синхронно, для этого им целесообразно иметь двустороннюю радиотелефонную связь. В наших работах успешно применялись типовые переносные радиостанции с радиусом устойчивого действия, равным приблизительно 5 км.

Оборудование стационарных пунктов наблюдения гидролокаторами значительно повышает эффективность биотелеметрических наблюдений.

### **Обработка данных биотелеметрических наблюдений**

На основе информации о местоположении меченой рыбы, собранной с заданной во времени степенью дискретности, можно нанести на картосхему ее путь, определить пройденное расстояние, получить траекторию движения в плане и по глубине, рассчитать скорость и обобщить данные о суточной ритмике двигательной активности рыбы.

Закодированные физиологические данные дешифруют и составляют таблицы и графики суточной динамики исследуемых параметров с привязкой их к трассе движения рыбы, а также таблицы и, по возможности, картосхемы распределения на участках прослеживания абиотических факторов среды и

численности немеченых рыб. На этом заканчивается первый этап обработки биотелеметрической информации.

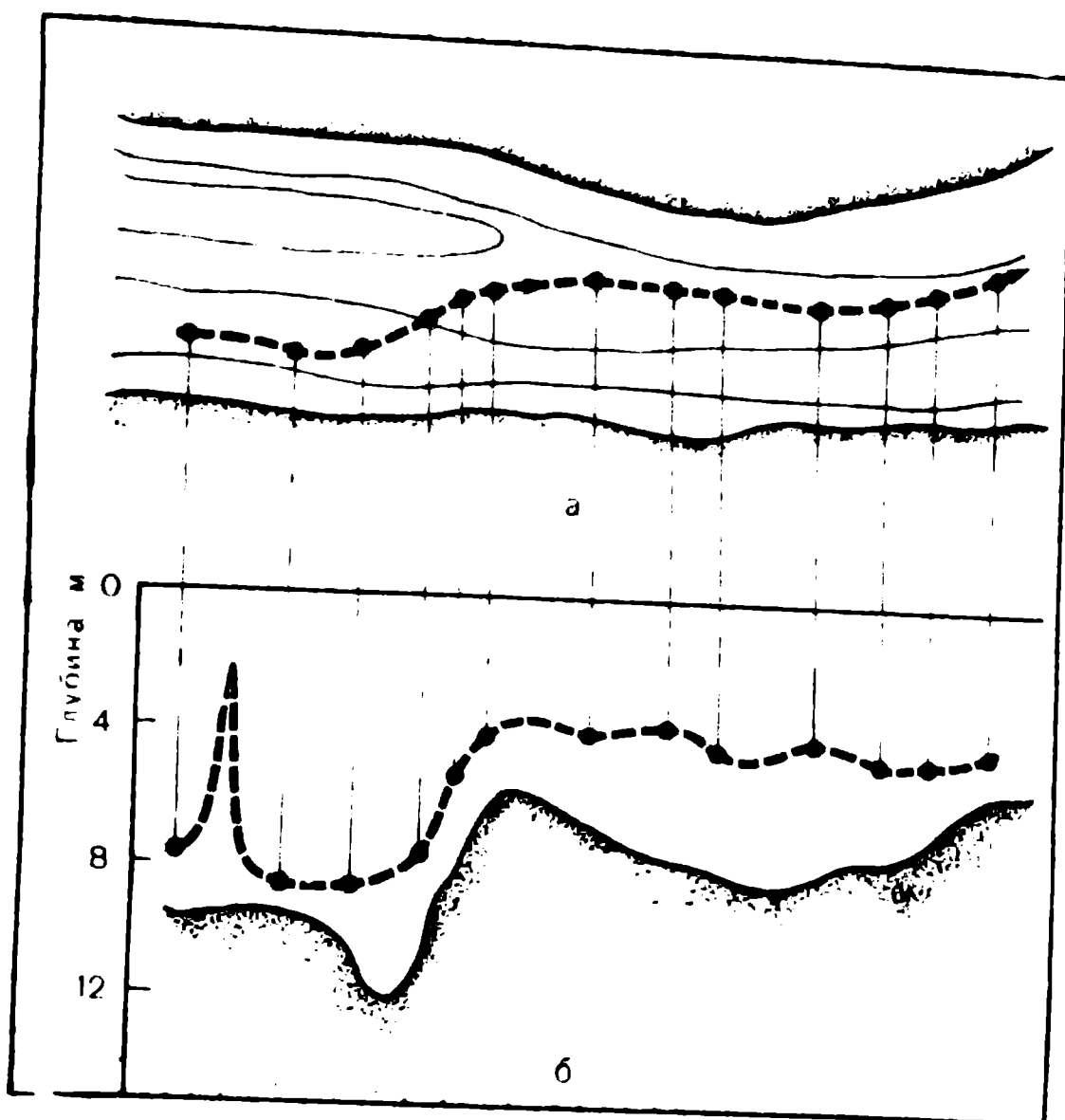
Второй этап заключается в выявлении коррелятивных и причинных связей между поведением рыбы и динамикой среды, а третий завершается определением стереотипов поведения данного вида рыб и вероятностно-прогностической оценкой их реализации в конкретной экологической обстановке.

Нанесение на картосхему исследуемого района координат местоположения меченой рыбы проводится по угловым пеленгам с помощью протрактора и параллельной линейки. Соединение этих точек во временной последовательности дает траекторию движения рыбы в горизонтальной плоскости. Соответствие этой трассы фактическому перемещению рыбы зависит от точности определения координат меченой рыбы и временных интервалов между этими определениями: чем меньше эти интервалы, тем ближе к истине получаемая картина движения рыбы. Особенно это важно учитывать при трассировке пути активных рыб, которые постоянно находятся в движении. Например, при поисковом плавании во время выбора направления движения рыба часто меняет курс, совершая круговые движения, и если интервал между определениями местоположения рыбы больше продолжительности этого поискового движения, то на карте этот важный элемент поведения не отразится. Интервал между временем пеленгации меченой рыбы может быть различным — от нескольких минут до часа и более. Он определяется задачей исследования и уровнем активности рыбы. Например, при исследовании миграции проходных рыб в реке или водохранилище интервал в 20—30 мин вполне достаточен, в то время как в приплотинных зонах гидроузлов, где перемещения рыб из-за сложности гидрологических условий более переменны как по направлениям, так и по скорости, для детализации поведенческих реакций рыб требуются более частые определения.

Для характеристики глубины следования меченой рыбы относительно поверхности и дна в разное время суток строят совмещенный график с использованием данных эхолотной съемки на всем пути рыбы и расшифрованных показаний информационного передатчика-метки о положении рыбы в момент отсчета относительно поверхности воды (рис. 29).

Если с помощью передатчика определяется глубина следования в функции освещенности, то расчет ведется по тарифовочной номограмме [18, 20]. Скорость движения рыбы относительно берега (дна)  $v_0$  определяется по величине пройденного расстояния за определенный промежуток времени.

Рис. 29. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) перемещения меченого осетра.



При наличии течения фактическая скорость плавания  $v_{\phi}$  в общем случае рассчитывается по формуле

$$v_{\phi} = \sqrt{v_0^2 + v_T^2 + 2v_0v_T \cos \alpha},$$

где  $v_T$  — скорость течения;

$\alpha$  — угол между направлением течения и направлением движения рыбы.

Если поток воды направлен строго против ( $\alpha = 180^\circ$ ) или, наоборот, навстречу ( $\alpha = 0^\circ$ ) движению рыбы, то расчет упрощается:

при встречном течении  $v_{\phi} = v_0 + v_T$ ;

при попутном течении  $v_{\phi} = v_0 - v_T$ .

Суточная ритмика двигательной активности рассчитывается обычно по средней скорости плавания рыбы за каждый получасовой или часовой интервал.

Дешифрация информации о физиологическом состоянии меченой рыбы и показателях окружающей ее среды (давление, температура, освещенность, pH и др.) осуществляется по тарировочным таблицам, составленным при калибровке передатчиков перед опытами. Перед машинным анализом трасс миграций точки нахождения меченой рыбы считываются с

картосхем в бикоординатной системе и перфорируются [156]. В основе программ расчета направлений движения лежит статистическая группировка векторных направлений движения через фиксированные интервалы времени. Векторное распределение выдается в круговой диаграмме для различных временных интервалов, а угловые изменения движения по и против часовой стрелки — в виде гистограмм частоты левых и правых поворотов для каждой меченой рыбы. Для выявления влияния факторов среды на поведение рыбы составляются программы линейного анализа множественной регрессии.

Первичные данные о поведении меченых рыб через выход приемной аппаратуры биотелеметрического комплекса можно подавать на запоминающее устройство с дальнейшим анализом их на ЭВМ.

✓ Анализ результатов телеметрических исследований начинается с индуктивных обобщений закономерностей проявления той или иной поведенческой реакции или физиологического акта. Необходимо на основе имеющейся первичной информации установить степень вариабельности рассматриваемых признаков в конкретных условиях, например с помощью кинематического анализа. В него входит определение коэффициентов корреляции между элементами поведения разных животных. Это позволяет судить о степени проявления стереотипа в поведении. Например, для отдельных участков Волгоградского водохранилища коэффициент корреляции между трассами отдельных меченых осетров составил 0,99, что указывает на строгую синхронность их миграционного поведения на данных участках.

Для выявления причинных связей можно использовать корреляционный анализ. Частная корреляция позволяет уточнить степень взаимосвязи поведения рыб с отдельными факторами, например температурой воды, освещенностью, полом, размером рыб и др.

Особое значение при выявлении причинных связей играет множественная корреляция, позволяющая оценить и выделить главные факторы, оказывающие влияние на эколого-физиологические особенности поведения рыб. В общем случае множественная корреляция рассчитывается по формуле

$$R = \sqrt{1 - \frac{\omega}{\omega_1}},$$

где  $R$  — множественный коэффициент;  
 $\omega$  — определитель матрицы парных коэффициентов;  
 $\omega_1$  — минор  $n-1$ -го порядка.

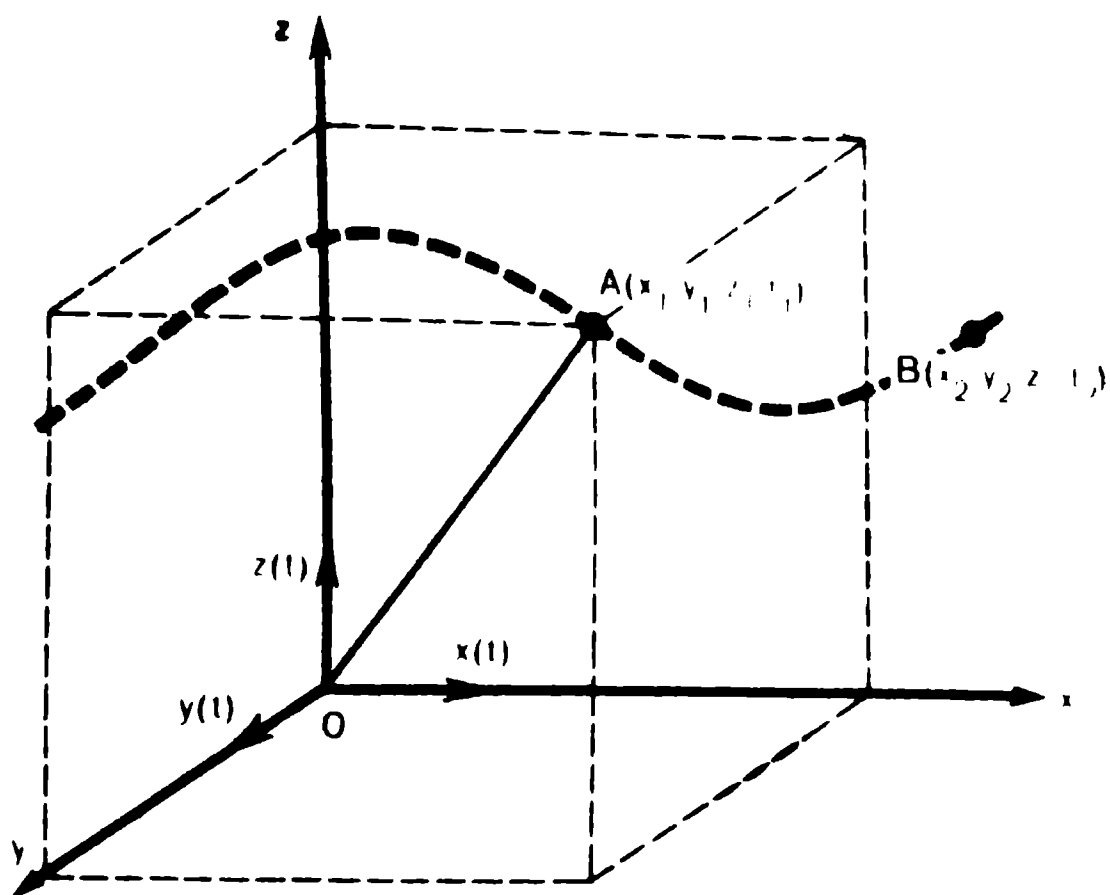


Рис. 30. Движение меченой рыбы как вектор-функция в трехмерном пространстве.

Величина множественного корреляционного коэффициента всегда лежит между 0 и 1. Если исследуемая величина не находится в линейной корреляционной связи с учитываемыми факторами или эта связь мала, значение  $R$  стремится к нулю, и наоборот, при сильных связях и четкой корреляционной зависимости оно близко к 1.

Методы математической обработки результатов наблюдений, в том числе и биологических, подробно изложены в специальных пособиях [13, 80, 89, 125]. Ими можно успешно пользоваться и при анализе биотелеметрической информации.

Если конечной целью исследования является вероятностное прогнозирование движения рыбы на участке, то применяется более сложный математический аппарат [93]. Движение мигрантов при этом рассматривается как случайная вектор-функция  $\bar{R}(t)$ , которая выражается через одномерные функции  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  (рис. 30). Описание элементов двигательного поведения мигрирующих рыб сводится к описанию этих случайных функций и их производных. Под случайной понимается такая функция, которая может принять тот или иной конкретный вид, причем точно заранее невозможно предвидеть, какой именно, однако область возможных значений ее может быть известна.

При фиксированном значении аргумента, например при  $t = t_1$ , для  $x(t)$  получаем сечение  $x(t_1)$  — случайную величину, что позволяет изучение случайных функций свести к изучению случайных величин. Полное вероятностное описание каждого сечения случайной функции дается законом распреде-

ления случайной величины, образующейся в сечении [интегральная функция распределения  $F(x, t)$  или дифференциальная функция распределения  $f(x, t)$ ]. Однако на практике часто очень трудно установить вид функции распределения и поэтому используется краткое описание сечения случайной функции моментами распределения различного порядка, которые в общем случае также зависят от параметра: чем больше моментов высокого порядка определено, тем лучше в статистическом смысле описано сечение случайной функции.

Считается, что возможные значения, которые может принимать случайная величина, достаточно хорошо определены, если известны моменты распределения первого, второго, третьего и четвертого порядков. Таким образом, закон распределения подробно, а моменты распределения сокращенно описывают случайную функцию в любом ее сечении. В некоторых случаях такого описания недостаточно, так как оно количественно не отражает связи между различными сечениями случайной функции. Не вдаваясь в подробности, заметим, что она может быть установлена с помощью корреляционных функций, вычисление которых производится по схеме анализа простых марковских процессов. Считая, что комплекс биотических и абиотических факторов на данной фазе жизненного цикла вероятностно определяет поведение рыбы данного вида, можно принять величину вероятности перемещения рыбы из окрестности точки  $A(x_1, y_1, z_1, t_1)$  в окрестность какой-то точки  $B(x_2, y_2, z_2, t_2)$ , полностью определяемой на данной фазе ее жизненного цикла комплексом зарегистрированных факторов в окрестности точки  $A(x_1, y_1, z_1, t_1)$ . Данное предположение является весьма широким ввиду вероятностного подхода к учету действия комплекса взаимосвязанных факторов и может быть применено к описанию миграций рыб. Любая динамическая система может трактоваться как марковская при соответствующем выборе фазового пространства.

Для простых марковских процессов при рассмотрении проекции движения на ось  $ox$  плотность вероятности  $(x, t)$  удовлетворяет в общем виде следующему интегральному уравнению:

$$f(x_0, x_1, t + t') = \int f(x_0, x', t) f(x', x_1, t') dx',$$

где интегрирование производится во всей доступной области значений  $x'$ . Смысл уравнения следующий: переход из положения  $x_0$  в положение  $x$  за время  $t + t_1$  может быть осуществлен путем перехода сначала к любому доступному  $x'$  за время  $t$  и затем к  $x$  за время  $t_1$ . Из этого уравнения можно полу-



чить параболитическое дифференциальное уравнение Эйнштейна — Фоккера — Планка

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial (k_1 f)}{\partial x} + k_2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} .$$

$k_1$  в этом случае имеет смысл проекции скорости упорядоченного движения рыбы по оси  $ox$ , а  $k_2$  — так называемый коэффициент диффузии — характеризует подвижность неупорядоченного движения ее вдоль оси  $ox$ .

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  зависят от биологических особенностей вида и экологических ситуаций на проходимом ими участке. Они могут служить объективными числовыми критериями сложности участков водоема, где мигрируют изучаемые виды.

Сходимость результатов расчетов с многократно повторенными фактическими наблюдениями хорошая.

Вероятностное описание с использованием аппарата случайных процессов, в частности марковского типа, использовано также В. А. Абчуком и В. Г. Суздаем [3] при разработке теории поиска объектов и научном обосновании практических рекомендаций. Выбор того или иного математического аппарата определяется конечной целью исследования и осуществляется совместными усилиями этолога и математика.

## **ПРИМЕНЕНИЕ БИОТЕЛЕМЕТРИИ В РЫБНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

---

Биотелеметрические методы в настоящее время нашли широкое применение в изучении ориентации рыб с целью разработки способов управления их поведением и при решении ряда тактических вопросов рыболовства и рыбоводства.

Большой объем биотелеметрических исследований выполнен также в зонах гидроузлов и водозаборов различных типов для выбора оптимального расположения, конструкции и режима работы рыбопропускных и рыбозащитных сооружений.

### **ОРИЕНТАЦИЯ РЫБ**

Изучение пространственной ориентации состоит из трех этапов [54]: сначала исследуется способность животных к ориентации, затем выявляются факторы среды, играющие роль ориентиров, и, наконец, исследуются механизмы ориентации. Комплексный анализ результатов исследования в целом позволяет восстановить все звенья этологической цепи: ориентир — воспринимающий орган — центральная нервная система — ответная реакция животных.

Телеметрические методы применимы преимущественно на первом и втором этапах. Известно, что рыбы обладают набором совершенных и разнообразных органов чувств. Данные о функциональных возможностях этих органов представляют особый интерес как для анализа общих поведенческих связей организма рыб с факторами среды, так и при оценке их ориентационных способностей. В последние десятилетия знания о рецепторно-аналитических системах рыб существеннополнились. Обнаружено, что помимо известных шести чувств (зрение, слух, обоняние, вкус, осязание, терморцепция) многие рыбы обладают электрорцепцией [83] и, возможно, магниторцепцией [112, 113]. В связи с тем, что в данной книге авторы не предполагали дать полный анализ рецепторных систем, участвующих в ориентации, ниже отмечены только те

особенности органов чувств, которые потребуются для подкрепления положений, рассматриваемых при анализе результатов телеметрических исследований. Достаточно полные сведения по рецепции рыб обобщены в сборниках «Биологические основы управления поведением рыб» [11] и «Основные особенности поведения и ориентации рыб» [64].

### **Методические особенности натурных исследований ориентации рыб**

Анализ ориентационных способностей рыб в натурных условиях в значительной мере связан с изучением хоминга [44, 161], т. е. способности рыб находить свои места нагула, нереста и зимовки при возможности ухода в другие сходные по внешним условиям участки водоема.

Существует два методических приема изучения ориентации рыб при хоминге. Первый и наиболее показательный — это прослеживание пути движения рыб при их смещении с места первичной поимки. Этот прием, широко используемый при простом поплавочном мечении рыб [1, 2, 44, 71, 138, 161, 204], показал, что при смещении от места первичной поимки большинство рыб сразу же стремятся вернуться обратно. Если на их пути поставить преграды, то рыбы подчас погибают, преодолевая эти преграды, но не уходят в другие районы.

Другой методический подход основан на выпуске меченых рыб непосредственно в месте первичного отлова. Здесь предполагается, что меченая рыба продолжает свой путь к конечному пункту движения. Основная трудность этого подхода заключается в том, что не всегда экспериментатор может точно представить место финиша меченой рыбы. В ряде случаев общее направление движения можно легко установить на основе обычных ихтиологических исследований данного водоема или его участка. Например, анадромные мигранты в реке будут подниматься в верховья, а катадромные — наоборот, уходить вниз по течению, т. е. по генеральному направлению их движения представляется возможным детализировать поведенческие реакции подопытных особей при прохождении участков с различными экологическими условиями. Этот прием обычно используется при изучении ориентации проходных рыб.

В какой степени репрезентативны результаты исследований ориентации рыб с помощью биотелеметрии? Из опыта простого мечения известно, что отлов, процесс мечения, сами метки могут вызвать неадекватные поведенческие реакции

организма (прерывание миграции, скат вниз по течению вместо подъема вверх и др.). Правильный методический подход к мечению, выбор оптимального типа меток и способа их крепления сводят к минимуму неадекватность реакций и позволяют широко использовать мечение для изучения ориентационных способностей рыб. По этим вопросам имеется большая литература, обобщенная в работах А. Поддубного [72], Ф. Хардена Джонса [158], А. Стаско [230], А. Хаслера [161]. С помощью массового мечения удалось показать, что популяции леща и некоторых других пресноводных рыб разбиваются на локальные, территориально обособленные стада, особи которых при смещении стремятся возвратиться к прежнему месту обитания [70]. Установлено также, что даже существенное увеличение нагрузки на рыбу в результате крепления буксируемого поплавка при правильном проведении опытов не отражается на инстинкте ее возвращения на домашний участок.

Рыбы, меченные ультразвуковыми передатчиками, после выпуска также относительно быстро выбирают правильный курс движения и дифференцированно реагируют на изменение экологической обстановки.

На этом основании можно с уверенностью считать, что биотелеметрические способы вполне пригодны для изучения ориентации рыб и их применение при соблюдении необходимых методических требований дает принципиально новую качественную информацию.

В Висконсинском университете (США) перед проведением телеметрических исследований ориентационного поведения белого окуня в озере Мендота был поставлен ряд экспериментов по выяснению влияния меток-передатчиков (диаметром 9, длиной 40 мм и массой на воздухе 5,8 г) на инстинкт возвращения рыб [165]. Рыб, отловленных на нерестилищах, метили одним из трех способов: креплением метки на спину крючком, помещением метки в разрез на теле с последующим наложением шва и введением метки в желудок через рот.

В качестве контроля служили рыбы с проштампованными на теле вблизи спинного плавника отметками. Кроме того, у всех подопытных и контрольных рыб дополнительно делали пометки вырезанием 1/5 части заднего спинного плавника. Всего за 23 дня было помечено 672 самца. В экспериментах использовали особей, обычно встречающихся в уловах, размером в среднем 30 см. После мечения рыб перевозили за 1,5 км от нерестилищ в центральную часть озера и выпускали. На нерестилищах проводили постоянный экспериментальный

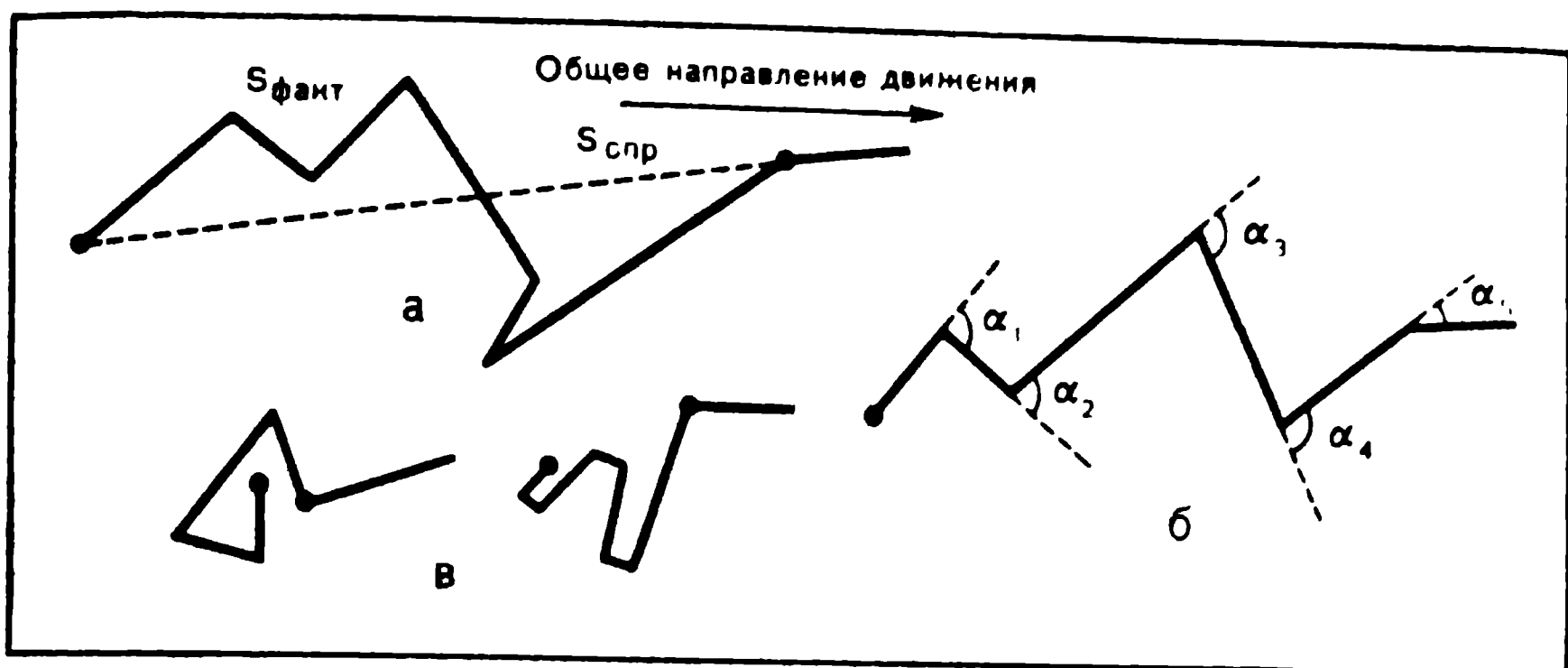


Рис. 31. Характеристики ориентационного поведения рыб.

лов. Опыты показали, что наибольший возврат, сравнимый с результатами возврата контрольных рыб, отмечается у рыб, которым метку вводили в желудок. При крючковом креплении происходит наибольшая потеря меток.

Было четко установлено, что мечение метками-передатчиками не отражалось на способности белого окуня находить свое нерестилище. Значительное изменение ориентационного поведения наблюдалось у рыб с наружным креплением и особенно у рыб — с метками, введенными в разрез на теле.

В 1967—1968 гг. на Рыбинском водохранилище нами проводились подобные опыты на леще. Рыб метили наружными передатчиками диаметром 2 и длиной 8 см с помощью крючков. В качестве контроля служили особи, меченные простыми метками и отрезанием части спинного плавника. Минимальное время возврата на нерестилища с расстояния до 3 км у контрольных рыб было почти такое же, как и у рыб, несущих передатчики. Среднее время возврата для первых 10 вторично пойманных контрольных рыб было даже больше, чем у подопытных. Это, по-видимому, связано с тем, что контрольные рыбы были отловлены не сразу после прихода на нерестилища, в то время как фактическое время возврата подопытных рыб регистрировалось по сигналам передатчиков.

Для оценки разрешающей способности ориентационного комплекса рыб вводят различные числовые величины дистанционных временных и угловых измерений (рис. 31). Так, для анализа ориентации волжских осетров нами предложен коэффициент, характеризующий отношение фактически пройденного пути к спрямленному расстоянию между точками начала и конца движения (рис. 31, а) и позволяющий оценить

степень сложности проходимого пути [72]. Ориентационную способность рыб также оценивают по их угловым поворотам (по величине и частоте смены курса движения) (рис. 31, б) [59, 193, 241—243] и по времени выбора ими направления движения на конкретном участке (рис. 31, в). Эти характеристики взаимосвязаны между собой, дополняют друг друга и отражают в основном поисковое поведение, когда рыба для определения направления движения «изучает» акваторию. Показатели длины непродуктивного пути и частоты угловых поворотов отражают время поиска рыбой ориентиров, указывающих ей дальнейшее направление движения.

В ряде случаев об ориентационной способности рыб на конкретном участке можно судить непосредственно по данным об их скорости движения.

Анализируя поведение осетров, мы обратили внимание, что средняя скорость их движения прямо зависит от экологических условий проходимого участка: чем он сложнее, тем меньше скорость.

Важными показателями ориентационной способности стаи или группы рыб служат степень неравномерности движения разных меченых особей и вариабельность индивидуальных трасс на конкретных экологических участках водоемов. Все перечисленные показатели вполне применимы для характеристики ориентации рыб, мигрирующих в удалении от берегов озера или моря, где течения слабые строго ненаправленные либо отсутствуют, а рельеф дна ровный либо глубина очень большая.

Временные характеристики движения, степень непродуктивности пройденного пути так же, как и частота угловых поворотов, не всегда точно отражают характер ориентации рыб. Лососевые, например, мигрируют в озере или водохранилище вдоль берега, не удаляясь от него более чем на 20—50 м. Движение в данном случае полностью определяется одним основным ориентиром — береговой линией, а величина непродуктивного пути и частота смены курса движения зависят только от извилистости береговой линии. Здесь подчас фактический путь рыб превышает спрямленный в 2—3 раза, при этом курс движения рыб может меняться почти на противоположный. Говорить о слабой разрешающей способности данного способа ориентации не приходится: рыба очень точно следует всем изменениям ведущего ориентира [52, 171]. Это же положение относится и к ориентации осетровых по рельефу дна, когда мигранты придерживаются определенной изобаты или склонов русел [72].

В настоящее время наукой собран большой сравнительный материал по поведению рыб при ориентации в различных водоемах. Ниже мы попытаемся систематизировать данные, полученные с помощью биотелеметрических методов, и отметить некоторые общие закономерности. Уже накоплено множество фактов о способности рыб правильно определять в море сторону нахождения «своей» реки или участка побережья и вовремя приходить к ним в период размножения. Особенно наглядно это продемонстрировано на лососевых рыбах, которые, нагуливаясь в открытом море в сотнях или тысячах километров от мест своего рождения, неизменно возвращаются на нерест в эти места. В море нагульные ареалы рыб, родившихся в разных реках и притоках, часто перекрываются.

Ответ на вопрос, каким образом рыбы ориентируются в открытом море, до сих пор не найден. Существует ряд гипотез, в основе которых лежит предположение о возможности использования рыбами ориентиров космического (солнце и звезды) или планетарного (магнитное поле Земли, силы Кориолиса, течения Мирового океана) характера. Обзор их дан в работах А. Хаслера [161], Б. П. Мантейфеля, Н. П. Наумова и В. Э. Якоби [54]. Сделана попытка оценить приход рыб на свои нерестовые участки с позиций теории вероятности. С. Сайла и К. Шеппи [220] построили математическую модель, на которой показали, что при равновероятном движении в любую сторону около 30% производителей всегда вовремя придут на нерестилища и, возможно, их численности достаточно для нормального воспроизводства популяций.

Большинство исследователей рассматривают процесс ориентации рыбы как результат ее сложной рецепторно-анализаторной деятельности, по-разному проявляющейся в зависимости от конкретной ситуации водоема, наличия фоновых ориентиров, физиологического состояния самой особи.

### **Биотелеметрические исследования ориентации рыб в водоемах разного типа**

При проведении биотелеметрических исследований миграций рыб непосредственно в открытых морях прежде всего необходимо выявить с помощью передатчиков-меток, способны ли мигранты в открытом море длительное время поддерживать постоянный курс движения. Отрывочные сведения об этом можно почерпнуть из данных сетных уловов, когда попадание рыбы в сети, поставленные в разных направлениях, происходит преимущественно с одной стороны света.



А. Хаслер [161] приводит пример строгой направленности движения косяка лососей в ночное время, отмеченной визуально при свечении моря. А. Хатт с соавторами [160] провел рекогносцировочные опыты по мечению передатчиками четырех лососей в Беринговом море. Хотя эти опыты оказались не совсем удачными (контакт с двумя мечеными рыбами был потерян сразу после выпуска), две особи все же были прослежены в течение 9 и 17 ч. Естественно, окончательных выводов из этих небольших наблюдений сделать нельзя, но то, что мигранты все время сохраняли одно юго-западное направление, говорит о направленности их ориентации, а не о беспорядочном движении.

В районе Флориды в 1963 г. [124] были проведены наблюдения за движением двух акул и трех тунцов. Первая акула после первоначального кругового движения около точки выпуска в течение 4 ч крейсировала на различных глубинах со скоростью около 3 уз в пределах одной квадратной мили в 4—7 милях от берега. Другая акула первые 2 ч двигалась в определенном направлении также со скоростью около 3 уз. Наблюдения за тунцами показали, что их скорость варьирует от 3 до 12 уз с частым изменением курса движения. Общее же направление движения было у всех трех особей одинаковым — в сторону Гольфстрима. Строго придерживался океанического течения и парусник *Histiophorus* sp., пройдя за 6 ч 26 миль [238]. Хотя эти опыты были кратковременны, они четко продемонстрировали, что рыбы в открытом море предпочитают вполне определенный курс движения.

При изучении перемещений рыб в море необходимо принимать во внимание глубину, на которую меченые объекты могут погружаться. Так, в опытах по мечению двух акул и трех тунцов длительность работы передатчиков ограничивалась 2—3 ч. Затем рыба уходила на глубину, где передатчик из-за большого давления воды выходил из строя [139].

Серию экспериментов по изучению ориентации мигрантных (серебристых) и немигрантных (желтых) угрей в Северном море провел Ф. Теш [241—245]. Хотя в целом было изучено ориентационное поведение небольшого числа особей (всего около 20), анализ трасс движения и скорости плавания на фоне изменений температуры воды, направления и скоростей приливо-отливных течений убедительно показал, что движение рыб строго ориентировано.

В миграционном поведении угря не наблюдается суточных вариаций активности, что может быть результатом воздействия приливо-отливных течений, так как импульсные течения

вообще [72] сбивают суточные ритмы двигательной активности рыб. В прибрежных водах угри придерживаются определенного курса независимо от направлений приливо-отливных течений, но если двигаются в направлении течений, то со скоростью, равной скорости потока [241—245].

В общем, меченые серебристые угри перемещались в северо-западном направлении ( $340^\circ$ ). Это направление не соответствует выходу из Северного моря в Атлантику, куда угорь должен мигрировать, чтобы попасть к нерестилищам в Саргассовом море. Также не соответствует точной стороне нахождения «дома» (устье реки Эльбы) и курс движения смещенных желтых угрей, которые придерживаются почти противоположного направления (средний курс  $109^\circ$ ). Такой выбор направлений движения угрей соответствует данным лабораторных исследований, показавших, что при исключении визуальных, термических, химических и других градиентных условий рыбы выбирают только два направления: юг и север. Предполагается, что угри обладают магнитным компасным способом ориентации, который позволяет им поддерживать постоянный курс в северном (серебристые угри) или южном (желтые угри) направлении. Более того, компасное направление движения угрей, видимо, сохраняется длительное время и способствует переходу от эстуария Эльбы до Датского побережья, хотя это и не кратчайший путь в Атлантику. Подтверждением этому служат поимки у Дании угрей, меченных в реке Эльбе.

В настоящее время имеется ряд косвенных доказательств возможности использования рыбами геомагнитного поля. Так, в озерном плесе Рыбинского водохранилища с помощью поплавочных наблюдений установлено, что направление движения лещей и судаков, пересаженных в незнакомый район, в 87,5% случаев совпадает с направлением магнитного меридиана. Это происходит, если рыба перемещается в стабильной среде однородной водной массы [71].

У европейского угря на ранних стадиях онтогенеза в условиях равновероятного выбора направлений обнаружено влияние геомагнитного поля на выбор направлений движения. Компенсация геомагнитного поля с помощью колец Гельмгольца вызывала дезориентацию молоди [62, 246]. Однако в подобных опытах на американских угрях эта реакция отсутствовала [266].

Методом условных рефлексов было выявлено, что такие туводные немигрантные виды, как карась, воспринимают магнитное поле, превышающее геомагнитное в 20 раз [112]. Выработка рефлекса на магнитное поле, соизмеримое с полем

Земли, у взрослых мигрантных форм лосося и угря не дала положительных результатов [202, 218]. Рефлекс регистрировался по изменениям частоты сердечных сокращений. Вопрос о геомагнитной ориентации рыб остается дискуссионным.

Другими ориентирами глобального масштаба могут быть океанические течения, но механизм распознавания рыбами этих течений при отсутствии зрительных или тактильных точек отсчета [158] до сих пор не выяснен. Предполагается, что для распознавания морских течений рыба может использовать электрические поля, наводимые в движущейся массе воды магнитным полем Земли (магнитно-гидродинамическая э. д. с.) [141]. Это подтверждается высокой электрочувствительностью проходных рыб. Так, условнорефлекторными методами доказано, что угорь и лососи воспринимают поля величиной менее 1 В/см [218]. Большинство пресноводных рыб умеренных широт не имеют специализированных электрогенеративных систем. Судя по данным исследований на леще [50] и карпе, рыбы воспринимают электрические поля, напряженность и сила тока которых на несколько порядков меньше, чем полей, вызывающих у них безусловнорефлекторную реакцию возбуждения.

В связи с этим представляют интерес кратковременные изменения направления и скорости движения осетров [72] при прохождении ими участков реки, над которыми протянуты провода высоковольтных линий электропередачи (рис. 32). Контрольные исследования при отключении ЛЭП не выявили подобных нарушений в поведении осетров, поэтому вполне допустимо, что природа раздражителя, вызывающая изменения траекторий и скоростей движения, в данном случае также электромагнитная.

В связи с трудностью проведения натурных экспериментов по изучению ориентационного поведения рыб в открытом море в качестве модели морской (океанической) миграции используются миграции рыб в небольших озерах, где известны виды, обладающие инстинктом возвращения на домашний участок. А. Хаслер [161] предложил в качестве такой модели использовать перемещение рыбы в озеро Мендота (площадь 394 кв. км, длина береговой линии 32,4 км), в котором в течение многих лет проводятся комплексные гидробиологические исследования. В качестве объекта исследования был выбран белый окунь, нерестилища которого четко локализованы в двух участках: Мапле-Блюфф и Ковернос. С помощью простого мечения было показано, что эти рыбы возвращаются на свои нерестилища из разных мест выпуска.

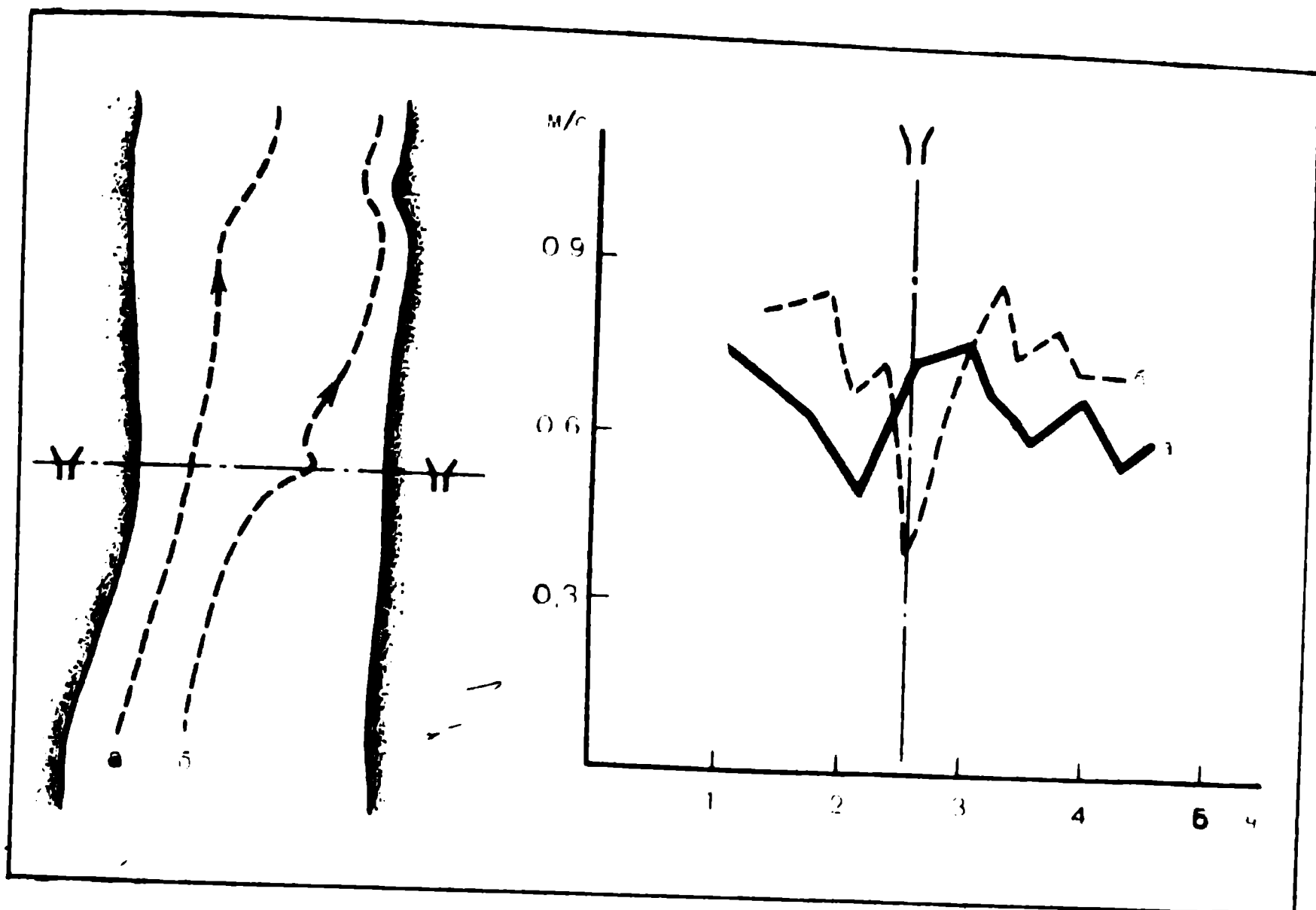


Рис. 32. Изменение пути и скорости движения осетров под ЛЭП:  
 а — ЛЭП отключена; б — ЛЭП включена.

Предварительные лабораторные опыты показали, что белые окуни способны менять направление своего движения в соответствии с изменением положения солнца [163]. Эта способность была обнаружена также и у рыб-попугаев, обитающих в коралловых рифах: уход и возвращение этих рыб в убежища четко коррелируют с суточным движением солнца по небосводу [263]. Полевые наблюдения за движением белых окуней, меченных поплавками, показали, что рыбы, лишенные зрения, более беспорядочно распределялись в точке выпуска, чем контрольные особи [161].

В 1965 г. в нерестовый период были прослежены перемещения 21 белого окуня, меченных ультразвуковыми передатчиками [162]. Математическая обработка телеметрических данных показала, что в первый час после выпуска меченые рыбы распределялись беспорядочно, а через 5 ч начинали ориентироваться на нерестовый участок. Рыбы редко перемещались по прямой линии, все они сначала выходили в литораль своего сектора, а затем, следуя вдоль берега, достигали нерестилищ (рис. 33).

Для выяснения влияния потоков воды на трассы движения меченых рыб вычисляли скорость и направление течений.



Рис. 33. Пути движения белого окуня во время нерестовой миграции в озере Мендота [162]. Стрелками указаны нерестилища.

Оказалось, что часть особей дрейфовала с течением. У некоторых рыб изменения курса точно совпадали с изменениями направлений потоков, но в целом достоверной зависимости между движением рыб и распределением потоков воды обнаружено не было. Ветровые волнения в этих опытах также не оказывали влияния на путь рыбы.

Анализ поведения рыб в зависимости от видимости солнца и облачности показал, что только две из 26 рыб изменили направление движения после восхода солнца и далее следовали новым курсом, а у одной особи кругообразные перемещения совпали с моментом захода солнца за тучу.

В целом опыты на белых окунях озера Мендота не подтвердили использование рыбой солнца в качестве ориентира. Однако в других ситуациях солнце, видимо, может служить отправным ориентиром. Об этом свидетельствуют факты увеличения скорости движения осетров и щуки при появлении солнца [72, 76]. Исследования поведения молоди нерки во время миграции из озера в море показали, что в солнечные дни путь их движения более спрямлен, чем при сплошной облачности. Грут [154] считает, что если солнце закрыто облаками, то молодь лососей, как и пчелы [110], воспринимает его поло-

жение по поляризованному свету. Опыты в лаборатории подтвердили способность рыб воспринимать поляризованный свет [142, 259].

Большой цикл исследований хоминга проведен на форели в озере Йеллоустоун (США). С помощью поплавочных наблюдений было установлено, что контрольные, ослепленные и лишенные обоняния форели, перемещенные от их родных притоков в глубь озера, способны возвращаться обратно. Ослепленным форелям для возврата требовалось вдвое больше времени, чем зрячим [198].

Позднее Д. Макклив с сотрудниками для изучения ориентации форели стал использовать биотелеметрические методы. Рыбу отлавливали в нерестовых притоках и выпускали в открытую часть озера [200, 201]. Наблюдения за перемещениями 42 меченых особей показали, что форель способна пройти путь в 3—4 км вполне ориентированно и возвратиться к своему притоку за 6—8 ч двумя основными трассами: двигаясь в восточном направлении и затем, достигнув берега, вдоль береговой линии или более прямо, в юго-восточном направлении — непосредственно в сторону нерестового притока.

В дальнейшем было установлено, что выбор направления движения строго согласуется с местом расположения нерестового притока. Если родные рыбам притоки расположены к западу от центра озера, то избирается западный курс движения, если к востоку-югу — то восточный. Это существенно повышает эффективность миграции, так как при наличии только одного восточного компасного движения форели из западных притоков пришлось бы для их достижения обогнуть все озеро вдоль береговой линии.

Эти результаты говорят о том, что форель в открытом озере определяет свои притоки ориентированно, а не случайным поиском.

Роль поверхностных течений в выборе форелью направления движения, видимо, незначительна, поскольку путь рыб с ними не коррелирует. Большие глубины (40—70 м) исключают ориентацию этой рыбы по рельефу дна. Не зарегистрировано также существенной разницы в трассах движения рыб в ясные и облачные дни, в штилевую и штормовую погоду при волнах высотой до 1,8 м, ограничивающих видимость солнца. Ослепление не отражалось существенно на характере и скорости движения рыб. Рыбы, лишенные обоняния, также правильно определяли сторону нахождения своего притока, но путь их движения был более изменчив, чем у контрольных особей.

Интересные результаты были получены на рыбах, ранее содержащихся при искусственно сдвинутом фотопериоде (контроль — фотопериод от 05 ч 55 мин до 21 ч 15 мин, опыт — фотопериод сдвинут на 6 ч: от 23 ч 55 мин до 15 ч 15 мин). В отдельных случаях рыбы со сдвинутым фотопериодом отклонились от правильного курса на  $90^\circ$ . Но в целом все подопытные рыбы в конечном счете правильно ориентировались в озере и двигались в сторону своих притоков (рис. 34). Таким образом, форель в озере Йеллоустоун всегда правильно определяет сторону нахождения своего притока, видимо, в основном корректируя направление движения по магнитному полю Земли и акустическому полю прибрежных мелководий.

А. Абросимова с сотрудниками [1, 2] изучала ориентационную способность туводных рыб в условиях озерного плеса равнинного водохранилища. С помощью поплавочных наблюдений было показано, что у плотвы, синца, густеры, окуня, щуки четко проявляется инстинкт возвращения на домашний участок. Успех ориентации определяется дальностью смещения рыбы от места первичной поимки, погодными условиями и сезоном года. Наиболее четко хоминг проявляется весной во время нереста. В этот период рыба успешно определяет сторону нахождения места первичной поимки независимо от погоды, тогда как во время нагула на ориентацию влияет облачность: в солнечную погоду движение рыб более направленное, чем в пасмурную.

Опыты по отключению органов зрения, обоняния, боковой линии показали, что роль их в ориентации рыб невелика: оперированные особи так же успешно находили место вылова, как и контрольные. При одновременном выключении зрения и боковой линии, зрения и обоняния, обоняния и боковой линии наибольшие изменения в ориентационном поведении происходили в первом варианте. Таким образом, авторы считают: ведущая роль в ориентации принадлежит органам зрения и боковой линии. Если один из них исключен, то другие органы чувств компенсируют исключенный анализатор, но с меньшей эффективностью для ориентации.

Проходным рыбам для попадания в свои нерестовые реки или их притоки необходимо пройти эстуарные и устьевые участки, которые по условиям резко отличаются и от районов открытого моря и от самих рек. Здесь у рыб происходит смена морской и речной фазы миграции. Для эстуариев характерны приливо-отливные течения, которые характеризуются строгой цикличностью смены скорости и направления и болес



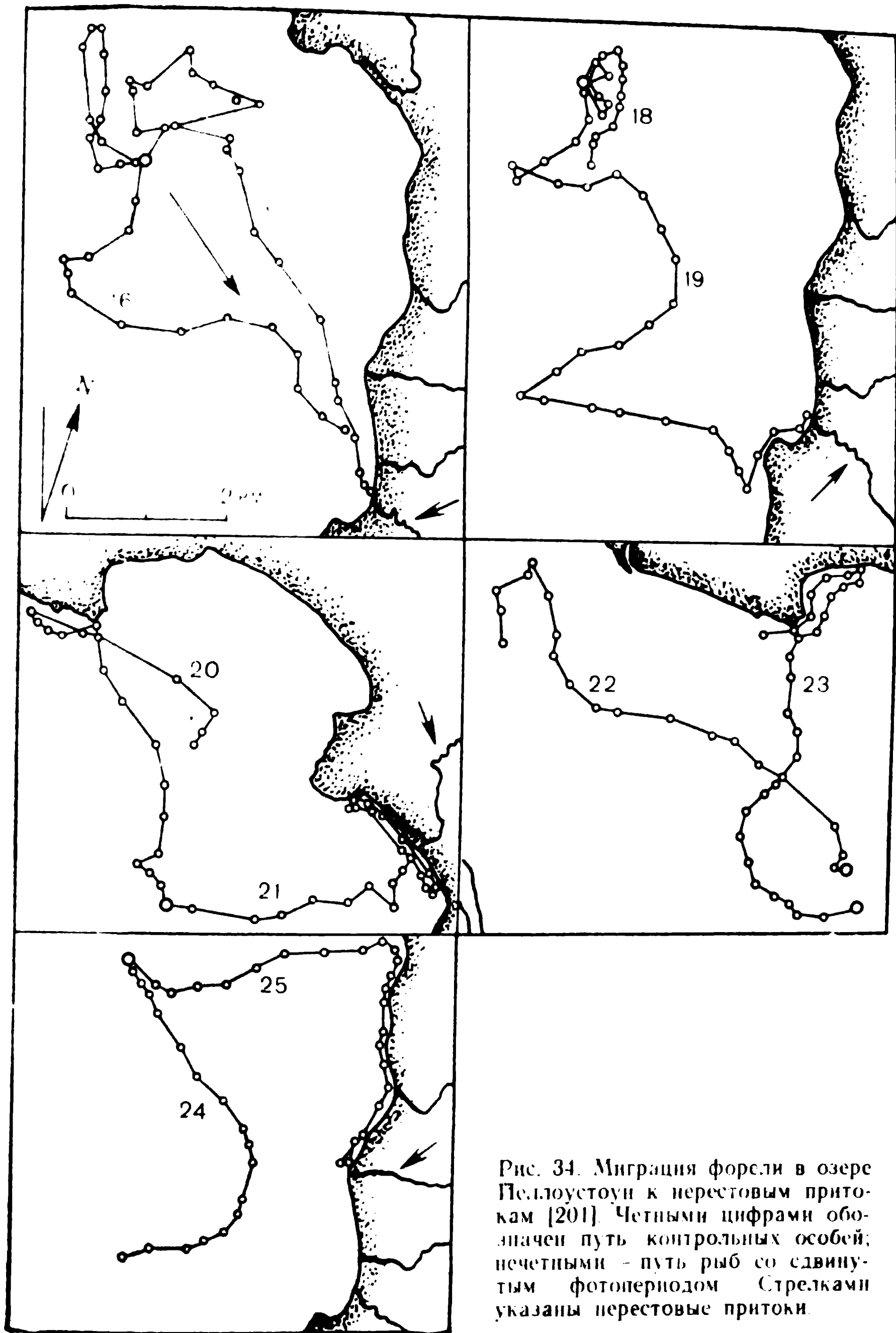


Рис. 34. Миграция форели в озере Пеллоустоун к нерестовым притокам [201]. Четными цифрами обозначен путь контрольных особей; нечетными – путь рыб со сдвинутым фотопериодом. Стрелками указаны нерестовые притоки.

случайными стонно-нагонными движениями воды. Эти области специфичны также по топографическим особенностям и акустическому фону, состоящему из шума прибоя, перекачиваемых камней и других звуков. Кроме того, температура прибрежных и стоковых речных вод выше, чем вод открытого моря, химические показатели этих вод также различны.

Телеметрические наблюдения за ориентационным поведением проходных рыб в эстуарных участках рек проводились как на анадромных (кета, горбуша, атлантический лосось, нерка, шэд), так и на катадромных (угорь) мигрантах. На протяжении нескольких сезонов изучалось миграционное поведение шэд (*Alosa sapidissima*) перед заходом в нерестовую реку Коннектикут (США) [143, 144]. Выявлено, что шэд не сразу заходит в устье реки, а подолгу (5—8 сут) перемещается в прибрежной зоне. Большинство меченых передатчиками рыб придерживались западного направления, подчас удаляясь на значительное расстояние от своей реки. Это направление в общем соответствует оси приливо-отливных течений, в которых рыба всегда находится, перемещаясь обычно навстречу потоку. Точность ориентации (соотношение углов между направлением течений и курсом плавания рыбы) зависит от характера течения (приливное или отливное). Большинство рыб (21 из 25 особей) более строго придерживались встречного потока при отливе, во время которого отмечается и наименьшее количество угловых поворотов.

Эксперименты с рыбами, лишенными зрения и обоняния [145], показали, что такие рыбы так же, как и нормальные особи, предпочитают в большинстве случаев западное направление движения, но их реакции на приливо-отливные течения несколько искажены. Если ослепленные особи реагировали на течения так же, как и контрольные, то рыбы, лишенные обоняния, могли равновероятно двигаться как с приливом, так и с отливом, и у них отмечена положительная корреляция между скоростями плавания и скоростями течений (соответственно 0,24 и 0,021).

Тихоокеанские лососи в Камчатском заливе при низкой воде (в отлив) так же, как и шэд, двигаются более ориентировано по отношению к стоковому течению из нерестовой реки. При этом скорость их движения уменьшается, что может быть следствием усиливающегося встречного течения [59]. Двухлетние наблюдения у побережья Британской Колумбии (Канада) вблизи впадения трех нерестовых рек (Аляска, Скин и Насе) показали [193], что хотя индивидуальные трассы движения нерки очень вариабельны, существуют два основных

направления их перемещений: в первый год это было северное и западное, во второй — преимущественно южное и восточное направления. Поскольку через район исследований производители нерки могут мигрировать в три реки, то не исключено, что в опытах участвовали особи разного происхождения и различия в курсах движения связаны с местоположением устья их родной реки.

В эстуарных участках моря вблизи устья реки Фрейзер (Канада) было исследовано поведение 11 нерок [234]. Наблюдения за каждой особью длились от 3 до 50 ч. Обнаружилось, что не все меченые особи правильно выбирали направление в сторону устья своей реки. Шесть особей (пассивные мигранты) перемещались в течение всего времени наблюдений в районе выпуска в соответствии с направлением приливо-отливных течений и удалились в противоположную от реки сторону. Скорость их плавания была почти в 1,5 раза меньше, чем у пяти других рыб (активные мигранты), которые относительно быстро направились в северном направлении, придерживаясь оси приливных течений, но не меняя курса. Величина непродуктивного пути между точками начала и конца слежения этих рыб была в 1,5 раза меньше, чем у пассивных особей. Поведение последних, вероятно, объясняется физиологической необходимостью их задержки перед заходом в реку. Пассивные особи еще не прошли периода адаптации, а активные были прослежены уже после этого периода.

Следовало ожидать, что рыбы, прошедшие адаптацию, при повторном смещении из реки в эстуарий моря не будут задерживаться в прибрежье. Для проверки этого положения нами была проведена серия опытов на балтийском лососе, зашедшем в реку Даугаву. Для мечения было взято шесть рыб из реки в районе смешения пресных и соленых вод. Пересадка рыб из реки в залив не могла отрицательно отразиться на поведении рыб, поскольку соленость воды в прибрежье Рижского залива отличалась от солености в устье реки всего на 2—5‰.

По два лосося выпустили в залив в 10 км южнее и севернее устья Даугавы и в 4 км против него. Хотя наблюдения были краткосрочными (по 3—15 ч за каждой особью), было определено, что во всех точках выпуска лосося довольно быстро определяли сторону нахождения устья реки и двигались к ней со скоростью 0,4—1,8 км/ч независимо от направлений прибрежных течений.

Как уже отмечалось, в прибрежной зоне мигранты придерживаются оси приливо-отливных потоков. Это говорит о

том, что данные течения в эстуариях служат надежными ориентирами, исключая блуждание рыб в лабиринте протоков, каналов и островов. Кроме того, приливо-отливные течения несут информацию о наличии в данном районе стоковых вод реки (по запаху, уменьшающейся солености, возрастающей температуре и др.).

Важная роль течений в ориентации рыб была показана в процессе биотелеметрических работ с желтохвостом (*Seriola quinqueradiata*) [146]. Рыбы всегда двигались по течению и, если теряли поток, то находили его вновь, перемещаясь по часовой стрелке кругами. Встречаясь при этом с локальными водными массами, отличающимися набором неблагоприятных для жизнедеятельности факторов (температура, соленость), желтохвост их обходит.

Несомненно, важная роль в ориентации входящих из моря в реку и уходящих из реки в море рыб принадлежит солености. Об этом свидетельствуют поплавочные наблюдения за миграцией угря в Куршском заливе Балтийского моря [62]. Результаты этих наблюдений показали, что рыба движется в сторону минимальных положительных градиентов солености и содержания кислорода.

Судя по данным прослеживания, величина чувствительности угря к градиентам солености составляет  $7,6 \cdot 10^{-3}$  мг/мл, (мг/мл — градиент, выраженный на 1 м пути рыб). Ф. Теш [242] считает, что комбинированным влиянием солености и геомагнитного поля объясняются многие экологические особенности миграционного поведения угря.

Сохранение мигрантами генерального направления и большой индивидуальный разброс трасс движения с частыми отклонениями от заданного курса свидетельствуют о том, что рыбы весьма приблизительно определяют сторону нахождения устья своей реки.

После подхода к берегу рыба мигрирует вдоль него, пока не узнает свою реку [133]. В морском побережье лососи часто подходят под берега островов, некоторое время следуют вдоль них, а затем продолжают путь вдоль берега, ориентируясь по приливо-отливным течениям. В этом отношении представляют интерес данные [208] по мечению лосося в районе Ирландии. В течение трех лет в одном и том же участке побережья было выпущено 542 особи. Подавляющее большинство меченых рыб распределились вдоль побережья острова на различном удалении от места выпуска. Большая часть (69 особей из 72) была вторично поймана в непосредственной

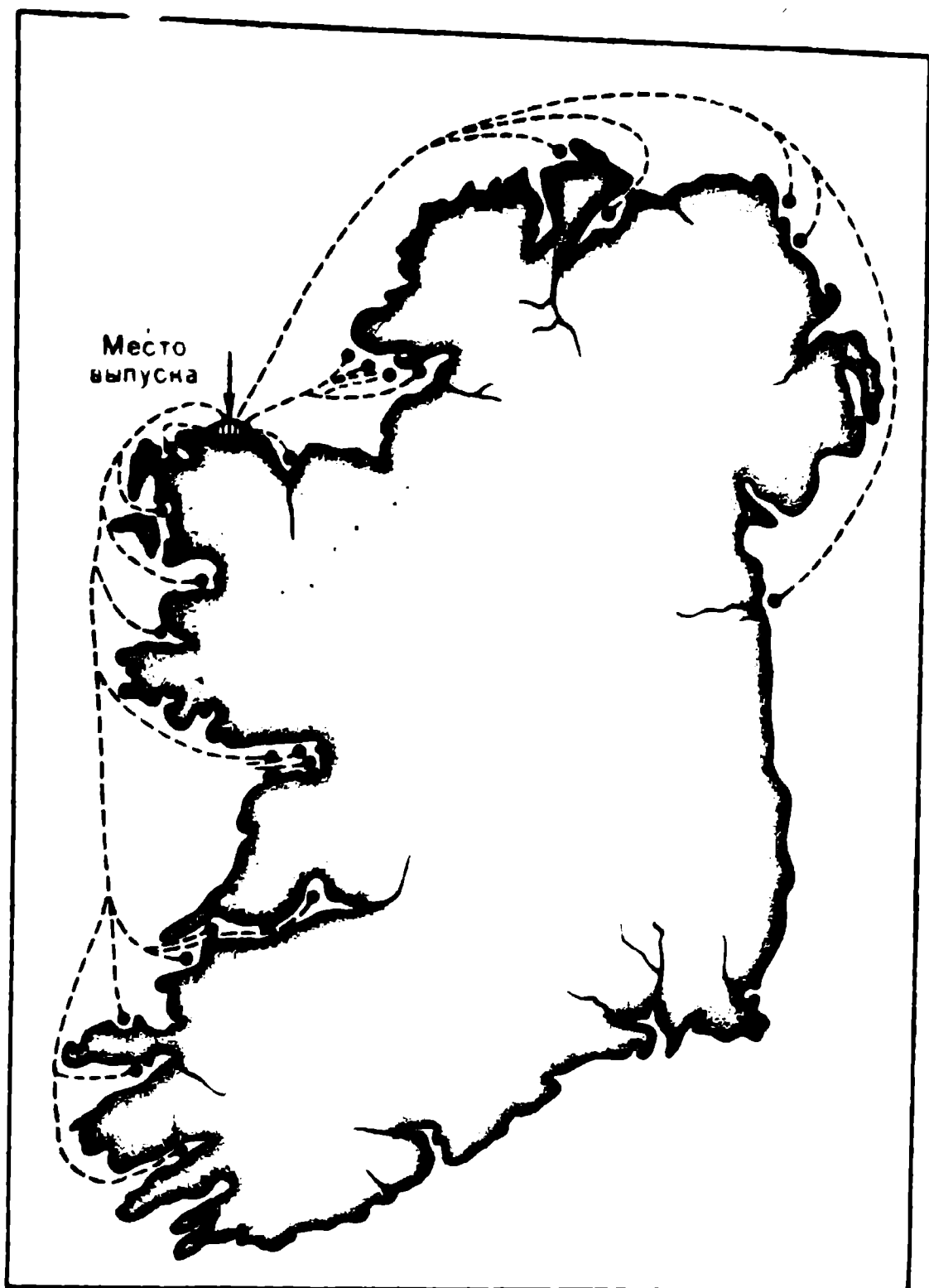


Рис. 35. Места вторичных поймок меченых лососей возле Ирландии [208].

близости от побережья, в 1—490 км от места выпуска. Создается впечатление, что лососи в данном случае мигрировали вдоль берега острова и таким образом достигали устья своих нерестовых рек (рис. 35).

Движение вдоль берега в определенных ситуациях свойственно и угрю, мигрирующему из рек в море [262]. Особенно наглядно ориентация рыб по береговой линии проявляется в озерах, широких равнинных водохранилищах или реках [37, 52, 171, 200, 206]. Интересно, что, достигнув берега, разные виды рыб безошибочно определяют, куда им плыть дальше, исключая тем самым неоправданное удаление от своего притока или уход от него в противоположную сторону.

Способы, при помощи которых рыба выбирает направление своего движения вдоль берега в сторону «дома», неизвестны. Двигается она здесь всегда с большой скоростью. Так, форели в открытом озере в среднем проходят 46,2 см/с, а под берегом — 82,3 см/с [200]. Наблюдения в Нижне-Тулском

водохранилище показали, что семга продолжает придерживаться берега при отсутствии течений или при изменении их направления.

Так же, как и другие лососи, семга может следовать на определенной глубине независимо от рельефа дна на проходимом участке. Так, при пересечении русел она плывет в ранее выбранном горизонте воды, хотя разница в глубинах на русле и смежных с ним участках составляет 5—6 м [20]. Принимая во внимание, что во время миграции лососевые придерживаются поверхностных слоев воды, можно с достаточным основанием предположить, что мигранты могут получать информацию о степени удаленности берега по характеру гравитационных волн [84].

Для ориентации по береговой линии в морском прибрежье рыбе необязательно подходить непосредственно под берег. Она может распознавать его на большом расстоянии по механическим звукам прибоя.

Наименьшее затухание звука приходится на длинноволновую часть звукового спектра, которая наиболее характерна для шумов прибоя. Хотя распространение звука в воде непрямолинейно и зависит от рельефа дна и неоднородностей водных масс, акустический канал связи может обеспечить получение информации с расстояния до десятков метров, а у морского побережья, где прибой значительно сильнее, — до сотен-тысяч метров. Этому способствуют функциональные свойства слухового аппарата рыб [82] и их способность направленного восприятия источника акустических колебаний [81, 222].

Движение рыбы вдоль берега существенно облегчает поиск устья нерестовой реки благодаря способности рыб различать воды по запаху. Еще П. Ю. Шмидт [120] отмечал, «что только тонким химическим чутьем можно объяснить также и загадочную способность лосося находить места своего рождения». А. Хаслер [161] показал, что качество воды каждого потока зависит от уникального сочетания почв и растительных сообществ на водосборе, совокупность органических веществ которых придает ей единственный и неповторимый запах. Этот запах молодь воспринимает с первых дней своей жизни и запоминает его. После работ Е. Крейджа [138], который впервые экспериментально показал роль обоняния у нерки при отыскании ею своих нерестовых притоков, к настоящему времени получены многочисленные данные, подтверждающие гипотезу ориентации рыб, особенно лососевых, по запаху.

Важная роль обоняния в ориентации рыб подтверждается не только поведенческими, но и электрофизиологическими исследованиями. Так, судя по амплитуде электроэнцефалограмм обонятельных долей мозга лососей, наибольшая активность обонятельных луковиц отмечается при вливании в носовые камеры рыбы воды, взятой из «родной» реки [157].

Запоминание запаха «своей» реки происходит у лососевых в период ската молоди в море. Опыты по пересадке молоди из одной реки в другую показали, что возвращающиеся на нерест производители предпочитают не те притоки, где они вывелись из икры, а те, в которые их пересадили перед скатом в море [133]. Более того, некоторые авторы считают, что запоминание запаха происходит в течение последних двух дней перед скатом в море [170]. В это время у молоди отмечается и повышенная активность обонятельных долей мозга, что косвенно свидетельствует о запечатлевании запаха потока именно в этот короткий период [157].

На способности рыб запечатлевать запах своего места рождения основаны эксперименты по управлению движением рыб с помощью химических реагентов. В Висконсинском университете было экспериментально доказано, что если покатуную молодь лососевых в стадии смолтификации содержать в растворе какого-либо органического вещества, то после нагула в море или озере, став взрослыми, эти рыбы вернутся обратно в ту реку, в которую будет добавлен раствор данного вещества. В качестве такого вещества был выбран морфолин в концентрации 5—10 мг/л [135, 221]. Первые опыты с простым мечением показали, что возврат рыб, которые смолтами содержались в растворе морфолина, был в несколько раз выше, чем контрольных особей, выдержанных в обычной пресной воде.

В озере Мичиган была произведена проверка влияния морфолина на движение лососей, меченных ультразвуковыми передатчиками [194]. Из нерестовой реки рыбу переносили в озеро на 4 км севернее устья и выпускали в 100 м от берега. Как было показано выше, лососи строго придерживаются береговой линии. Это облегчало наблюдение, поскольку движение всех меченых рыб происходило стереотипно. На пути рыб примерно в 1 км от устья реки в озеро выпускали раствор морфолина. Особи, которые в период смолтификации содержались в таком растворе, прекратили миграцию и длительное время перемещались в точке выпуска морфолина. Поведение рыб, ранее не знакомых с этим веществом, не изменилось (рис. 36).



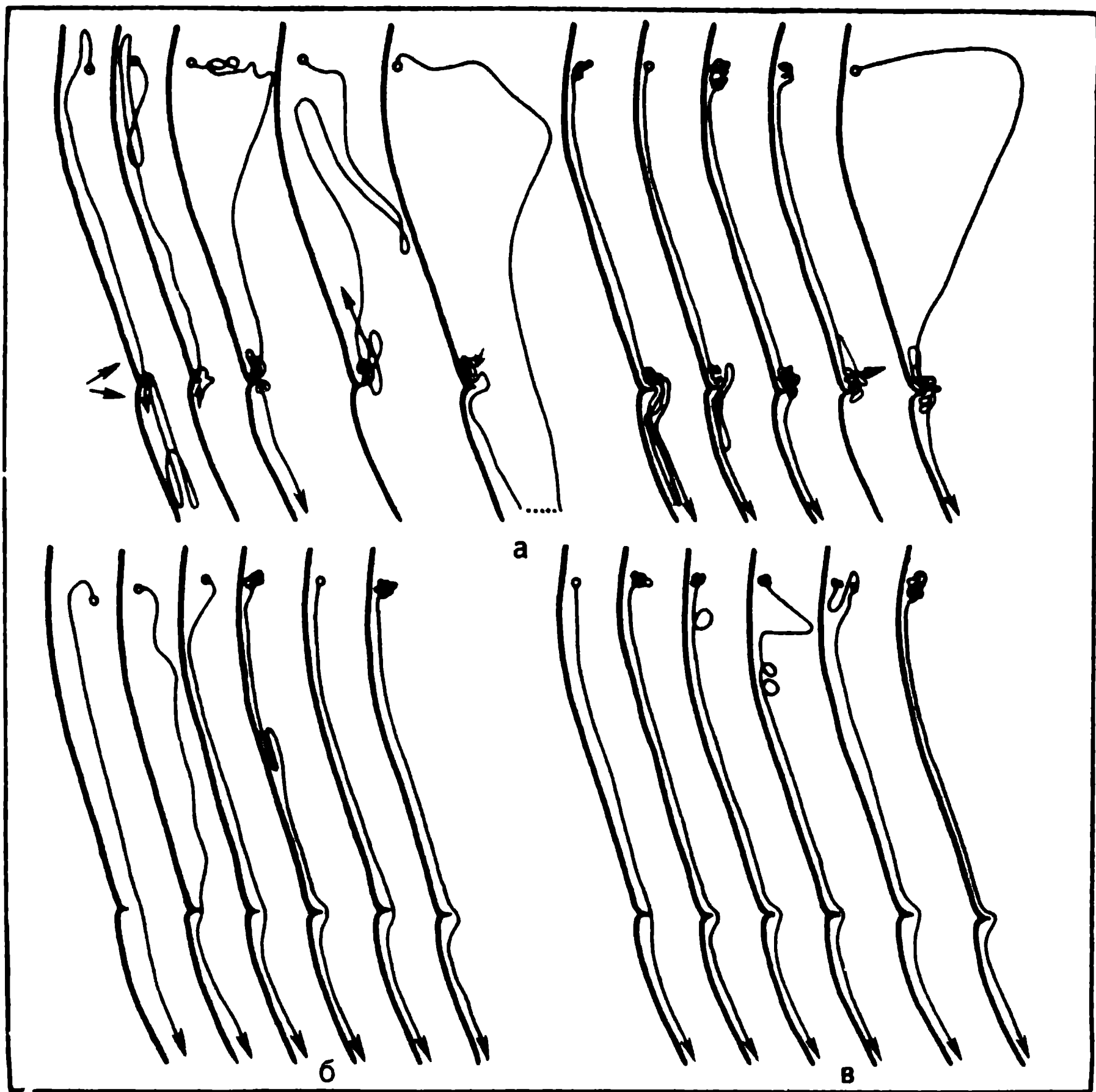


Рис. 36. Влияние морфолина на трассы движения лососей [194]:

*a* — при запечатлевании (стрелками указаны места выпуска раствора); *б* — без запечатлевания; *в* — при запечатлевании, но без выпуска раствора.

Х. Клирекопер [179] экспериментально доказал, что если привлекающий запах не разносится течением, то рыба не в состоянии найти его источник, и, исходя из этого, пришел к заключению, что ориентация на перестовую реку или приток возможна только через реореакцию при движении рыбы против течения. Следует отметить, что рыба может воспринимать течения, скорость которых не превышает 1–5 см/с [158]. Механизм ориентации на поток — зрительный или тактильный, когда рыба фиксирует свое положение в движущейся среде относительно неподвижных ориентиров визуально или непо-

средственным прикосновением. При невозможности зрительной или тактильной ориентации рыба может распознавать направление потока по направлению электродвижущей силы (э. д. с.), наводящейся в движущейся в геомагнитном поле массе воды. Возможно, органом восприятия течений является боковая линия [25].

Успешность ориентации рыбы на свою нерестовую реку по запаху и направлению движения воды, а также дальность обнаружения зависят не только от функциональных особенностей органов чувств рыбы, но и от мощности стокового течения. Именно поэтому опыты по отключению обоняния у рыб в слабопроточном озере или водохранилище, где течения очень сложны и неустойчивы, не показали различий в поведении контрольных и подопытных особей [71, 200], поскольку рыба в этих условиях не в состоянии определить источник распространения запаха.

Наличие у рыб реотактильно-обонятельного механизма ориентации подтверждается нашими телеметрическими опытами по смещению рыб вверх и вниз от домашнего участка (рис. 37). Если снизу лещ возвращается, двигаясь только против течения, несущего запах домашнего участка, то особи, выпущенные выше, перемещаются кругами попеременно то поднимаясь против течения, то скатываясь вниз, пока не достигают своего участка. Отсутствие запаха своего притока приводит к тому, что безусловнорефлекторное следование рыб против течения сменяется поисковым.

Возврат в реку шэд, лишенных зрения или обоняния, значительно меньше, чем нормальных меченых особей. При отключении обоих органов чувств подопытные рыбы вообще не заходили в реку [145].

Факт, что ослепленные особи все же находят свою реку, видимо, связан с тем, что ориентация на потоки воды осуществляется рыбой не только визуалью. Видимо, и запах воспринимается не только органами обоняния, но и в какой-то степени вкусовыми рецепторами [123].

Телеметрические наблюдения [52] показали, что лососи уверенно и сравнительно легко отличают свой приток от чужого. Обычно устья чужих притоков они проходят, не снижая скорости. Ошибочный заход в эти притоки быстро исправлялся: пройдя 100—200 м вверх по такому притоку, рыба быстро скатывалась в водохранилище и продолжала дальнейший подъем в поисках «родной» реки. Не было случая, чтобы лососи миновали свой приток. Перед окончательным заходом в него рыбы некоторое время задерживаются в устье, скорость

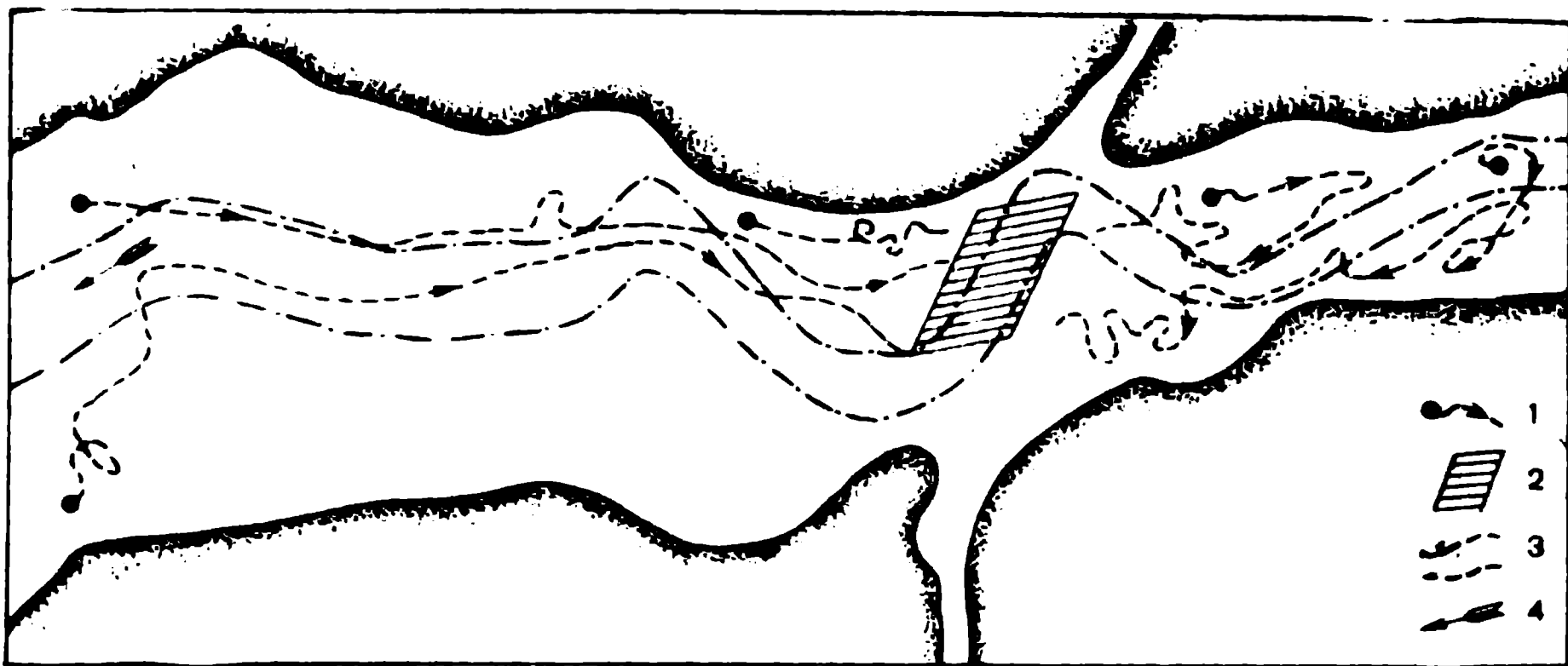


Рис. 37. Трассы движения леща:

1 — путь рыб; 2 — место поимки; 3 — русло; 4 — направление течений.

движения их резко снижается. Чтобы не пройти мимо своего нерестового притока, лосось должен сориентироваться на свой берег ниже места впадения притока. Мы обнаружили, что семга при попадании в водохранилище не всегда сразу выбирает нужное побережье и исправляет ошибку по мере продвижения вверх. Исправление ошибки происходит не по всей длине водохранилища, а только в его определенных участках. Так, на 20-километровом отрезке Нижне-Тулумского водохранилища этих участков было два (рис. 38). Г. Моунен [206] в водохранилище Айс-Харбор (США) обнаружил три таких участка. Трудно объяснить, по каким признакам рыба выбирает участок для перехода от одного берега к другому. Возможно, двигаясь определенное время по водохранилищу и не встречая запаха своего притока, она переходит от одного берега к другому либо на этих участках в результате перераспределения потоков воды концентрация запаха увеличивается в направлении от одного берега к другому.

В определенных ситуациях выбор направления движения корректируется рыбой по изменениям рельефа дна. Это характерно для волжского осетра и некоторых других рыб, мигрирующих в крупных реках [72].

В эстуарных участках рек рельеф дна утрачивает значение ориентира и движение тех же видов рыб, например тупорылого осетра в реке Майн (США) [199], определяется приливо-отливными течениями. То же самое, видимо, характерно и для угря. Если Л. Вестин и Л. Ниман [262] отмечают важную роль рельефа дна в ориентации серебристых угрей, мигри-

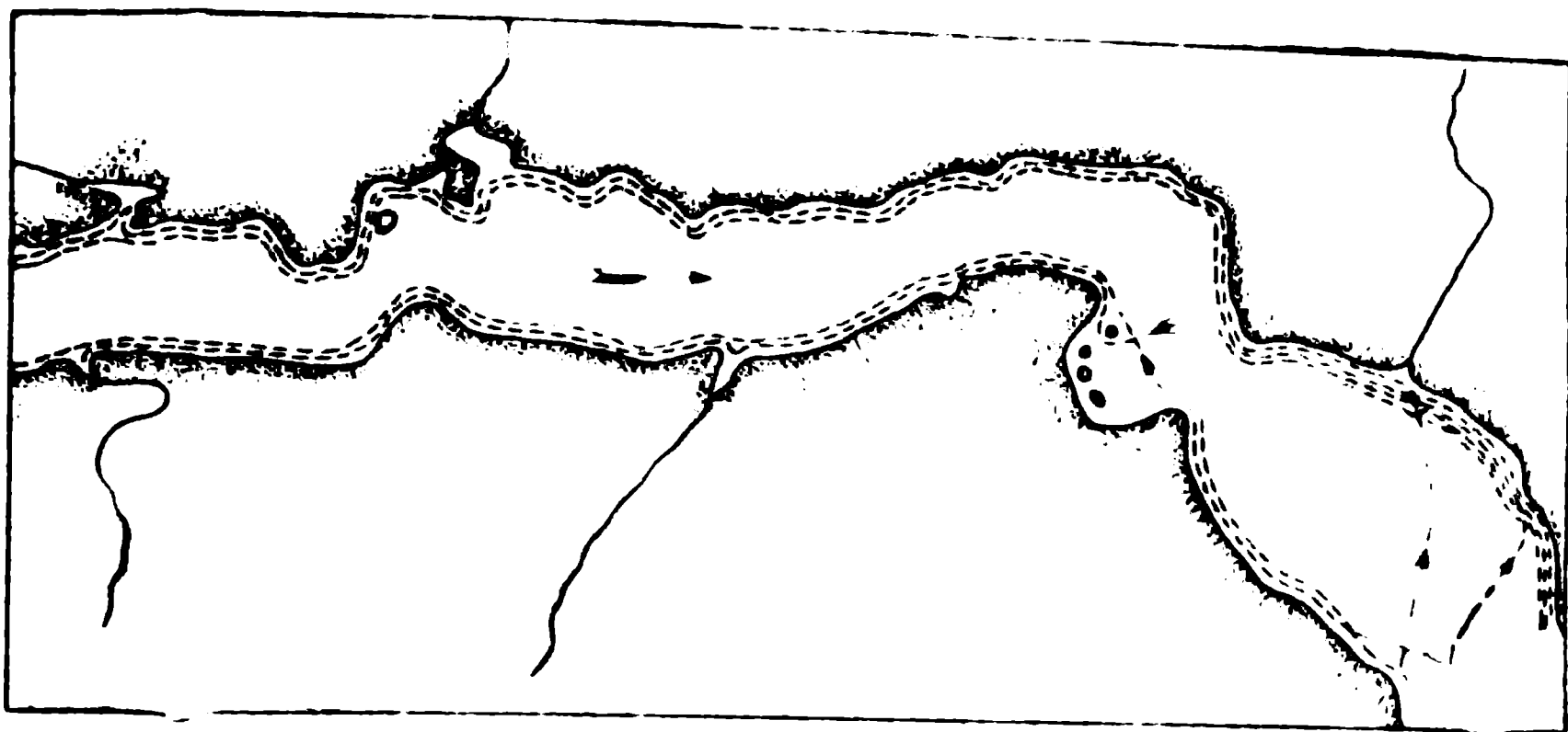


Рис. 38. Миграция семги в Нижне-Тулском водохранилище.

рующих вдоль Шведского побережья Балтийского моря, то Ф. Теш [241—245] в Северном море этой связи не обнаружил.

Механизм ориентации рыб по рельефу дна еще не ясен. Маловероятно, что он основан на тактильном или визуальном восприятии, так как многие рыбы мигрируют в значительном удалении от дна и тем не менее их курс четко совпадает с его рельефом. Вполне допустимо, что одним из главных механизмов при этом является рецепция рыбами с помощью боковой линии гравитационных волн, несущих информацию не только о местоположении прибрежных мелководий, но и об изменениях глубин [84].

### **Влияние температуры на ориентационное поведение рыб**

При определении генеральных направлений миграции рыбы, видимо, широко пользуются информацией о градиентах температуры воды. С помощью условнорефлекторных и электрофизиологических методов обнаружено, что пресноводные рыбы так же, как и морские, способны воспринимать различия температуры в  $0,05—0,1^{\circ}$  и реагировать на скорость ее изменения, равную  $\pm 0,1^{\circ}$  в минуту. Чувствительность рыб к температуре повышается в результате суммирования ответных реакций с ее терморецепторов [209]. Хотя тепловое поле характеризуется скалярностью, рыба, обладая высокой чувствительностью к термоградиентам, способна обнаруживать общее направление увеличения или уменьшения температуры.

В опытах с желтохвостом [173, 192, 251] показано, что рыбы при миграции стремятся находиться в водной массе с однородной температурой, не различающейся на смежных участках более чем на  $1-2^{\circ}\text{C}$ . Однако в часы питания они могут преодолевать градиенты температуры в  $5-10^{\circ}$ , если в слое с более низкой или высокой температурой находятся скопления кормовых объектов. В глубокие слои воды (ниже 130 м) за пределы термоклина рыбы никогда не опускаются.

Дистанционные наблюдения за лещом в Рыбинском водохранилище показали, что в динамической среде изменение направления движения рыб совпало с изменением электропроводности водной массы в 83% случаев, глубины места — в 80%, температуры воды — в 67%, тогда как для других учтенных факторов эти совпадения никогда не превышали 12—30% [71]. Несомненно, что температура, электропроводность и глубина как возможные ориентиры мигрирующей рыбы взаимосвязаны и роль каждого из этих параметров зависит от изменений другого.

Безошибочное движение туводных рыб в сторону своих нерестилищ, видимо, облегчается наличием во время паводка и заполнения водоемов более сильных, чем в другие сезоны года, течений и более высокой температуры воды, поступающей в озерную часть водоема из нерестовых притоков. Эта вода отличается и рядом химических свойств как в пределах водных масс крупных речных плесов, так и внутри водной массы в местах впадения малых рек. Кроме того, температура воды имеет значение не только для определения курса движения, но и несет информацию о начале миграции и нереста. Резкое изменение температуры может вызвать изменения миграционного поведения рыб (замедление движения, остановка, скат), не связанные с условиями ориентации и определяемые только ее физиологическим состоянием.

Интересные наблюдения за движением лососей в притоки, имеющие разную температуру воды, провел Г. Моунен с сотрудниками [207]. В этих опытах при большой разнице температур (примерно  $4^{\circ}\text{C}$ ) рыбы предпочитали более холодный приток, а когда температура в обоих была почти одинаковой, рыбы заходили в основном в свой приток.

В последнее время все большее внимание уделяется исследованиям влияния сбросов тепловых (ТЭЦ) и атомных или ядерных (АЭС) электростанций на экологические системы водоемов-охладителей. Влияние термальных вод на гидробионтов многогранно и сложно. Оно проявляется на всех этапах индивидуального развития животных, влияет на видовой со-

став водного населения, структуру и распределение популяций. Теплые воды могут оказывать заметное влияние на поведенческие реакции беспозвоночных и рыб [58, 126, 240]. Для изучения этих реакций можно использовать подводную биотелеметрию. В США состоялось несколько симпозиумов [239, 253], посвященных вопросам применения биотелеметрических методов для исследования поведения рыб в зонах сбросов теплых вод. На симпозиумах отмечалось, что эти методы в ряде случаев являются единственными, помогающими детализировать картину перемещений рыб, выбор ими определенных температурных зон и учесть сезонные особенности реакций рыб на теплую воду.

Телеметрические наблюдения за перемещениями рыб в зонах теплых вод подтверждают данные об успешном избегании ими зон летальных температур [122]. Л. Ниман [212, 213] исследовал с помощью ультразвуковых передатчиков перемещения трех язей, 10 угрей и пяти кумж в районах сброса теплых (градиент температуры  $5-10^{\circ}$ ) вод ТЭЦ и АЭС, расположенных на шведском побережье. Была отмечена видовая специфика реагирования рыб на теплый сток. Кумжа в весенний период при естественной температуре морской воды около  $8^{\circ}\text{C}$  привлекается теплыми водами электростанций. Летом при повышении естественной температуры морской воды до  $15-16^{\circ}\text{C}$  она, наоборот, избегает эти воды. У язя в зависимости от времени года и физиологического состояния наряду с привлечением также отмечается устойчивое избегание теплого сброса. Желтый угорь (немигрантная форма) летом при попадании в теплый сток задерживается в нем. Серебристый угорь (мигрантная форма) также задерживается здесь. Более того, этот угорь предпочитает зону стока, где температура на  $7-10^{\circ}$  выше, чем в окружающей среде. В конце лета и осенью он покидает подогретые воды, что, вероятно, связано с началом катадромной миграции.

В зоне термального стока поведение рыб может существенно отличаться от наблюдаемого в обычных условиях. Так, Д. Келсо [175—177] показал, что в теплых водах у желтого окуня, чукучана и американского сомика увеличиваются амплитуда и частота угловых поворотов. Спрямоленные переходы от одной точки к другой значительно короче, чем на участках водоема, не подверженных влиянию термального стока. Заметно уменьшается в зоне стока площадь и скорость перемещений. Существенную роль в наблюдаемых изменениях поведения рыб играет не только температура, но и течение, вызванное сбросными водами. Это затрудняет анализ полу-

часмых результатов, поскольку рыба может привлекаться на сток не только по градиенту температуры, но и по течению. В целом отмечено, что продолжительность пребывания этих рыб в подогретых водах небольшая: у желтого окуня и чукуна — до 9 ч, у сомика — до 1 сут.

Серию телеметрических наблюдений за движением лососевых в зоне термальных сбросов на реке Колумбия (США) провел Ч. Коутент [136, 137]. В 1967 г. он проследил за перемещением 70 особей стальноголового лосося и чавычи, а в 1968 г. — более 250 особей. В условиях широкой реки меченые мигранты придерживались мелководной прибрежной зоны так же, как и до создания АЭС [171], предпочитая северный, противоположный теплой зоне, берег. Ниже электростанции не было обнаружено заметных изменений в трассах движения рыб, так как здесь теплые воды были локализованы в 150—200 м от центра реки под южным берегом. Около АЭС рыбы обычно переходили под противоположный берег. Однако это могло быть связано и с циркуляционными течениями, образующимися в месте сброса теплых вод. На следующий год исследования проводились в разные сезоны. Оказалось, что северное побережье рек лосося чаще выбирают летом, когда естественная температура речной воды максимальна. Весной и осенью миграция осуществляется как под северным, так и под южным берегами. На участке, расположенном на 16 км ниже места сброса теплых вод, летние лосося, мигрирующие вдоль южного берега, переходят к противоположному, реагируя даже на небольшое увеличение температуры воды под южным берегом, которое их отпугивает и заставляет пересекать реку.

Существенных изменений в скоростях плавания рыб при прохождении участков с температурой воды, на 2—3° выше обычной, не наблюдалось.

Интересны результаты параллельных опытов с большеротым окунем в озере площадью приблизительно 6 га с естественным температурным режимом и в водоеме-охладителе АЭС [137]. Во время наблюдений в озере температура поверхностных слоев воды варьировала от 7—8 (март) до 32°С (июль). Летом температура воды здесь составляла 32 (мелководные прибрежья) и 7°С (у дна на больших глубинах). Отмечалась стратификация температуры. Весной рыба выбирала преимущественно более теплые воды прибрежных участков. В ряде случаев отмечались кратковременные (менее 5 мин) переходы рыбы в более холодную воду, после чего она быстро возвращалась обратно. Летом окунь



избегал сильно прогретых вод побережья и обычно перемещался в места, где температура была на 3—4°С ниже максимальной. Эти результаты несколько отличаются от данных лабораторных исследований, в соответствии с которыми оптимальные температуры для молоди окуня близки к 30—32°С. Наблюдения в зоне вод, сбрасываемых АЭС, показали, что весной окуни могут оставаться до нескольких суток в подогретых водах, занимая ограниченный участок водоема (домашняя территория). Это, возможно, связано с тем, что рыба находит здесь убежище среди пней и камней. Как и в озере, окунь кратковременно заходил в холодные воды (2—3°С) или совершал более длительные заходы на участки с температурой до 10°С. При остановке электростанции меченые окуни уходили из зоны сброса, но при возобновлении стока теплых вод возвращались обратно.

На участках водоема, где температура стратифицирована, многие виды рыб придерживаются гомотермного эпилимниона. Так, вертикальные перемещения атлантического лосося ограничены глубинами до 15 м. При этом в дневное время глубина следования рыб несколько больше, чем ночью [236].

Как уже отмечалось, многие рыбы при перемещениях придерживаются поверхностных слоев воды. Так желтый судак (*Stizostedium vitreum*) в озере мигрирует в 10-метровом слое прибрежной полосы над дном с крутыми склонами [176]. Наблюдения за перемещениями кошачьего сомика (*Ictalurus punctatus*), наиболее активного в сумерках, в одном из небольших озер Аризоны показали [265], что весной и летом при стратификации температуры он держится в основном выше термоклина независимо от содержания в воде кислорода. При использовании температурных передатчиков-меток было обнаружено, что в покое температура тела сомиков соответствует температуре окружающей среды. Во время плавания она повышается на 0,2°, а при остановке уже через 2 мин вновь становится равной температуре воды.

Наиболее длительные исследования реакций на градиенты температуры воды и тела с помощью биотелетметрических методов пока проведены на тунцах [132]. Показано, что эти рыбы часто пересекают слой термоклина, проходя воды с различными температурами. Изменения температуры воды на 4° не влияют на температуру мышц рыб. Более того, отдельные тунцы погружались в глубокие слои воды, где температура на 14° ниже, чем у поверхности, а через 4 ч возвращались обратно без существенных изменений температуры собственного тела (температуры желудка).

В ряде опытов температура тела рыб изменялась на  $8^{\circ}$  независимо от температуры окружающей воды, т. е. хотя тунец и контролирует температуру своего тела, но у него нет определенного строго фиксированного, как у теплокровных животных, температурного диапазона и его терморегуляция не столь совершенна.

Ультразвуковое прослеживание успешно можно применять также для изучения поведения и реакций рыб в загрязненных участках водоема. Например, П. Елсон с сотрудниками [148] показал, что атлантический лосось избегает загрязненные рукава реки Мирамиши (Канада), распознавая их с помощью органов обоняния и хеморецепции. При этом скорость движения рыб против течения в чистых водах была значительно выше, чем в загрязненных (соответственно 0,21 и 0,06 км/ч).

Заканчивая рассмотрение данных по миграциям и ориентации рыб, полученных с помощью методов подводной телеметрии, необходимо отметить следующее. Несмотря на то что эти методы стали применяться сравнительно недавно, полученные с их помощью результаты оказались вполне пригодными для использования в рыбохозяйственной практике.

Телеметрические исследования по выявлению роли отдельных анализаторов наглядно показывают, что ориентация рыб происходит не с помощью одного какого-либо органа чувств, а обусловлена работой многих, если не всех, анализаторов. Иными словами, рыба получает информацию о правильности своего курса движения по различным каналам связи (химическим, визуальным, акустическим, электромагнитным): чем больше анализаторов включено в систему ориентации, тем более ориентированно движется рыба и тем меньше ее миграционное поведение отклоняется от видового стереотипа.

Степень значимости отдельных каналов связи у разных рыб и в различных экологических ситуациях не равноценна. На участках рек со спрямленными руслами и в прибрежье в основе ориентации, видимо, лежит реореакция с ольфакторной корректировкой пути на запах «родного» притока или участка. Обоняние, реореакция, термо- и хеморецепция скорее всего руководят рыбой при поиске «своей» нерестовой реки и конкретного нерестилища.

На участках рек со сложным рельефом дна и циркуляционными течениями у мигрирующих рыб работают по крайней мере три-четыре канала связи: реотактильный, терморезервуарный, акустический и зрительный. В открытых районах озера, моря, водохранилища основу выбора рыбой генерального направления движения определяет, видимо, работа солн-

це-компасного механизма и способность животных к электромагнитной ориентации, так как другие ориентиры (четкие градиенты течения, температуры, солености, химического состава воды и др.) здесь чаще всего отсутствуют.

Для детализации сложившихся предположений и выявления истинной картины требуются расширение поисковых работ с охватом большого числа разных экологических групп рыб и дальнейшее повышение информативности метода. Последнее возможно, как уже отмечалось, путем внедрения в практику биотелеметрических наблюдений серий информативных передатчиков, контролирующих физиологическое состояние рыбы в сочетании с детальной оценкой состояния абиотической и биотической сред.

### **ТРАССЫ, СКОРОСТЬ И РИТМИКА ДВИЖЕНИЯ РЫБ**

Биотелеметрические методы исследования поведения рыб наряду с традиционными методами промысловой разведки и биологическим контролем за жизнедеятельностью популяций находят все более широкое применение в решении тактических вопросов промыслового использования природных рыбных запасов и их искусственного воспроизводства.

Определились три основных аспекта применения телеметрии в рыболовстве и рыбоводстве: прямое использование данных прослеживания пути рыб в целях наведения промысловых судов на скопления и оптимального размещения орудий лова; совершенствование существующих и создание новых орудий лова; разработка способов привлечения рыбы в орудия лова и отпугивания ее из зон, опасных для жизни.

### **Закономерности перемещений мигрирующих рыб**

В набор информативных признаков, характеризующих движение рыбы на конкретном участке, входят направление, путь, скорость, глубина следования. Эти показатели существенно различаются у разных рыб в зависимости от условий водоема, качества и физиологического состояния особей.

По нарастающей степени сложности поведения рыб все водоемы и их участки можно подразделить следующим образом: реки, эстуарии рек, прибрежные воды озера, водохранилища, моря; открытые участки (озера, водохранилища, акватория моря за пределами литорали).

Рассмотрим наиболее общие закономерности в перемещениях рыб, которые необходимо учитывать при их промысловых обловах на этих участках.

**Реки.** Телеметрические наблюдения с применением ультразвуковых передатчиков здесь осуществляются с судна-спутника, со стационарных или передвижных прибрежных станций.

Особенно перспективна система стационарных прибрежных станций, которые автоматически регистрируют путь и время прохождения меченой рыбой прилегающей к данной станции акватории водоема. В мелководных реках более перспективно применение радиопередатчиков [127].

Наиболее простые пути движения мигрирующих рыб отмечаются в узких реках или спрямленных участках широких рек. На таких участках реки мигранты в большинстве случаев следуют вдоль русел или по наиболее глубоким участкам реки [72, 134]. Степень сложности движения мигрантов в реке находится в прямой зависимости от морфометрии проходимого участка и направления потоков воды в нем. На спрямленных участках, где отсутствуют резкие температурные градиенты, даже в больших реках пути движения рыб удивительно однообразны. Так, для некоторых участков Волги значение коэффициента корреляции между трассами движения отдельных особей осетра, который в большинстве случаев придерживался русловой части реки, достигало 0,9. Сходная картина отмечалась и у мигрирующих семг. Стереотипия основных трасс миграции присуща и тихоокеанским лососям, которые придерживаются береговой зоны [37]. Это же характерно и для шэд в реке Коннектикут, которая плывет вдоль русел [185]. Следует отметить, что туводные судак, налим, лещ также строго придерживаются склонов подводных углублений, а щука чаще передвигается вдоль береговой линии. Это характерно как для рыб в нагульный период при переходе с одного участка на другой или при искусственном смещении, так и для рыб, совершающих нерестовые и предзимовальные миграции [72].

Миграционное поведение севрюги на мелководных участках реки Кубани не столь однообразно, как у волжского осетра. Севрюга следует вверх не придерживаясь строго русловой части реки и перемещаясь в равной степени как по руслу, так и по прилегающим к нему мелководьям (рис. 39).

Наблюдения за осетрами на незарегулированных участках Средней и Нижней Волги показали, что наиболее сложны трассы их движения в местах слияния потоков, например ниже островов, разделяющих реку на два рукава, и на участках с резкими перепадами глубин. Здесь же отмечаются и наибольшие вариации скоростей движения рыб. Сопоставления трасс движения мигрантов с рельефом дна показывают,

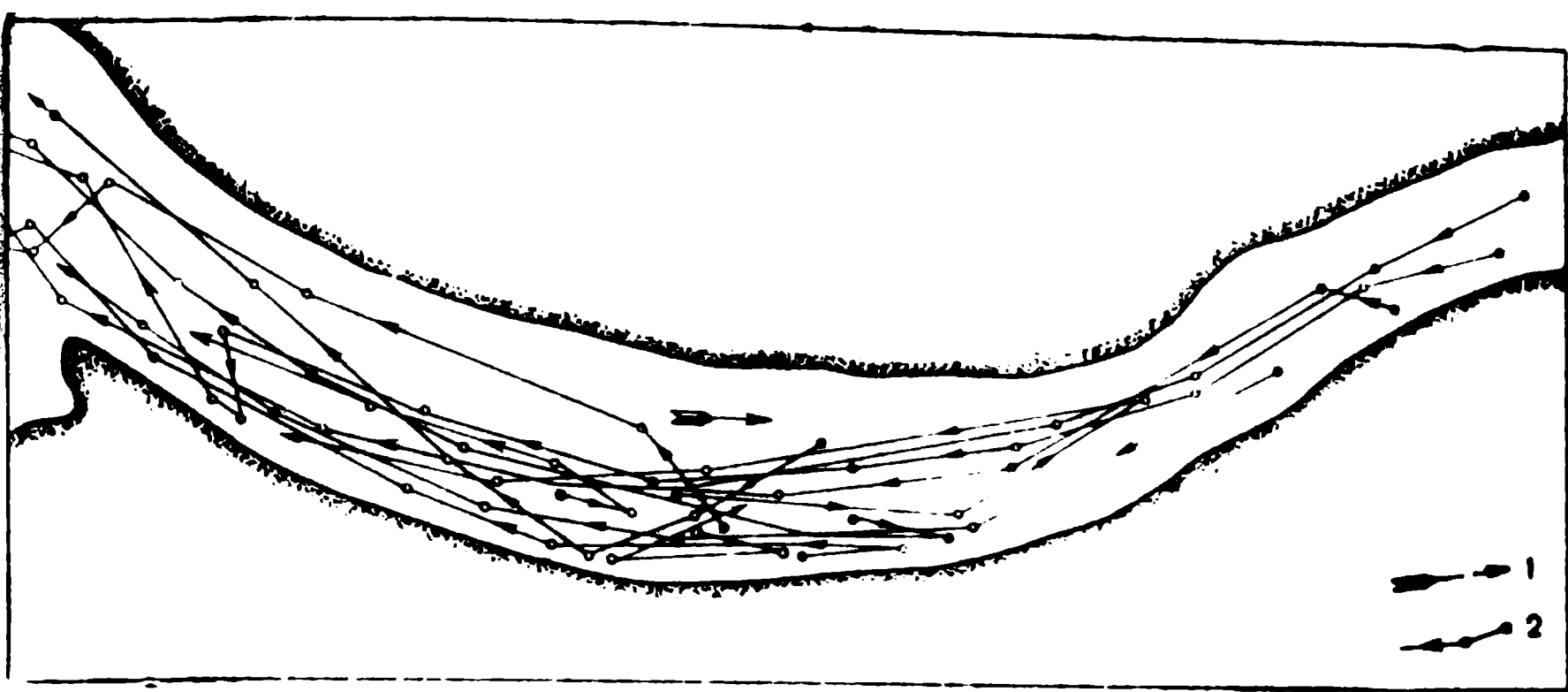


Рис. 39. Пути движения севрюги во время нерестовой миграции в р. Кубань: 1 — течение; 2 — путь рыб.

что большая часть осетров придерживается склонов русел или определенных изобат. Более того, скорость следования рыб вдоль русел или изобат выше, чем при прохождении меняющихся глубин [72].

Исследования в районе волжского водodelителя в 1976 г. показали, что осетры примерно 70—80% времени перемещаются над русловыми склонами или в непосредственной близости от них. Остальное время они мигрируют как в прибрежном мелководье, так и над руслами. Иными словами, их движение вверх по течению происходит не совсем строго по прямой линии, а с периодическими отклонениями от склона в ту или другую сторону. Рыба поднимается вверх как бы зигзагами, отклоняясь от выбранной изобаты на 50—100 м, реже — на 200 м.

**Эстуарии рек и притоков.** Телеметрические исследования перемещений рыб на этих участках обычно проводятся с судов-спутников. В принципе возможен комбинированный способ регистрации меченых рыб: стационарная прибрежная станция отмечает общий характер поведения рыб (время их появления в данном районе, длительность задержки, скорость движения относительно берега), а судно-спутник детализирует траектории и фактические скорости. Для эстуариев небольших рек вполне применима триангуляционная пленгация меченых рыб с двух стационарных станций.

Общим признаком, характеризующим поведение рыб на данных участках, является их задержка перед окончательным заходом в реку или, наоборот, перед выходом из них в море,

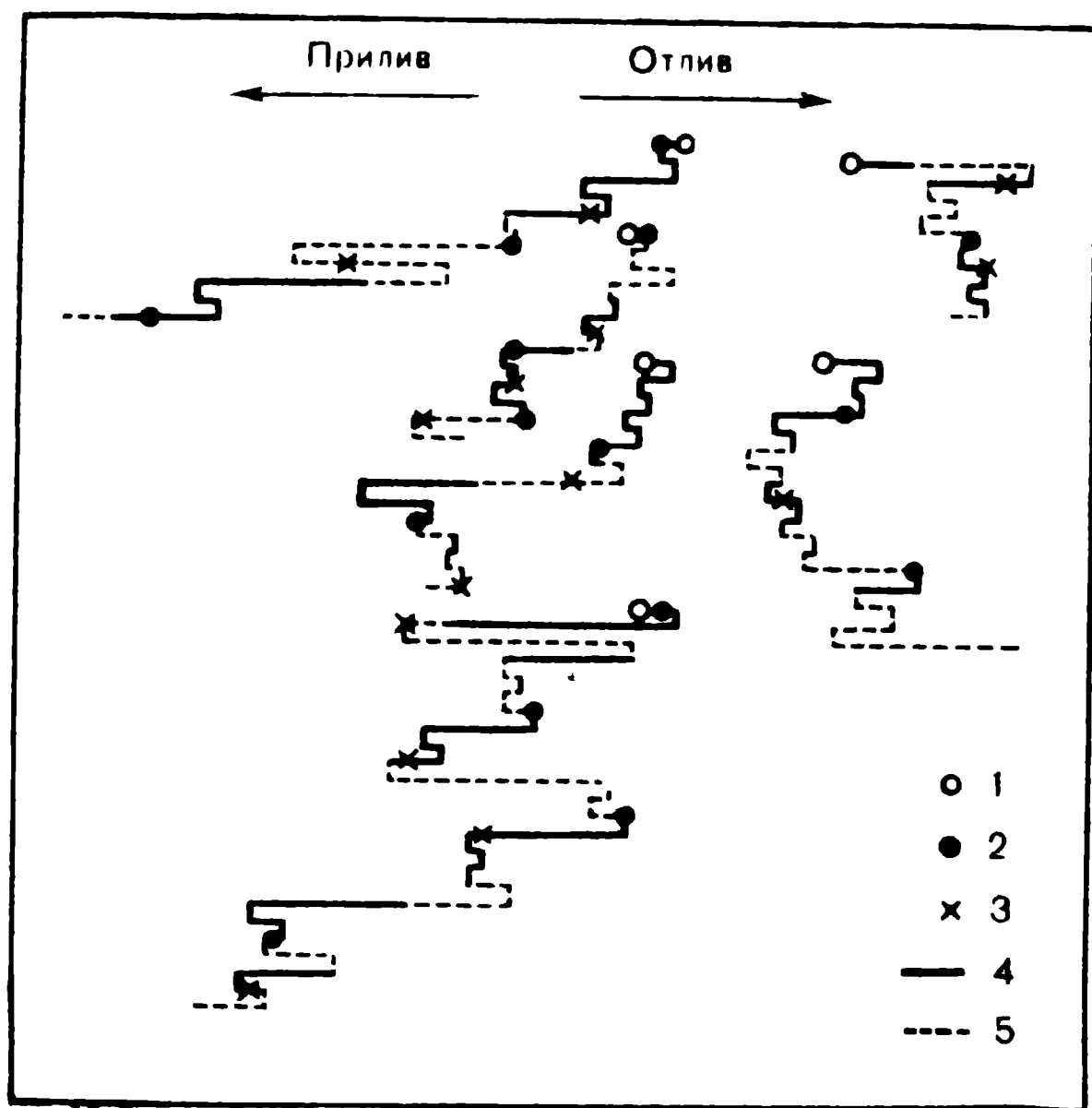


Рис. 40. Схема направлений движения лосося относительно приливо-отливных течений [232]: 1 — начало движения; 2 — заход солнца; 3 — восход солнца; 4 — путь рыб во время прилива; 5 — путь рыб во время отлива.

озеро. Здесь же наблюдается наибольшая вариабельность путей перемещений рыб. Обычно в эстуариях нельзя выделить каких-либо узко локализованных «миграционных троп» (как это наблюдалось в реках). Рыбы движутся в самых различных направлениях: как в сторону устья родной реки, так и в противоположном направлении. Тем не менее в целом рыбы придерживаются одного, доминирующего направления.

В местах, подверженных влиянию приливо-отливных течений, движение рыб четко коррелирует с направлением этих течений. По мере приближения к нерестовой реке и особенно к ее устью влияние приливо-отливных течений еще более возрастает. В устье реки Мирамиши (Канада) пути меченых атлантических лососей всегда совпадали с направлением приливо-отливных течений (рис. 40), имевших скорость около 0,4—0,5 м/с [232]. Мигранты то поднимаются вверх к реке, то скатываются назад; у некоторых особей вообще длительное время не отмечается существенных подвижек. Судя по малой или вообще неизменяющейся величине сигнала меченой рыбы, приходящего на приемное устройство дрейфующего катера, лососи при появлении приливо-отливных течений часто перемещаются вместе с потоком, видимо, дрейфуя в нем. Активное плавание вверх по реке совершается преимущественно

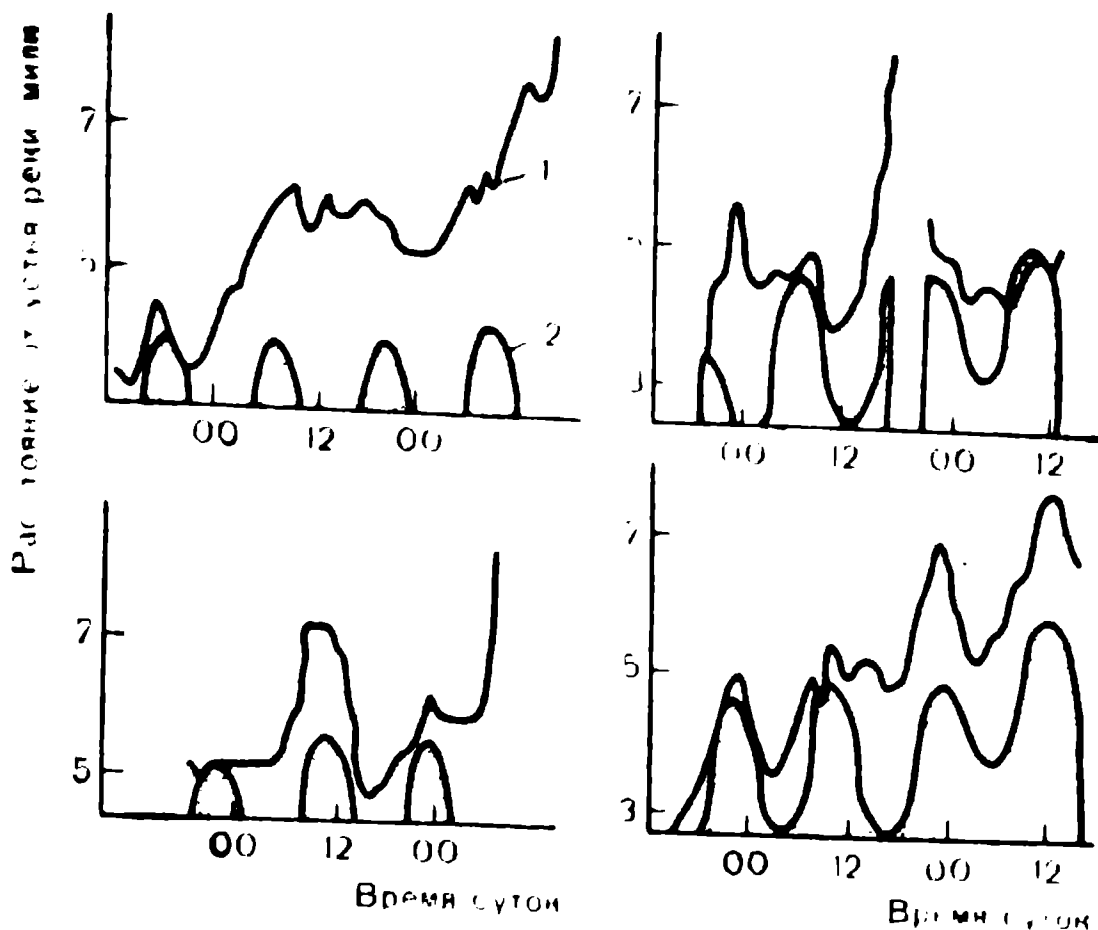


Рис. 41. Движение шэд (1) относительно границы смешения пресных и соленых вод (2) [143].

но в период стоячей воды как при наибольшем, так и наименьшем ее уровнях. В целом наблюдается цикличность движения: подъем вверх к реке (дрейф в приливной волне плюс активное плавание при высокой воде) чередуется со скатом (дрейфом) или задержкой в отлив с последующим активным подъемом при низкой воде.

Телеметрические наблюдения за реакцией шэд на изменения солености в устье реки Коннектикут [143, 144] показали, что в зоне смешения речных и морских вод рыбы приостанавливают миграцию вверх и перемещаются в соответствии с колебаниями границы раздела этих вод, вызванными приливо-отливными течениями и изменениями объема стока реки (рис. 41). Из 18 выпущенных в низовьях реки Скин (Тихоокеанское побережье Северной Америки) нерок 15 также, как и шэд, пассивно перемещались вместе с приливо-отливной волной [155]. Дрейф рыбы наблюдался и в приустьевой зоне на границе пресных и соленых вод. Средняя скорость движения рыбы составила в прилив 1,6 (низовья) и 2,0 км/ч (вблизи устья), а в отлив — соответственно 2,1 и 3,6 км/ч.

Дрейф в приливо-отливных потоках, частая смена курса движения, длительное пребывание проходных рыб в эстуарных и устьевых участках реки отражают не только ориентационное поведение, но и включают те его элементы, которые связаны с физиологической адаптацией организма рыб к смене солености воды. Кроме того, задержка рыбы в данной зоне, видимо, необходима для усиления гормональной активности организма и ускорения созревания половых продуктов.



Туводные рыбы также скапливаются в устьях притоков в ожидании оптимального температурного режима. Например, судак в Рыбинском водохранилище длительное время перемещается перед устьем своего нерестового притока. При затянувшемся похолодании весной перемещения рыб в эстуарии продолжаются несколько дней и даже недель. Резкое потепление вызывает, как правило, массовую подвижку и быстрый заход рыб в реку. Лососевые при заходе из водохранилища в свой нерестовый приток [52] также на некоторое время прерывают миграцию.

Следует отметить, что анадромные мигранты могут использовать для захода в нерестовую реку и искусственные каналы. Так, от Чесапикского залива в 1824—1829 гг. был проложен канал, сокращающий водный путь между этим заливом и рекой Делавэр. Простое мечение показало, что полосатый окунь из реки Потомак заходит в канал, т. е. он может заходить в Чесапикский залив не через устье реки, а более кратким путем. Телеметрические наблюдения за пятью особями (три — до нереста, две — после нереста) подтвердили это предположение [181]. Меченые ультразвуковыми передатчиками окуни в канале мигрировали как в сторону залива, так и в сторону реки. Некоторые рыбы здесь задерживались для отдыха или питания. В приливо-отливных течениях окуни либо дрейфовали в потоке, если его направление совпадало с курсом их движения, либо задерживались на одном месте, если поток был направлен им навстречу, как бы дожидаясь попутного течения, либо активно плыли против течения.

**Прибрежные участки моря, озера, озерного плеса водохранилища.** Общий характер движения рыб на данных участках можно представить схематично как перемещение вдоль или перпендикулярно береговой линии. Многие виды рыб во время миграций, подойдя к берегу, в дальнейшем уже не уходят в открытую воду, а придерживаются литорали. Особенно это характерно для лососевых.

Миграционный цикл многих видов рыб может быть представлен как периодический приход в прибрежную зону на нерест и уход в дальнейшем от берега в открытый водоем (рис. 42). Наблюдения за локальными стадами леща в Рыбинском водохранилище [72] показали, что среди меченых рыб здесь выделяются две категории особей — оседлые и мигрирующие. Оседлые рыбы постоянно обитают в районе нерестилищ. Перемещения их в нагульный период ограничены и происходят преимущественно циклично: выход на мелководья ночью и возвращение в ложбины или на русла утром.

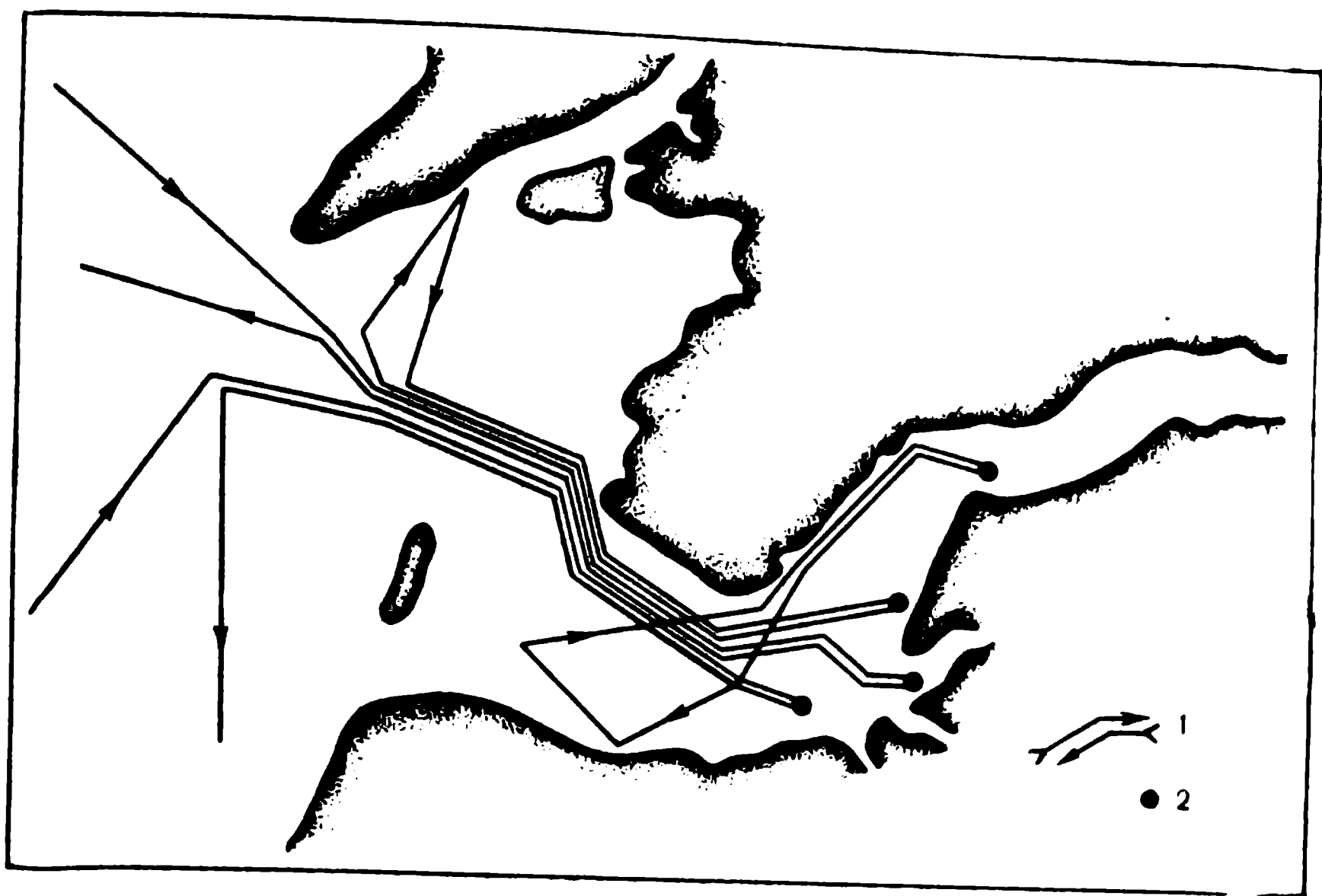


Рис. 42. Миграционные циклы леща в Волжском плесе Рыбинского водохранилища:

1 — циклы мигрирующих особей; 2 — ареалы оседлых особей

Мигрирующие особи уходят в центральную часть водоема сразу после нереста, где образуют нагульные скопления на участках с повышенной плотностью кормовых организмов. Зимуют они вблизи мест нагула.

Интересную работу на пеламиде (*Katsuwonus pelamis*) провел Х. Юэн [256] в районе Гавайских островов. Им были прослежены в течение нескольких суток перемещения двух особей, меченных ультразвуковыми передатчиками, введенными в желудок. Каждый день с наступлением темноты рыбы покидали отмель и удалялись в открытое море на всю ночь; с восходом солнца они неизменно возвращались на отмель и оставались здесь до следующей ночи (рис. 43). Судя по тому, что в районе местонахождения меченой рыбы гидролокатор регистрировал множество эхо-мишеней, меченая рыба присоединилась к своему косяку, и ее поведение было типичным для всей стаи пеламид.

**Открытые участки моря, озера или водохранилища.** Телеметрические исследования на этих участках могут быть осуществлены только с помощью судов. Как и в устьях рек, в открытых плесах строгая стереотипность перемещений рыб

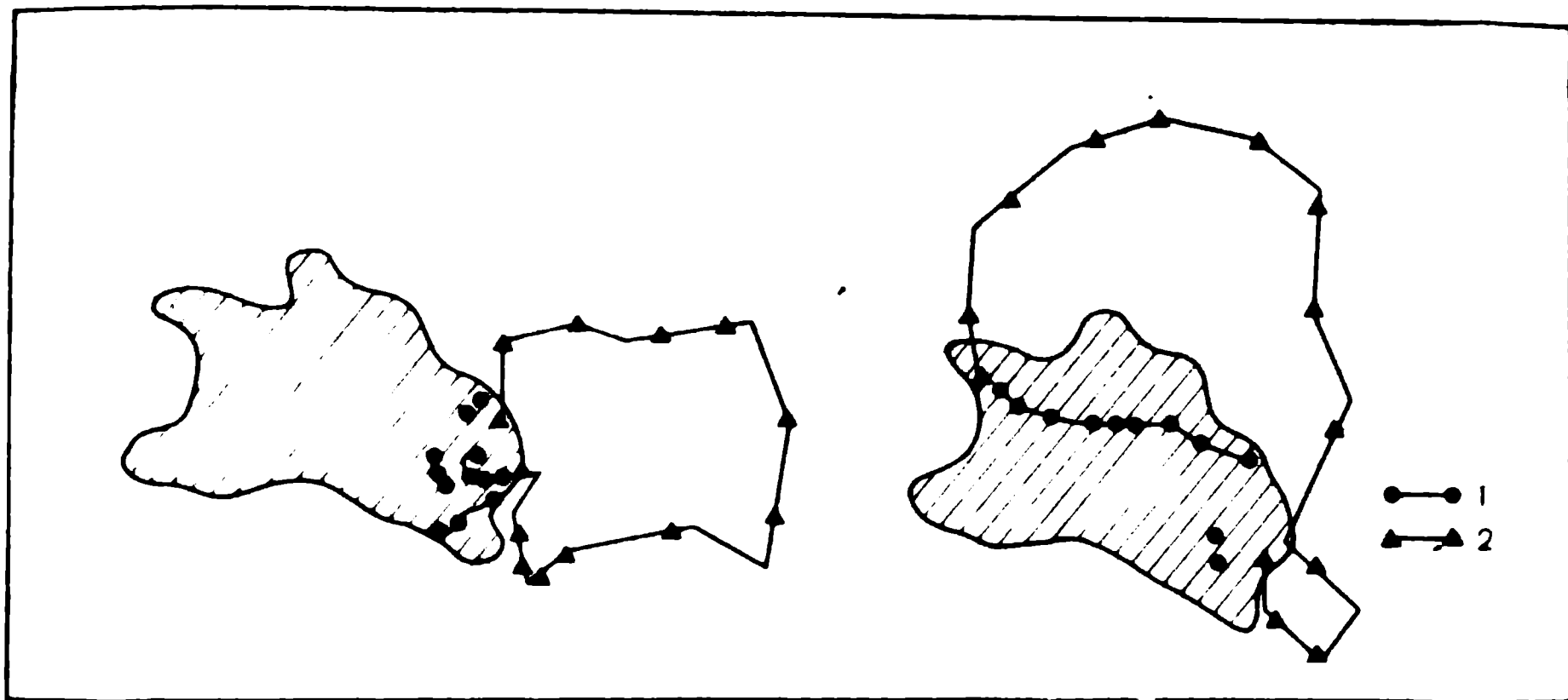


Рис 43 Перемещение пеламид около мелководной банки днем (1) и ночью (2) [256]

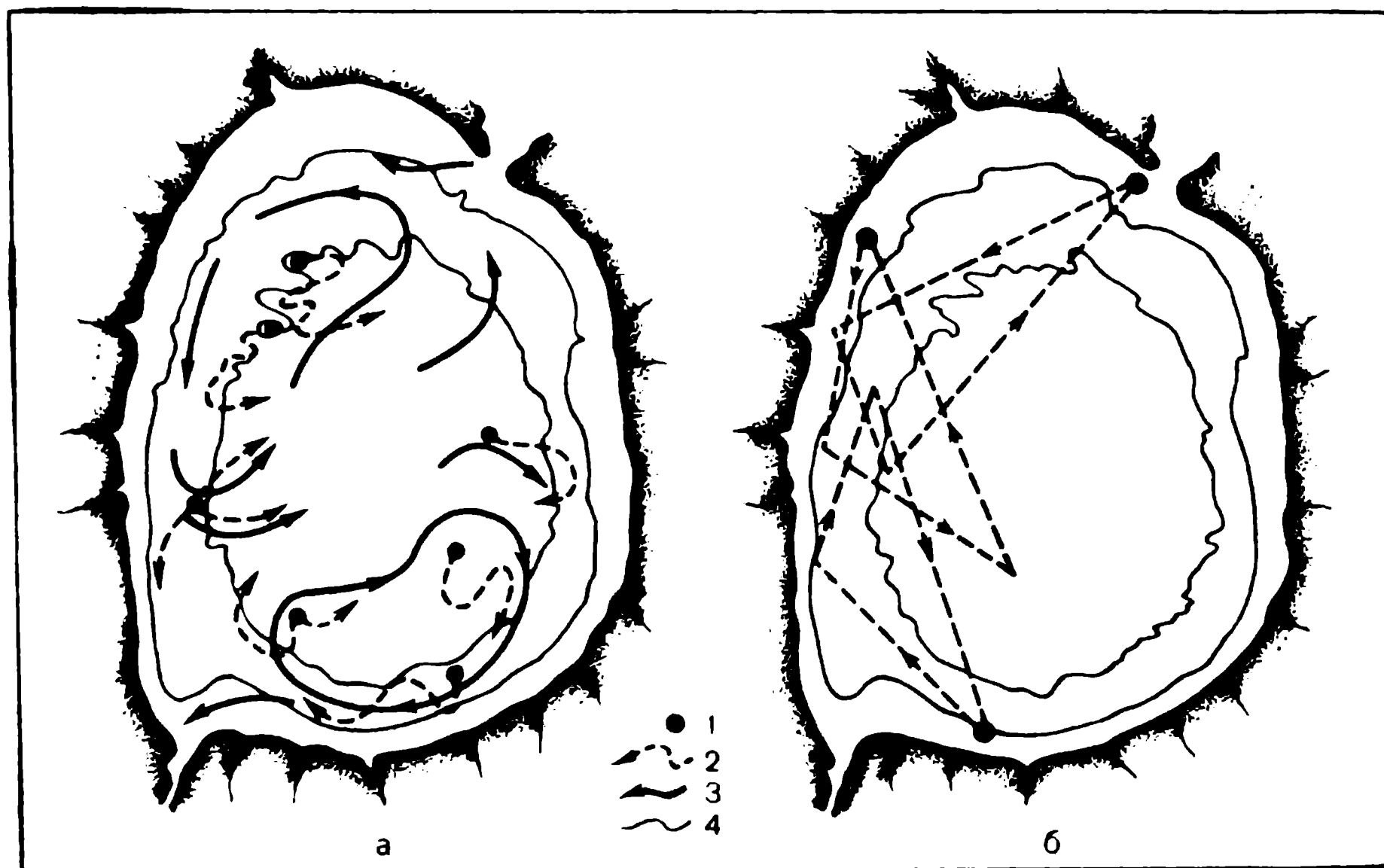


Рис 44 Миграционные циклы (а) и фактический путь (б) судака в Белом озере

1 — места выпуска, 2 — путь рыб, 3 — направление течений, 4 — изобаты.

отсутствует: движение происходит в самых различных направлениях с сохранением одного доминирующего, которое во время нерестовой миграции определяется местом нахождения нерестовых угодий, а во время нагула — распределением и обилием кормовых организмов. Однако здесь можно проследить четкую взаимосвязь перемещений рыб с направлением течений.

Важность роли течений в перемещениях рыб можно показать на примере судака Белого озера [72]. В нагульный период характерны устойчивые скопления этой рыбы вблизи нерестилищ или ее пассивный скат вместе с потоком воды, во время которого направленное движение чередуется с длительными остановками на местах скопления кормовых организмов (рис. 44). Подобная связь между нагульными перемещениями и течениями, в том числе и поверхностными, возникающими под воздействием ветров, отмечена у белого окуня, форели, некоторых морских рыб [162, 200, 238].

### **Скорости и ритмика движения рыб**

Важным фактором для использования в рыболовстве может служить фактическая скорость перемещений рыб. Скорости плавания рыб разделяются на крейсерские, максимальные, бросковые и максимально доступные [90]. Телеметрические наблюдения позволяют изучать только крейсерские и максимальные скорости. Бросковые движения рыбы регистрировать не всегда возможно, так как расстояния (десятки сантиметров-метров), преодолеваемые рыбами в бросках, входят в область погрешности определения местоположения рыбы.

В литературе скорость миграции рыб оценивается обычно по спрямленному расстоянию между точками выпуска и вторичной поимки меченой особи, деленному на время, прошедшее между этими событиями (табл. 4).

Полученную величину часто отождествляют с крейсерской скоростью рыбы, что неверно, так как мигранты практически никогда не перемещаются по прямой линии. Особенно велики различия между расчетной и крейсерской скоростями миграции на участках водоемов со сложным рельефом дна и режимом течений, например в устьях рек. Это связано с отмеченной выше задержкой рыб в устьях для физиологической адаптации. Телеметрические наблюдения показали, что при такой задержке двигательная активность рыб, т. е. фактические скорости их

## Скорости миграций рыб (без учета скорости течения) [48]

Рыба	Район наблюдений	Скорость, км/сут
Открытое море		
Кета	Северная часть Тихого океана	45
Нерка		43—54
Горбуша		36—54
Атлантический лосось	Балтийское море	40—60
То же	Атлантика	до 100
Устья		
Кета	Амура	6—18
Горбуша	»	до 25
Атлантический лосось	рек Англии	до 10
То же	Печоры	9—18
Осетр	Волги	22
Севрюга	»	13
Реки		
Кета	Амур	47
Горбуша	»	48
Семга	Печора	47
Осетр	Волга	до 30
Севрюга	Кура	20

плавания, не ниже, чем в открытом море или реке, а малая скорость движения относительно берега связана с частыми поворотами рыбы и большим непродуктивным путем при возвратно-поступательном движении вместе с приливо-отливными течениями (табл. 5).

Исследования миграций осетровых в реках Дон, Кубань, Волга показали, что они предпочитают встречный поток, скорость которого не превышает 0,5—0,6 м/с для средних и верхних участков и 0,9—1,0 м/с — для низовьев рек. Если скорость встречного течения больше, то рыба обходит его стороной или, если это не представляется возможным, продвигается вверх галсами под углом 40—60° к направлению потока.

Движение рыбы происходит неравномерно. За короткие промежутки времени диапазон развиваемых рыбами скоростей плавания увеличивается по сравнению со среднечасовыми значениями почти в 3 раза (до 3,5 длин тела в секунду). Ускоренное

Таблица 5

## Фактическая скорость движения рыб

Рыба	Длина, м	Район	Период
Осетр [72]	0,8—1,3	Река Волга (Балаково)	Июль—август
Севрюга [78]	0,7—1,2	Река Кубань (низовья)	Май—июнь
Семга [49]	0,5—0,7	Нижне-Тулумское водохранилище (Кольский полуостров)	Июнь
Чавыча [171]	0,6—1,0	Река Колумбия	Август
Белый окунь [162]	—	Озеро Мендота (Висконсин, США)	Май—июнь
Форель [200]	До 0,4	Озеро Йеллоустоун (Вайоминг, США)	Июль—август
Нерка [193]	0,6—0,7	Прибрежье Британской Колумбии	Июль—август
Шэд [143]	—	Эстуарий реки Коннектикут	—
Угорь [241]	0,7—0,8	Прибрежье Северного моря	Сентябрь—ноябрь

## Продолжение

Рыба	Скорость рыб			Скорость течения, м/с
	максимальная, м/с	средняя		
		м/с	км/ч	
Осетр [72]	0,70	0,15	0,54	0,5—0,9
	—	0,33	1,20	0,2—0,3
Севрюга [78]	0,70	0,12	0,40	0,3—0,6
Семга [49]	2,20	0,25	0,90	0,1—0,4
Чавыча [171]	2,00	0,75	2,70	0,15—0,6
Белый окунь [162]	0,20	0,13	0,47	До 0,13
Форель [200]	0,46—0,82	0,23—0,37	0,83—1,32	—
Нерка [193]	1,70	0,46	1,70	До 0,3
Шэд [143]	—	0,60—0,75	2,10—2,70	—
Угорь [241]	0,80	0,34—0,44	1,20—1,60	До 0,3

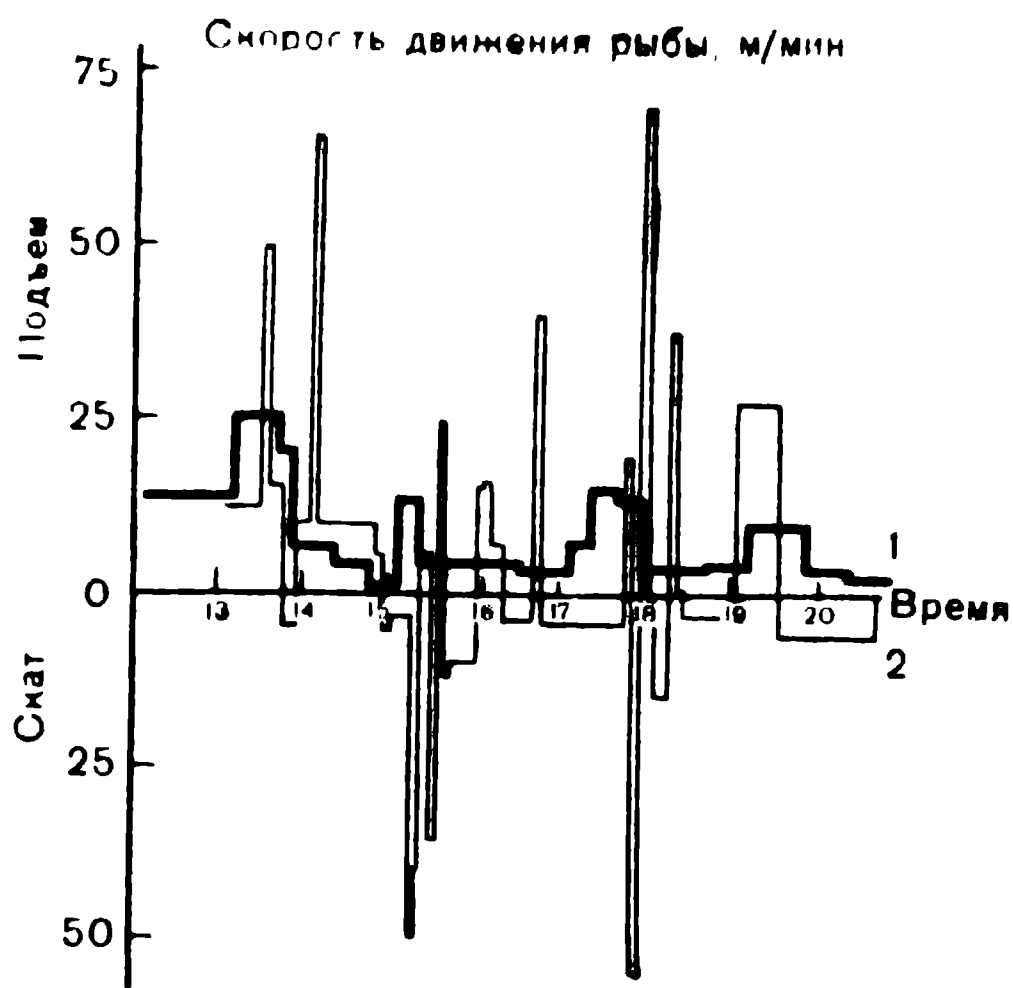


Рис. 45. Скорость осетров в замедленных (1) и ускоренных (2) потоках воды.

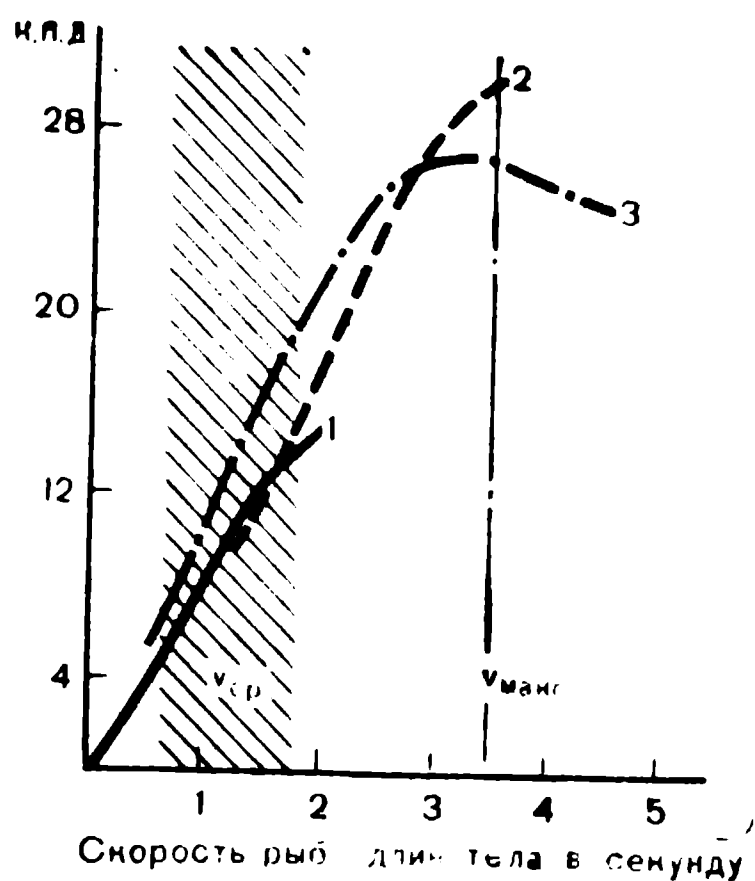


Рис. 46. Изменение к. п. д. при различных скоростях плавания форели (1), хариуса (2) и нерки (3) [55, 260].

движение периодически сменяется замедлением или остановкой. Неравномерность миграционного движения изучена у лососевых, окуневых и осетровых рыб [49, 51, 72, 160, 181]. Длительность периодов быстрого движения у них различна и колеблется от нескольких минут до 1—3 ч. Она определяется в первую очередь скоростью встречного течения: в сильных потоках продолжительность ускоренного движения уменьшается, а замедленного — увеличивается (рис. 45). Фактические скорости рыб увеличиваются по мере возрастания до определенной величины скорости встречного течения (для лососевых — 0,8, осетровых — 0,5—0,6 м/с). При очень высоких скоростях встречного течения возможен снос рыбы. Так, семга при попадании в поток, скорость которого превышает 1—2 м/с, сносится на некоторое расстояние вниз, а затем при подъеме вверх стремится обойти этот поток стороной. Для осетровых этот скоростной порог в ряде случаев может быть и большим.

Следует добавить, что фактические скорости рыб как при ускоренном, так и при замедленном движении в быстрых потоках значительно выше, чем в спокойных участках реки.

Для повышения эффективности плавания у рыб выработан целый комплекс свойств и приспособлений, позволяющих им поддерживать оптимальные скорости плавания при минимальном расходе энергии. Этот механизм имеет особое значение во



время дальних и утомительных миграций [55]. Так, лососевые, не утомляясь, могут длительное время поддерживать скорости, равные трем-четырем длинам тела в секунду [130]. Теоретическим и опытным путем в гидродинамических установках показано [33, 36, 55, 260], что для минимизации расхода энергии мигрирующие лососи должны плыть со скоростями не менее трех длин тела в секунду, при которых к. п. д. наибольший.

Обычно средняя фактическая скорость движения даже у лосося, считающегося хорошим пловцом, находится в пределах 0,47—1,2 длин тела в секунду (табл. 6) и только максимальная скорость соответствует наивысшему к. п. д. (рис. 46). Это связано с необходимостью вынужденных остановок рыб или замедления движения для ориентации. Значительно быстрее и более экономично мигранты плывут в прибрежной части широких рек или озер, где ориентация облегчается близостью берега [200].

Важным показателем миграционного поведения рыб являются суточные ритмы их двигательной активности. В настоящее время установлено, что суточные ритмы жизнедеятельности рыб подчиняются тем же правилам, что и ритмы наземных животных [223]. Суточная цикличность у рыб проявляется во многих процессах жизнедеятельности: дыхании, питании, гормо-

Таблица 6

Скорости миграции семги по Нижне-Тулумскому водохранилищу

Длина рыбы, м	Продолжительность движения, ч	Пройденный путь, км	Фактическая скорость плавания (собственное перемещение плюс преодоление встречного потока), длин тела в секунду <sup>1</sup>	Длина рыбы, м	Продолжительность движения, ч	Пройденный путь, км	Фактическая скорость плавания (собственное перемещение плюс преодоление встречного потока), длин тела в секунду <sup>1</sup>
0,53	5	5,7	0,97	0,55	4	3,85	0,81
0,58	7	5,45	0,71	0,65	17	21,0	0,83
0,8	3	2,55	0,55	0,6	24	20,88	0,73
0,65	5	1,95	0,47	0,75	6	6,3	0,64
0,71	12	20,1	0,9	0,62	2	4,3	1,2

<sup>1</sup> Скорость встречного течения 0,1—0,3 м/с.

нальной деятельности и др. Эта цикличность четко коррелирует с уловами рыбы [116].

При телеметрических исследованиях перемещений рыб суточная периодика их двигательной активности может быть выражена через изменения фактической скорости плавания. Необходимо знать именно фактическую скорость, поскольку скорость движения рыбы относительно берега или дна отражает не только подвижность самой рыбы, но и направленность и скорость водных потоков, в которых она находится и которые могут в значительной степени маскировать собственную ритмику рыбы.

В течение суток скорость движения рыб неодинакова. Прослеживается суточная цикличность возрастных и спадов двигательной активности. У большинства изученных нами видов рыб максимальные скорости движения, в общем отражающие и повышение двигательной активности, приходятся на утренние и вечерние часы, т. е. на моменты перехода от дневной освещенности к ночной, и наоборот. Например, семга в условиях полярного дня (в июле) в ночные часы не прекращает миграции, в то время как в августе с наступлением сумерек она замедляет подъем, а часто вообще останавливается, прерывая миграцию до восхода солнца. Осетры в реке и водохранилище проявляют повышенную активность в утренние (4—7), вечерние (19—21) и реже в дневные (11—13) часы. Примерно то же отмечается и для туводных рыб. Лещ и щука проявляют повышенную активность утром, вечером и в полдень, судак — через 0,5—1 ч после восхода и за 1—2 ч до захода солнца. Чавыча и нерка также после захода замедляют свое движение [171]. Некоторые рыбы наиболее активны только в ночное время (налим), другие — круглые сутки (карась).

На рис. 47 представлены суточные вариации скоростей плавания некоторых видов рыб, прослеженных с помощью ультразвуковых передатчиков [47, 72, 78].

Фактором, определяющим и синхронизирующим суточные ритмы жизнедеятельности животных, в том числе и рыб, являются суточные изменения освещенности при сменах дня и ночи. Показано, что освещенность является сигнальным фактором вертикальных миграций [27], стаеобразования [85], периодичности пищевых и оборонительных реакций [98]. Важную роль играла освещенность и в образовании суточных ритмов двигательной активности рыб.

Суточные ритмы двигательной активности рыб, сохраняя видовую специфику, могут в значительной степени изменяться в зависимости от физиологических особенностей организма (пола, состояния гонад, степени накормленности) и под воздействием

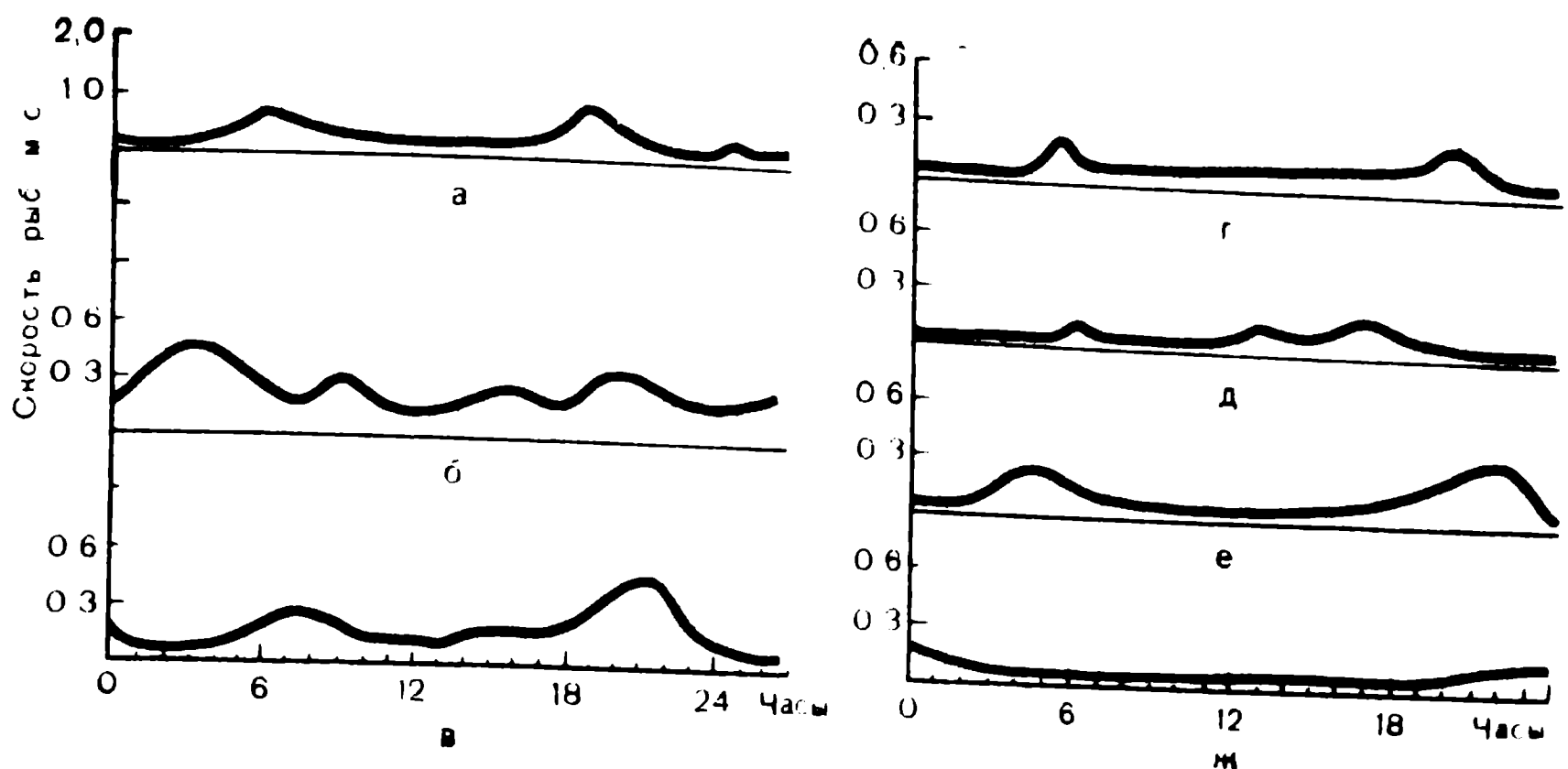


Рис. 47. Суточные ритмы двигательной активности семги (а), осетра (б), севрюги (в), щуки (г), леща (д), судака (е) и налима (ж)

внешних условий. Например, у полосатого окуня перед нерестом не проявляется суточная цикличность активности, а отнерестившиеся самки более подвижны в ночное время [181].

В лабораторных условиях показано, что у голодных тунцов суточный ритм скорости плавания нарушается [195].

При полевых исследованиях активности рыб следует учитывать периодичность появления и изменения скорости течений, например приливо-отливных в прибрежье моря или импульсных на участках реки ниже гидроузлов, вызванных неравномерностью их работы. Эти изменения существенно искажают ритмы суточной двигательной активности рыб.

Температура воды не вызывает изменения суточного ритма двигательной активности, но заметно отражается на его амплитуде. Например, скорость судака во время нерестовой миграции при резком похолодании уменьшается в несколько раз.

Суточная цикличность активности рыб в значительной степени зависит от сезона [214], что связано с изменением фотопериода и, возможно, температуры. В соответствии с сезонными изменениями времени восхода и захода солнца изменяются и периоды максимальной активности (рис. 48).

Из изложенного очевидно, что с помощью стандартных биотелеметрических наблюдений только за тремя аспектами поведения мигрирующих рыб можно получить чрезвычайно важную информацию, позволяющую более рационально и эффективно производить промысловый лов в любом водоеме.

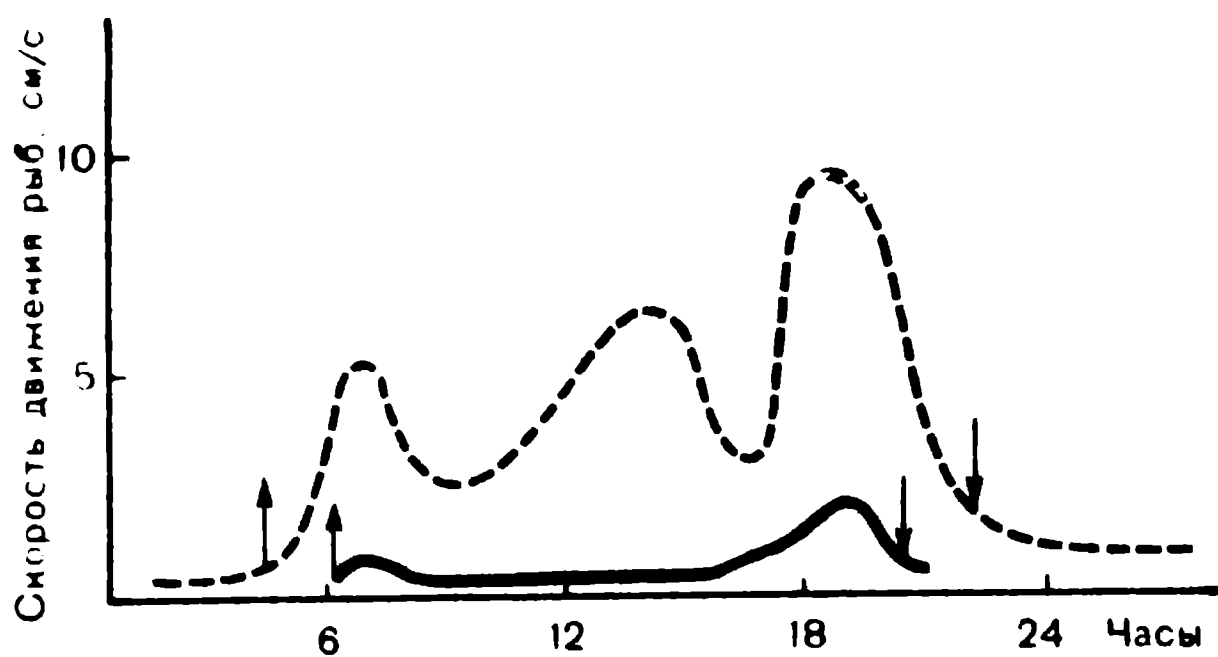


Рис. 48. Суточный ритм двигательной активности леща летом (пунктир) и зимой (сплошная линия). Стрелками указано время восхода и захода солнца.

Применение ультразвуковых передатчиков может оказать существенную помощь при разработке способов прицельного лова стайных рыб. Известно, что в условиях эксперимента стайные рыбы, выпущенные по отдельности, стремятся как можно быстрее сгруппироваться или присоединиться к близрасположенной стае [85]. Этот эффект проверен в естественных водоемах и показал, что меченая особь при встрече со стаей рыб своего вида присоединяется к ней и в дальнейшем ее поведение отражает поведение всей стаи. Ультразвуковые передатчики при этом не являются помехой. Х. Юэн [256] четко продемонстрировал проявление стайного эффекта на пелагидах, несущих передатчики. После выпуска эти рыбы присоединились к стае, которая регистрировалась рыбопоисковыми приборами. При наших наблюдениях в прудах такое же поведение отмечалось у леща и синца.

Регулярный выпуск в районе лова меченых рыб позволит постоянно держать под наблюдением перемещения скоплений и сократит время их поиска, поскольку дальность действия серийных передатчиков уже сейчас позволяет осуществлять контроль за рыбой с расстояния в несколько километров. Это значительно расширяет и возможности использования рыбопоисковых приборов, дальность действия которых в горизонтальном режиме не превышает нескольких сотен метров. В принципе локализация скоплений по сигналам рыб, меченных передатчиками длительного действия, может быть осуществлена и автоматическими гидроакустическими буями [82] без применения специальных береговых станций слежения или судов-спутников.

Ультразвуковые передатчики можно также применять для определения дальности действия на рыб искусственных раздражителей, предназначенных для их привлечения или отпугивания. Так, нами была проведена серия экспериментов по оценке

влияния упругих волн на перемещения рыб. Применение ультразвуковых передатчиков, а на мелководных участках и простых поплавков, прикрепленных к рыбе с помощью нити и крючка, позволило выявить дальность реагирования рыб на взрывные импульсы разной мощности, определить возможность использования этих взрывов в качестве отпугивающих раздражителей [65].

Как уже отмечалось, использование обычной аппаратуры при детализации поведения меченой рыбы ограничено из-за необходимости вести наблюдения на небольшом расстоянии от нее. Увеличение расстояния приводит к тому, что погрешность в вычислении местоположения меченой рыбы перекрывает возможный диапазон ее двигательных реакций на локальный раздражитель.

Более перспективно в этом отношении совмещение гидроакустических рыбопоисковых приборов с передатчиками-метками, частота сигналов которых синхронизирована с частотой приемника. В этом случае представляется возможность детализировать перемещения меченой рыбы относительно любых подводных объектов, в том числе и орудий лова, на значительном расстоянии. Впервые такие передатчики были использованы в комплексе со сканирующим сонаром, имевшим разрешающую способность 7,5 см при дальности действия до 366 м [153]. Исследователи получили возможность непосредственно на эходиаграммной ленте или экране осциллографа сонара одновременно «видеть» все перемещения меченой рыбы, окружающие ее предметы и живые объекты. Опыты по слежению за камбалой, проведенные с помощью этой аппаратуры, показали, что точность определения местоположения рыбы относительно дна весьма высока и составляет десятые доли метра. Было впервые установлено, что камбала в ночное время поднимается над дном на высоту до 2—6,7 м, что должно соответствующим образом учитываться при ее промысле.

### **Особенности поведения рыб во время размножения, нагула и зимовки**

Знания перемещений и поведения рыб на ограниченных участках акватории необходимы для качественного выполнения многих работ по интенсификации естественного воспроизводства рыб и их искусственному разведению. Биотелеметрия в этом аспекте может быть применена и уже применяется при детализации поведения рыб на нерестовых участках, нагульных биотопах и в местах зимовальных скоплений.

В течение трех сезонов (апрель — май 1971—1973 гг.) нами изучались перемещения судака в нерестовых притоках. Оказалось, что производители четко распределяются по нерестилищам: одни особи остаются в нижней части притока, другие мигрируют дальше, вплоть до верховьев. Постепенно мигрирующая стая меченых рыб заполняет все нерестовые участки. После прекращения миграции судак не сразу выбирает место для окончательной остановки, т. е. свой нерестовый участок. Длительное время, обычно более суток, он перемещается в прирусловой или прибрежной зоне, то поднимаясь вверх, то скатываясь и переходя от одного берега к другому (рис. 49). Длина поискового участка составляет 0,2—0,5 км по длине реки, скорость поискового движения 0,03—0,05 м/с. При этом, как и во время миграции, судак наиболее активен в утренние и вечерние часы. Как показало обследование, поиск ведется на биотопе песчано-галечных грунтов с большим количеством затопленных пней.

Ввиду того что передатчики-метки работали в среднем только около трех суток, полное время пребывания рыбы на нерестилищах не удалось выяснить. Ясно, однако, что оно составляет не менее двух суток. Известно, что между продолжительностью нереста судака и температурой воды существует высокая отрицательная корреляция [87]. Как показали телеметрические наблюдения, это связано прежде всего со снижением двигательной активности рыбы. Резкие похолодания вызывают замедление миграции, скат производителей с прибрежных участков на русло и даже в низовья притока. Так, в один из дней мая в результате сильного снегопада температура воды за сутки понизилась на 2,5°. Меченые судаки, уйдя на русло или в низовья, оставались там вплоть до очередного потепления, не делая никаких заметных попыток к перемещению вверх.

При температуре выше 10°С судак активен при различных погодных условиях независимо от облачности, направления и силы ветра, величины атмосферного давления. Следовательно, наиболее важным и, возможно, единственным фактором, регулирующим активность его движения в нерестовых притоках, является температура воды.

Для документации нагульных перемещений рыб с помощью биотелеметрических методов, естественно, следует исходить из того, что процесс мечения и передатчики-метки не оказывают существенного влияния на питание подопытных особей. В противном случае поведение будет отражать не пищевые реакции рыб, а скорее приспособительные — на появление незнакомого раздражителя (метки).

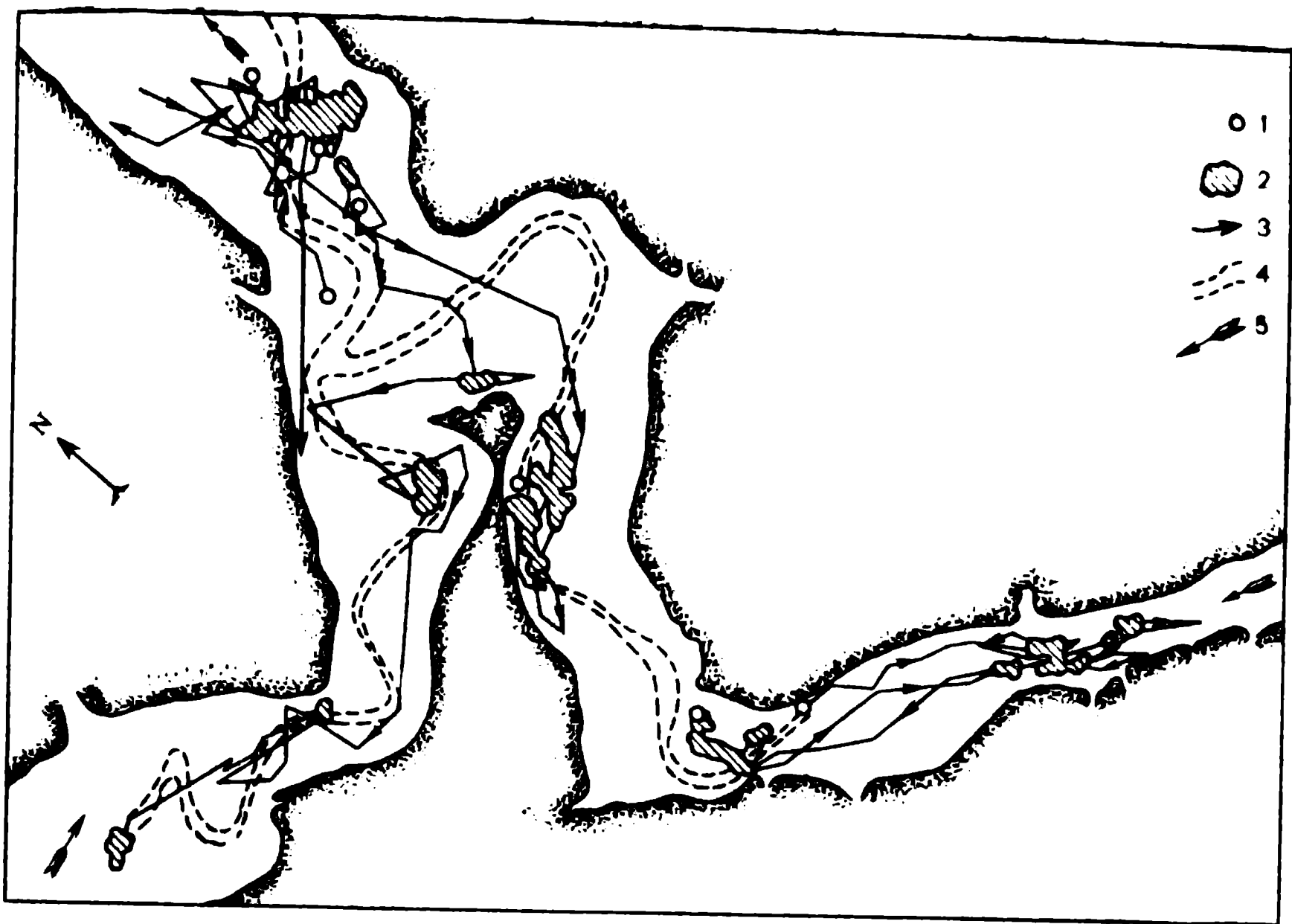


Рис. 49. Перемещение судака в нерестовом притоке:

1 — место выпуска; 2 — места длительного пребывания; 3 — путь рыб; 4 — русло; 5 — направление течений.

Наблюдения в прудах за лещами, мечеными внешними передатчиками, показали, что время возобновления питания меченых рыб скорее зависит не от наличия меток, а от длительности мечения, которое проводилось без анестезии. При быстром, без травмирования мечении лещи уже на второй день после выпуска начинали питаться. При этом в группе меченые особи быстрее возобновляли питание, чем одиночные рыбы. В Рыбинском водохранилище вторично пойманные на второй-третий день после выпуска меченые щука и лещ имели наполненные желудки. Нормально питаются и рыбы с внутренними желудочными метками. Об этом говорят данные вскрытия вторично пойманных окуней, меченных передатчиками этого типа [165].

Летом 1967—1969 гг. нами изучалось поведение рыб в притоках Рыбинского водохранилища во время нагула [45, 47, 72]. Предварительные обловы показали, что он населен обычными представителями ихтиофауны данного водоема: лещом, плотвой, щукой, налимом, судаком, окунем, густерой, уклейей, ершом. Прибрежные участки здесь мелководны и покрыты водной растительностью. Бывшие русла рек извилисты, имеют ширину 30—40 м при общей ширине притока 200—500 м.



Наблюдения за судаком показали, что он перемещается только в русловых участках. После выпуска меченая рыба по несколько часов может оставаться на месте, а затем начинает тот или иной тип движения. Эта пауза, вероятно, объясняется влиянием процесса мечения. Протяженность участка суточных нагульных перемещений особи 400—1000 м. Рыба обычно придерживается основного русла притока, не выходя на углубления дна поймы (рис. 50).

Щука в отличие от судака значительно меньше времени проводит на русловых участках реки. Отмечались частые ее выходы на мелководные участки, заросшие водной растительностью. Выпущенная на мелководье рыба обычно не сразу уходила с места выпуска, а длительное время перемещалась неподалеку от него. Уход щуки на русла отмечался только при сильном ветре. Длительное прослеживание показало, что щука чувствует приближение смены южного ветра на западный или северный и усиление ветра до 4—5 баллов. Так, две особи за 6 и 9 ч до смены направления ветра ушли с мелководья на русло, а две другие покинули мелководье за несколько часов до усиления западного ветра с 2 до 5 баллов. Для дополнительной проверки были поставлены сети вдоль русла. Почти за сутки до смены южного ветра на северный попадание в сети было только со стороны мелководья. Как только ветер стих, в сети со стороны русла попались две меченых щуки, направлявшиеся на мелководье. При северном ветре 4—5 баллов образуется волна высотой до 0,5 м. Вероятно, это и является причиной ухода рыб на глубину. Известно [69], что подобный уход характерен и для крупных мирных рыб.

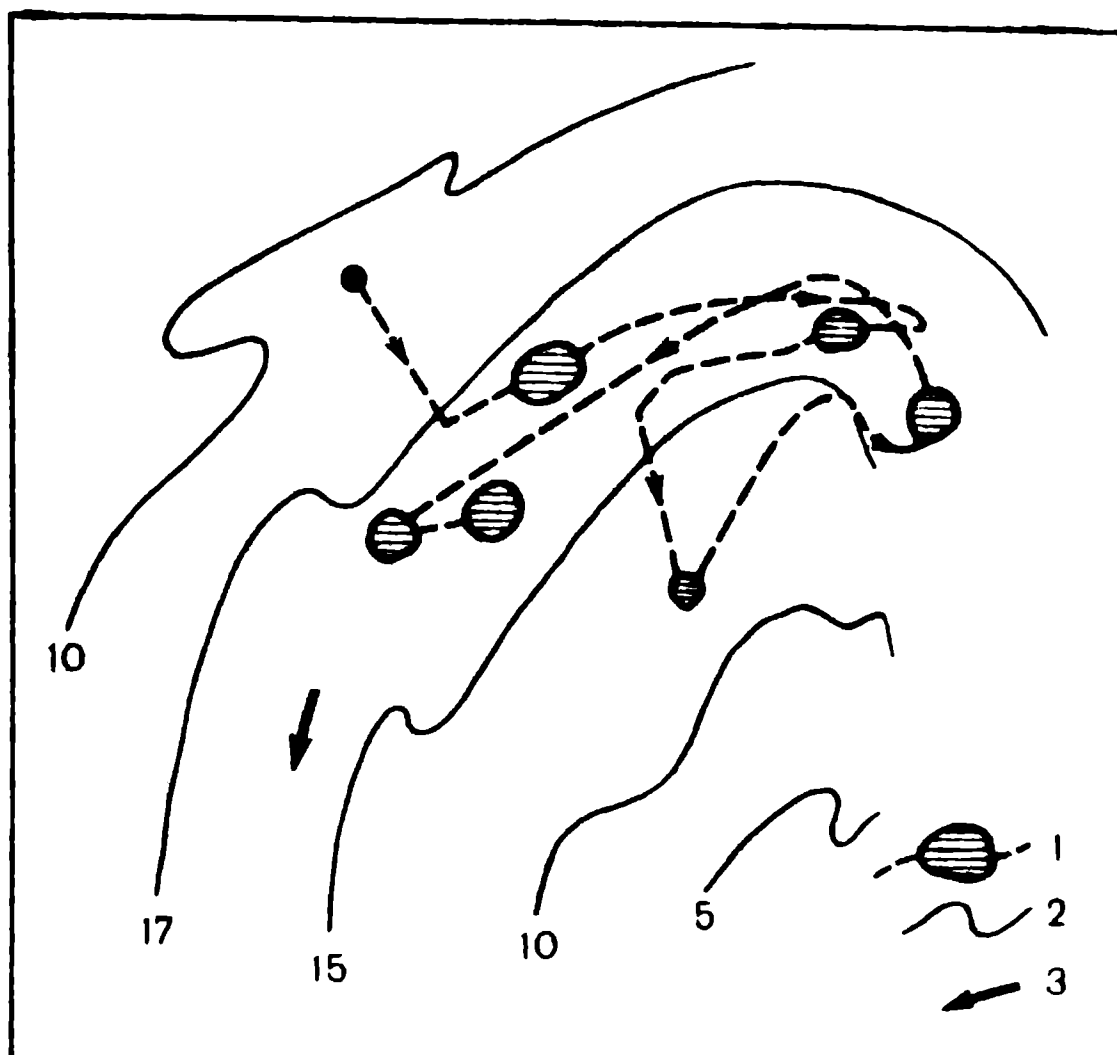
Нагульные участки щуки в реках вблизи русел были в 2—3 раза меньшими по площади, чем в водохранилище, а в целом они нигде не превышали 20 тыс. м<sup>2</sup>.

У щуки отмечались три максимума двигательной активности: вечерний, дневной и утренний. Дневной пик значительно меньше утреннего и вечернего и приходится на полуденные часы. Ночью активность минимальна, особенно при большой облачности. В лунные ночи иногда отмечалось небольшое увеличение активности.

Поведение леща изучали как с помощью меток Гильберта, так и с помощью ультразвуковых передатчиков. Рыб для мечения отлавливали тралом на участках русел, где концентрировалась основная масса особей местного стада леща. Меченых рыб выпускали в месте первичной поимки. Повторные и контрольные траления производились через каждые 12 ч в трех точках: в месте первичной поимки, на 1 км ниже его и на 1 км

Рис. 50. Нагульные перемещения судака в Рыбинском водохранилище:

1 — путь рыб и места их длительной задержки; 2 — изобаты; 3 — направление течений.



выше. Повторно было поймано 28 меченых лещей (9,5% от числа выпущенных). Пять меченых рыб вернули местные рыбаки.

Распределение вторично пойманных рыб показало, что в районе выпуска было поймано наибольшее число меченых рыб (68%). Это говорит о том, что для значительной части особей участок отлова являлся основным пастбищем.

Ультразвуковое прослеживание позволило детализировать перемещения леща. Оказалось, что рыба придерживается не только русловых участков, но и часто выходит на прилегающую к ним затопленную пойму, перемещаясь там сутки-двое со скоростью 1—2 м/мин. Участок, на котором происходили перемещения леща в устье притока, не превышал в длину 100 м, а выше по течению был еще меньшим. Лещи так же, как и щуки, за 8—10 ч до усиления ветра покидали мелководье. Продолжительность их пребывания на прибрежных мелководьях определяется степенью защищенности участка от ветровых воздействий.

Осенью лещ редко выходил на мелководную пойму и задерживался там непродолжительное время. Участок, занимаемый рыбой в это время, в 4—5 раз больше, чем летом. Это, видимо, объясняется сменой типа поведения — нагульного на предзимовальную миграцию, так как уже в конце сентября отдельные особи леща после мечения уходили из реки в открытое водохранилище на места зимовки.

Опыты с кольцевыми сетями показали, что нагульные перемещения рыб на пастбище площадью 4,4 га четко разделяются на три фазы: подход в район нагула, замедленное сложное движение в пределах кормового биотопа, уход после окончания питания [74, 75], в то время как устойчивость нагульных скоплений определяется обилием кормовой базы и состоянием погоды.

В небольших озерах Англии, являющихся местами нагула форели, изучали ее поведение [166, 254]. Активность рыб регистрировали по посещаемости ими в пяти интервалах времени отдельных квадратов ( $25 \times 25 \text{ м}^2$ ), на которые был разбит весь район исследования. Такая регистрация позволяла рассчитать среднюю и максимальную скорости рыб, при этом центры квадратов принимали за точку нахождения рыбы, а пройденное расстояние — за прямую линию между центрами. Ошибка в расчетах скорости даже на небольшом водоеме при этом может составлять до 15%.

В отдельных случаях расположение рыбы, меченной передатчиком, относительно катера определяли по вектору, т. е. по углу направляемой антенны и дальности рыбы от судна, вычисленной по силе приходящего на приемные устройства сигнала. Для этого непосредственно в местах исследования предварительно проводили калибровку силы сигнала в зависимости от расстояния. Было показано, что рыбы чаще всего выбирали участки озера с каменистым дном, где концентрировались рачки *Asellus* sp., которыми форели в это время питались. В целом форель не перемещалась беспорядочно по всему водоему, а занимала вполне определенные участки. Постепенно, вероятно, по мере выедания кормовых объектов, форель переходила на соседние участки (рис. 51).

При искусственном смещении с места первичной поимки рыбы перемещаются в большем диапазоне, чем выпущенные в месте поимки. Наличие у рыб четко локализованных нагульных участков подтверждают и исследования Б. Шеферда [225]. Он успешно сочетал телеметрические методы с простым мечением и визуальными подводными наблюдениями аквалангистов. Работы проводились на одном из малых озер (площадью 1,65 га) на побережье Британской Колумбии (Канада), где изучались нагульные перемещения форели Кларка в разные сезоны года. За рыбами, мечеными простыми метками, визуально наблюдали аквалангисты во время проплывов на глубинах 1—3 м в дневные часы 2 раза в неделю, а за 13 рыбами, мечеными ультразвуковыми передатчиками, велись дискретные (через каждые 5 мин) наблюдения, продолжавшиеся 48 ч. Ви-



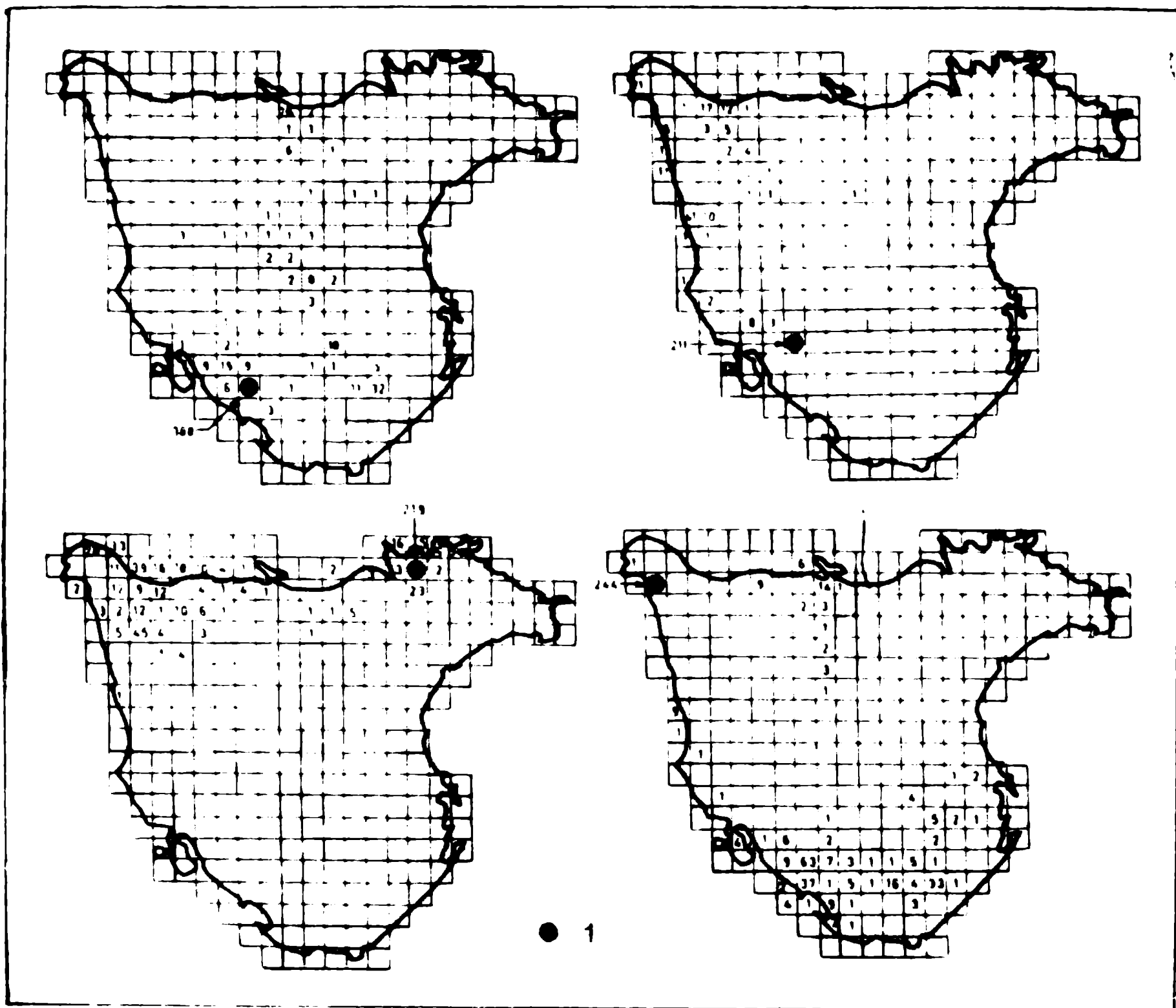


Рис. 52. Длительность пребывания меченой форели на различных участках озера. Интервал времени 5 мин [225]:  
1 — места основного обитания рыбы.

ратурой, близкой к  $10^{\circ}\text{C}$ . В озере такая температура, как видно из рис. 53, отмечалась только на глубинах около 20 м.

Строгая локализация в период нагула характерна и для некоторых морских рыб. В одном из узких заливов Шотландии на полигоне длиной примерно 600 м с глубинами 5—20 м исследовали поведение двух особей трески в течение пяти и восьми дней [164]. Пространственные перемещения обеих рыб были довольно ограничены. В ночное время, когда двигательная активность трески повышена, район ее перемещений больше, чем днем. Наблюдения за вертикальными перемещениями трески показали, что она придерживается придонных слоев воды [233].

Небольшой цикл наблюдений с помощью ультразвуковых передатчиков нами проводился в зимнее время. Приемная аппаратура располагалась на вездеходах, что позволяло быстро ме-

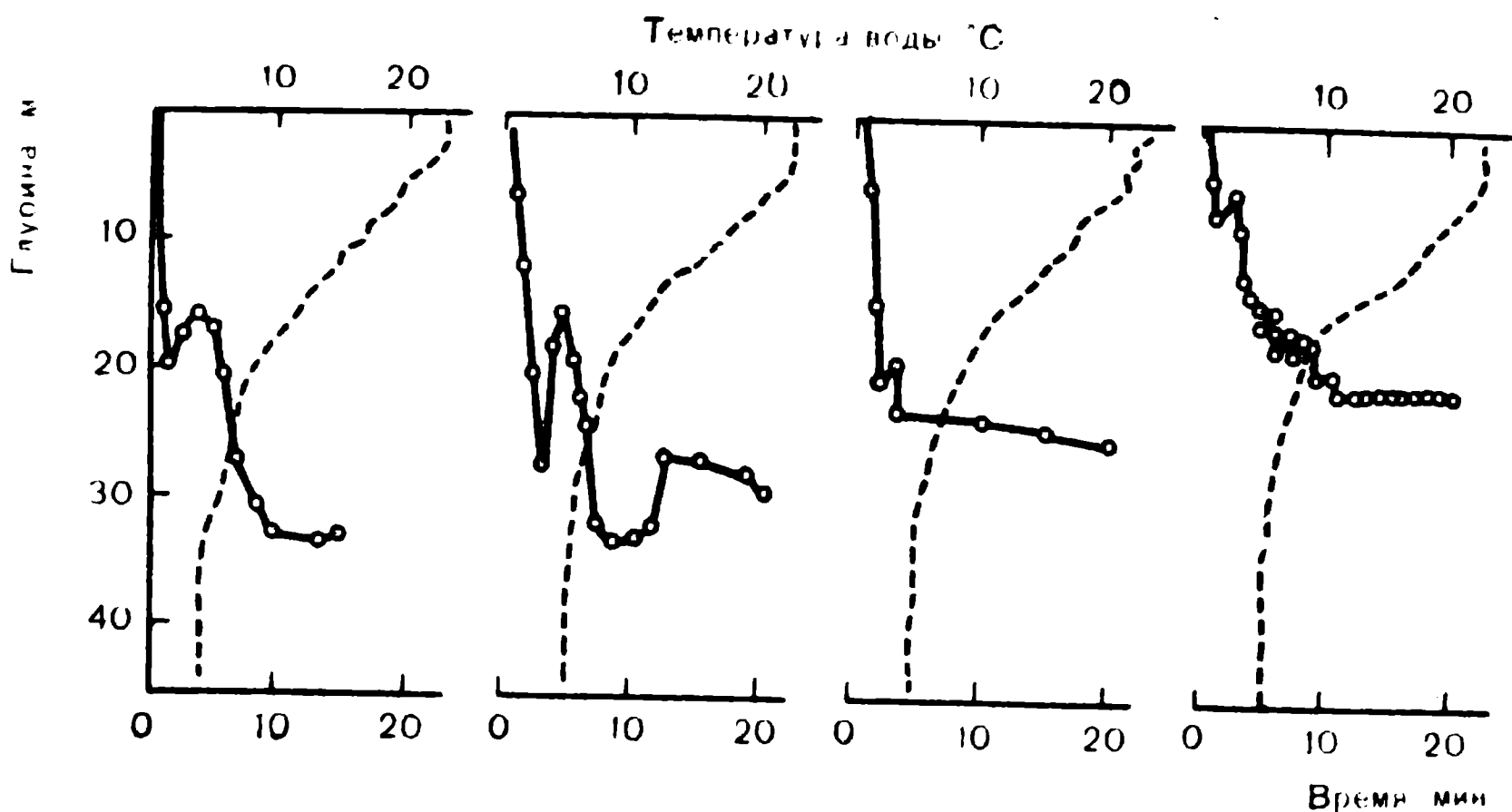


Рис. 53. Глубина погружения рыбы и температура воды (пунктирная линия) [172].

нять ее местоположение. Приемные антенны были опущены в воду через проруби. Пеленгация рыбы на льду легко осуществляется триангуляционным методом. Было обнаружено, что зимой рыба совершает очень небольшие перемещения. Так, лещ за двое суток смещался с места выпуска на расстояние не более 150—200 м, большую часть времени неподвижно проводя на одном месте. Наиболее интенсивные подвижки отмечались утром и вечером, т. е. суточный ритм двигательной активности, как и летом, соответствовал суточному ходу освещенности. Более интенсивные перемещения зимой происходили у щуки, которая за сутки преодолевала 1—3 км, придерживаясь средних слоев воды. Была обнаружена интересная особенность вертикальных перемещений щуки: рыба за несколько секунд меняла глубину на 2—5 м без горизонтального перемещения, всплывая или, наоборот, погружаясь.

Исследования местных перемещений рыб на ограниченных участках естественных водоемов, несмотря на пока еще сравнительно небольшой объем собранной информации, показывают принципиальную возможность введения биотелеметрического контроля и в практику прудового рыборазведения.

Культивирование подразумевает выращивание товарной рыбы и посадочного материала при очень высоких плотностях посадки на единицу объема бассейнов, садков или прудов. Например, подращивание личинок карпа в лотках производят при плотности посадки до 100 тыс. шт. в 1 м<sup>3</sup> воды, а товарной рыбы в прудах — до 2 шт./м<sup>2</sup> акватории пруда. Высокая степень

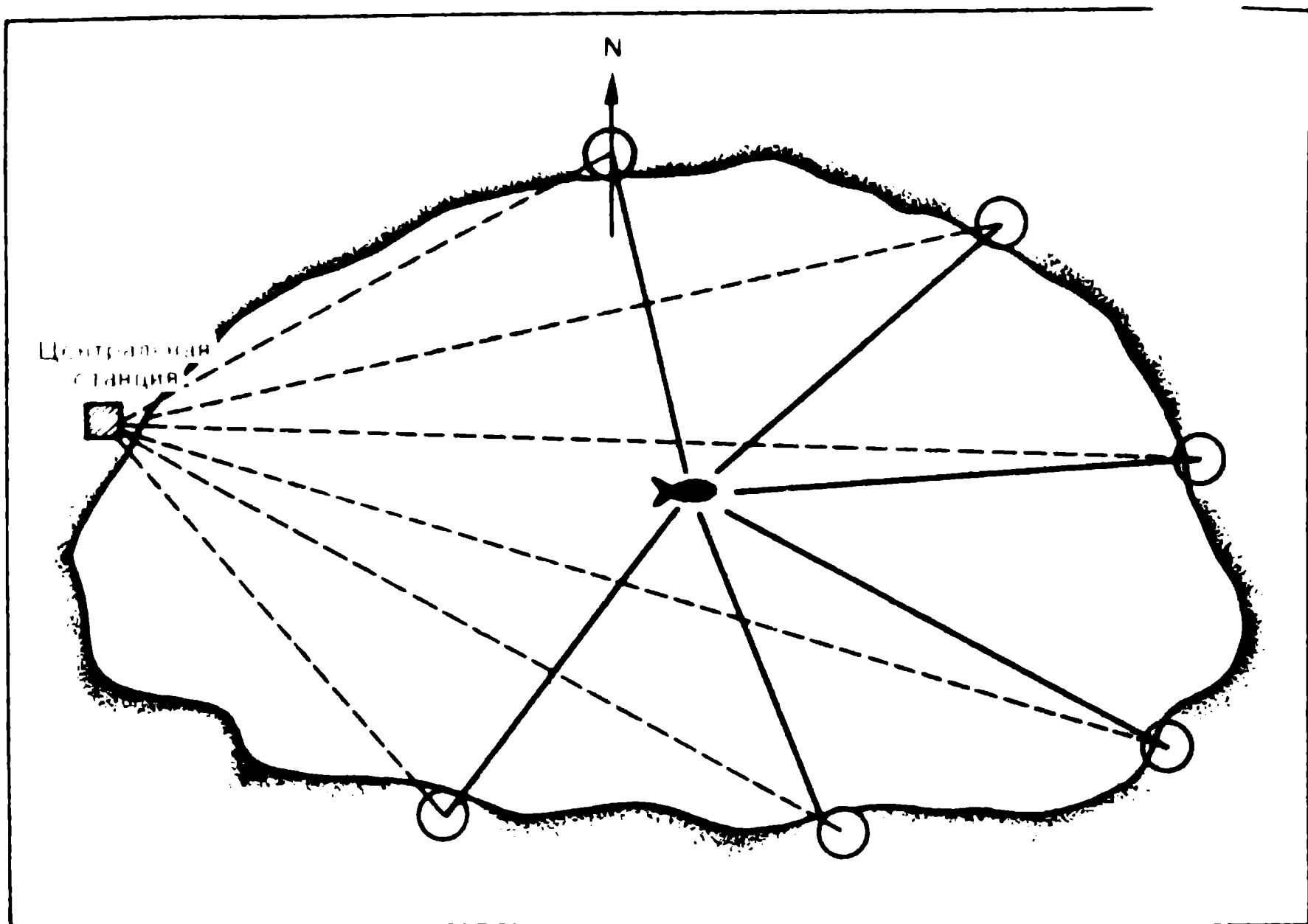


Рис. 54. Схема станций наблюдения за поведением рыб в небольших водоемах [127].

интенсификации рыбоводства настоятельно требует знаний не только о кормовых ресурсах водоема, его гидрохимии и гидробиологии, но и о поведении рыбы в столь необычных для нее условиях. Визуальные наблюдения за поведением рыб в рыбоводных водоемах крайне затруднены из-за низкой прозрачности воды (порядка 10—40 см). В водоемах с повышенным содержанием лессовидных частиц или в сильно окрашенной воде болотного происхождения такие наблюдения практически безрезультатны.

Биотелеметрические методы позволяют регистрировать основные поведенческие акты выращиваемой рыбы, установить участки локализации особей в периоды активного питания и переживания неблагоприятных условий и выявить комплекс гидродинамических, химических и акустических факторов, способствующих оптимальному выживанию и росту рыб.

Наиболее применимы в прудовых условиях метки-радиопередатчики. Благодаря своим небольшим размерам [127] они могут быть установлены даже на сеголетках. Контроль за перемещениями особей ведется системой одновременно работающих



приемных станций, передающих информацию о местоположении меченых особей на центральную станцию, где эта информация быстро анализируется и данные наносятся на карту (рис. 54). С помощью подводной аппаратуры достигается очень высокая точность пеленгации меченой рыбы, позволяющая с расстояния 100—200 м регистрировать ее подвижки на 1—2 м. По поведению меченых особей можно, как уже отмечалось, судить о перемещениях стай, в которые эти особи входят, т. е. анализировать групповое поведение выращиваемой рыбы в водоеме в зависимости от задаваемых условий.

Широкое применение в рыбоводных целях находят информационные передатчики частоты дыхания, электрокардиограммы, электроэнцефалограммы и температуры тела или разности температур окружающей воды и тела рыбы [174, 184, 261].

Однако использование телеметрии в рыбоводстве еще только начинается и требует глубоких теоретических, технических и методических исследований.

### **Поведение рыб в зоне орудий лова**

Первые наблюдения за поведением меченых ультразвуковыми передатчиками рыб в районе ставных сетей были проведены на Рыбинском водохранилище в 1965—1968 гг. [45].

Меченых лещей и щук выпускали в район водоема с глубинами 3—6 м, окруженный от поверхности до дна высокостенной кольцевой сетью. Лещ после выпуска уходил в наиболее глубокие места, где длительное время находился почти без движения. К вечеру рыба активизировалась и делала попытки выйти из окольцованного сетью участка. Леши подходили к сети и длительное время следовали вдоль нее (рис. 55).

В ночное время активность рыбы вновь уменьшалась и подход к сетям отмечался редко. Более активная реакция на сеть отмечалась у щуки, которая около 4 ч плавала вдоль нее, отыскивая проход, пока не объячилась при попытке броском преодолеть верхнюю подбору.

Для уточнения расстояния, с которого рыба замечает сеть и реагирует на нее, в безветренную погоду на окруженном сетью участке площадью 4,4 га было произведено точное триангуляционное определение траекторий движения щуки. Оказалось, что минимальное расстояние между сетью и плывущей вдоль нее рыбой днем и вечером составляло около 1 м, а ночью — 10—50 см.

Расстояние, с которого рыба начинает реагировать на сеть, определяется дальностью видения, а это зависит от условий

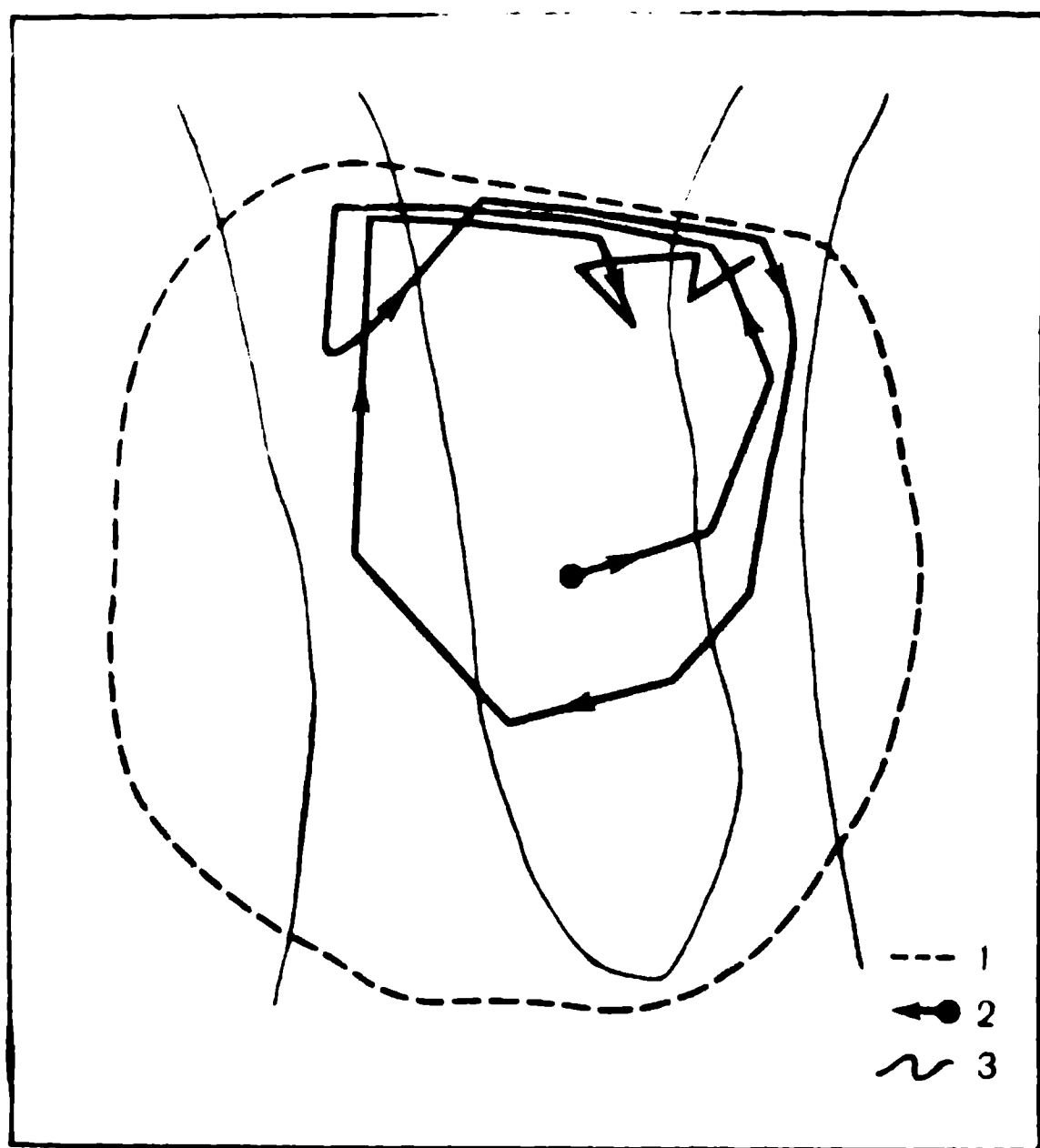


Рис. 55. Перемещения  
леща в районе кольце-  
вой сети:

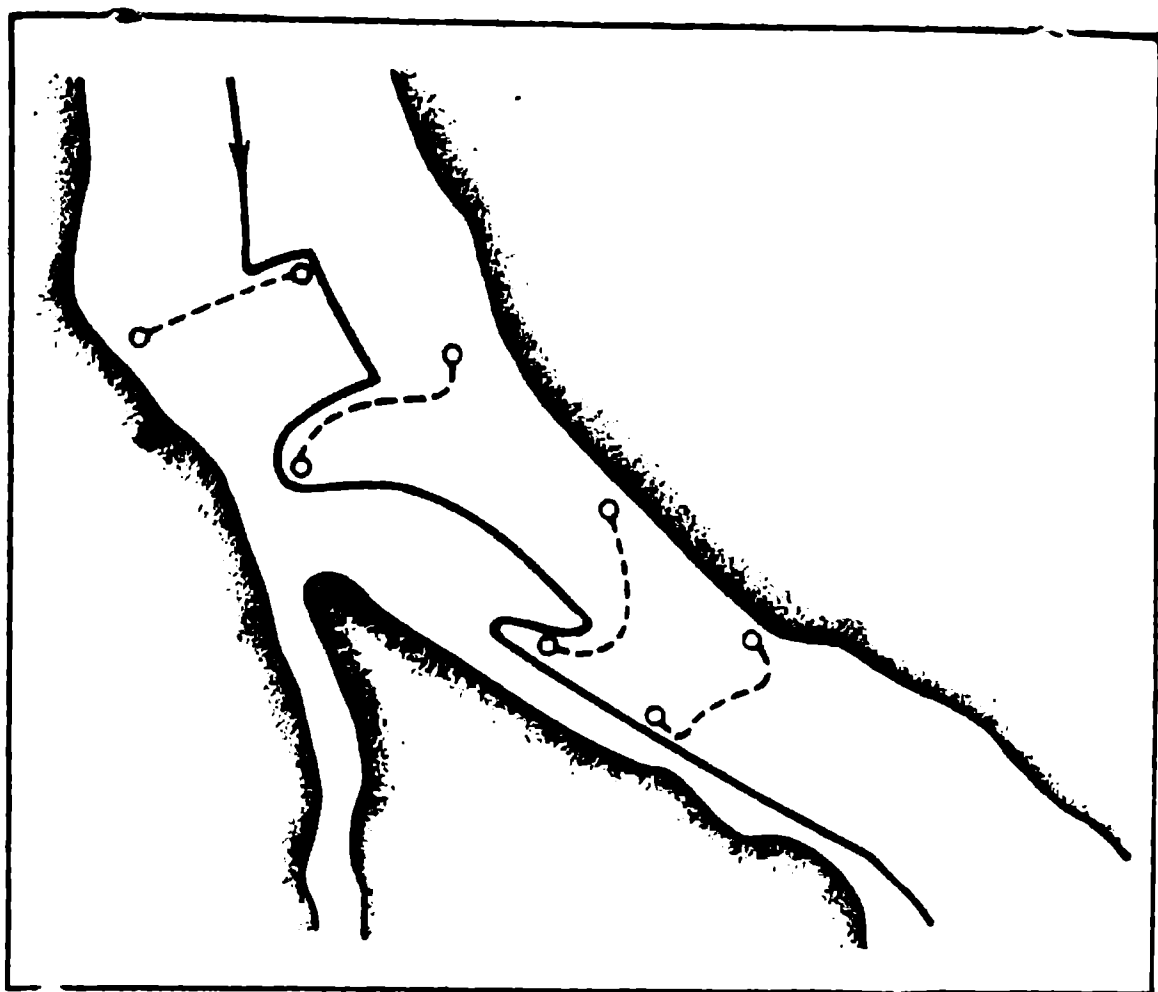
1 — сеть; 2 — путь рыбы;  
3 — изобаты.

освещенности и прозрачности воды. В районе наших работ прозрачность по диску Секки составляла 1,35 см. Освещенность на глубине 3 м, замеренная с помощью подводного люксометра, была в дневное время около 500 лк, в момент захода и восхода солнца — 1—2 лк.

Таким образом, рыба с расстояния 1 м может различать сеть визуально при освещенностях до 1 лк. В ночное время освещенность на поверхности воды очень мала (в безлунную ночь 0,0003 лк) [95], поэтому вполне вероятно, что ночью рыба чувствует сеть тактильно, особенно в штилевую погоду при отсутствии течений, когда отсутствуют гидродинамические колебания сетного полотна.

В. Леджет и Р. Джонес [185] проводили подобные опыты с шэд. Слежение осуществлялось с судна, следовавшего вблизи от рыбы с меткой с ее скоростью. Положение рыбы определяли по величине сигнала, поступающего на приемные устройства. Когда судно проходило над рыбой, сигнал увеличивался до максимума, а направление антенн на рыбу менялось на  $180^\circ$  — устанавливалось наиболее точное местоположение рыбы, хотя при этом возникал риск нарушить нормальное движение рыбы, реагирующей на шум двигателя и тень от судна.

Рис. 56. Перемещения шэд (сплошная линия) в районе постановки ставных сетей (пунктирная линия) [185].



Из 49 наблюдений за поведением рыбы вблизи сетей в 42 случаях отмечалось четкое избегание рыбой сети, семь рыб прошли сбоку, сверху или снизу от сетей. Шэд, мигрируя вверх по реке и встречая на своем пути сеть, за 0,5—1 м от нее резко сворачивала в сторону, огибала орудие лова и затем продолжала дальнейшую миграцию по ранее взятому направлению (рис. 56). Эта же реакция четко проявлялась в наших опытах на толстолобиках, выращенных в прудах, а затем выпущенных с передатчиками в облавливаемый сетями залив. Часто рыбы исследовали преграду, проплывая вдоль нее от одного края к другому. Но всегда, достигнув сети, они следовали на расстоянии 0,5—1 м от нее как днем, так и ночью. В редких случаях реакция на сеть может проявляться в виде резкого поворота рыбы назад. Таким образом, шэд способна хорошо воспринимать сеть на расстоянии около 1 м и избегать попадания в нее.

По всей вероятности, днем сети рыбой обнаруживались визуально, тем более, что и прозрачность воды по диску Секки в реке Коннектикут, где проводились опыты, варьирует в диапазоне 1—2 м. Интересно, что шэд и ночью воспринимала сети на таком же расстоянии, как и днем.

Оценивая освещенность на поверхности воды и затухание света в воде, В. Леджет и Р. Джонес [185] показали, что рыбы чувствуют сеть на глубине 2 м при освещенности  $5,4 \times 10^{-5}$  лк, тогда как для визуального восприятия сети требуется большая освещенность — примерно  $1 \cdot 10^{-3}$  лк. Следова-

тельно, зрительное восприятие помехи в этом случае исключается. Возможно, рыбы чувствуют низкочастотные гидроакустические колебания, генерируемые при движении воды через ячейку сети и ее вертикальные и горизонтальные турбулентные потоки, возникающие около сети.

Рыбы способны воспринимать такие слабые гидравлические колебания рецепторами боковой линии, а некоторые виды могут таким путем распознавать даже неподвижные предметы [183].

При изучении поискового поведения рыбы на полигоне, окольцованном сетью длиной около 700 м, нами было обнаружено, что меченые щуки и лещи довольно быстро находят места порыва сетей или провисания их подбор и, следуя вдоль сетного полотна, стремятся уйти через них с полигона (рис. 57).

Наибольшее количество попыток преодолеть сеть приходится на вечернее или утреннее время, т. е. на периоды повышенной двигательной активности рыб.

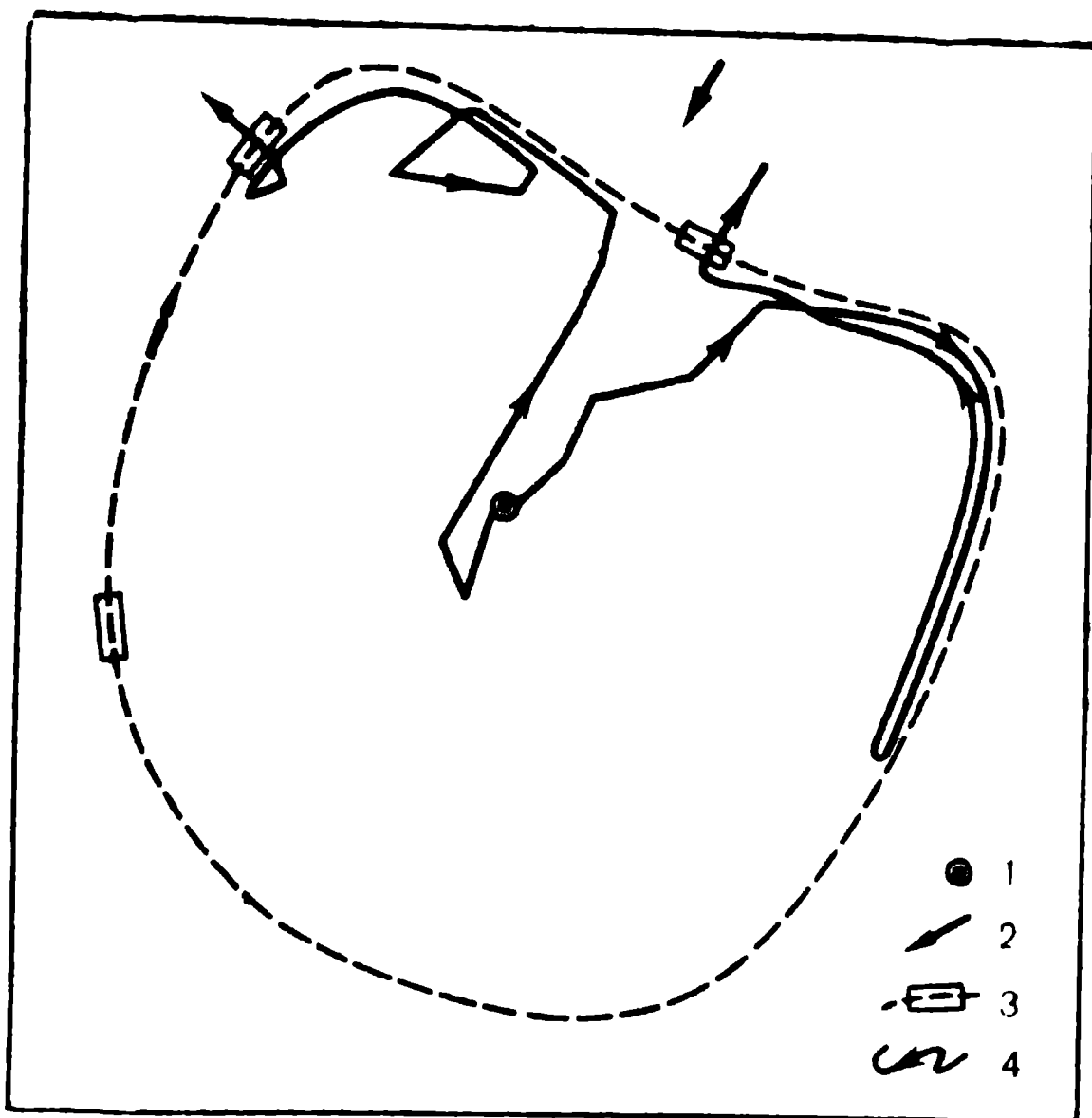
Биотелеметрические методы могут быть использованы и для наблюдений за поведением рыб вблизи трала. Предварительные опыты, проведенные нами на Рыбинском водохранилище, показали, что подобные наблюдения непосредственно с траулера затрудняются шумами его работающих винтов, поэтому их лучше вести с моторных лодок, следующих по обе стороны судна позади него.

Наблюдения показали, что лещи направленно реагируют на приближающееся судно с расстояния до 50—100 м. Вполне допустимо, что это результат запоминания ими первичного попадания в трал. Меченые особи, находящиеся вблизи трала, некоторое время следовали рядом с ним с той же скоростью, что и судно. Такое поведение рыбы, видимо, обусловлено их оптомоторной реакцией на движение трала. Этот факт по визуальным наблюдениям отмечает у трески и пикши Л. Серебров [91].

Детализация представлений о поведенческих реакциях особей и их групп на конкретных биотопах позволяет подойти к разработке эффективных средств управления поведением рыб. Одним из таких средств может быть направленное моделирование условий движения на домашних участках или трассах путем искусственного создания и поддержания определенный период времени необходимых градиентных зон — каналов ориентационной информации, по которым сконцентрированные особи придут в заданную точку. Подобное моделирование особо перспективно на участках работы ставных и закидных орудий

Рис. 57. Перемещения щуки в районе кольцевой сети:

1 — место выпуска; 2 — путь рыб; 3 — места порывов сети; 4 — направление течения.



лова. Большие возможности управления поведением открывают использование видовых экологических сигналов рыб: звуков питания, опасности, полового влечения и др. [82, 83].

Наконец, к способам управления можно отнести искусственно создаваемые на пути рыбы препятствия в виде механических, акустических, электрических и других преград, которые рыба физически не в состоянии преодолеть.

Разработка и внедрение средств и способов управления поведением рыб требуют эффективного контроля за их действием, который достигается применением батискафов, аквапланов, аквалангов и другой подводной техники, позволяющей наблюдателю визуально или по видеоканалам радиосвязи регистрировать реакции рыб на вносимый раздражитель. Возможности контроля значительно расширились благодаря созданию принципиально новых гидроакустических рыбопоисковых устройств, позволяющих получать информацию на расстоянии не только о наличии и мощности рыбных скоплений, но и о работе орудий лова, особенно тралов [119, 121].

Однако почти вся перечисленная техника может успешно применяться только на относительно глубоководных участках акватории или на участках с высокой прозрачностью воды. Этого недостатка лишена телеметрическая аппаратура с использованием ультразвуковых передатчиков-меток.

## ПОВЕДЕНИЕ РЫБ В ЗОНАХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

При зарегулировании стока рек для строительства гидросооружений, водоснабжения, ирригации и судоходства преграждаются пути миграций проходных и полупроходных рыб к нерестилищам, расположенным к верховьям рек, ухудшаются условия размножения рыб в низовьях, а в ряде случаев оно становится вообще невозможным. При изъятии из внутренних водоемов большого количества воды захватывается и уничтожается молодь рыб.

Резкие колебания уровня воды нарушают условия размножения, нагула и зимовки местных видов.

В связи с этим в нашей стране уделяется большое внимание разработке мероприятий, предотвращающих отрицательное воздействие гидростроительства на ихтиофауну. Важная роль среди них принадлежит заводскому воспроизводству молодежи ценных промысловых видов рыб [16, 35] при сохранении в максимально больших масштабах естественного размножения рыб.

Как отмечал Н. И. Кожин [34], «какое бы направление не приняли мероприятия по воспроизводству, во всех случаях первоочередной задачей остается охрана естественного размножения», которое и при зарегулировании стока большинства крупных рек является важнейшим фактором формирования запасов рыб, сохраняя необходимую разнокачественность популяции и обеспечивая генофонд для заводского рыборазведения.

Одним из способов сохранения естественного размножения является обеспечение беспрепятственного пропуска ценных проходных и полупроходных рыб через плотины гидроузлов во время нерестовой миграции и создание оптимальных условий для последующего ската через них отнерестившихся производителей и молодежи.

Опыт работы созданного еще в 1935 г. рыбохода на Нижне-Тулумской ГЭС показывает, что эффективный пропуск производителей через плотину может обеспечить не только сохранение популяции на прежнем уровне, но и значительное ее увеличение [28].

В то же время многие существующие рыбопропускные сооружения практически рыбой не используются или работают столь неэффективно, что не могут обеспечить оптимальный проход производителей к вышележащим нерестилищам. Основная причина этого заключается в недостаточном учете при конструировании и строительстве таких сооружений поведенческих и фи-

зиологических особенностей мигрирующих рыб, их ориентационных способностей, энергетики плавания [29, 60].

Особенно важным при проектировании рыбопропускных сооружений является исследование поведения рыб во время миграций непосредственно в зоне намечаемого гидростроительства или, если гидроузел уже построен, в его приплотинных участках. Документальные данные о фактических трассах движения рыб, их реакциях на гидрологические условия данного района, распределении и концентрации рыб в разные часы суток и сезона, ритмике двигательной активности в сочетании со знанием гидравлических характеристик потока воды позволяют объективно подходить к выбору места расположения, количества и типов рыбопропускных сооружений, выявляют возможности формирования условий для максимального привлечения в них рыбы.

Только на основе знаний закономерностей поведения рыб можно выявить оптимальный режим эксплуатации действующего рыбопропускного и рыбозащитного сооружений и всего гидроузла в целом.

Наиболее удобным, а часто и единственно возможным методом изучения миграционного поведения рыб в зонах гидроузлов является биотелеметрический, так как малые глубины часто исключают применение здесь рыбопоисковых приборов, а завихрения потоков воды и малая прозрачность ограничивают возможности поплавочных и визуальных наблюдений за движением рыб.

Перед биотелеметрией в сочетании с классическими гидрологическими и ихтиологическими методами, применяемыми в зонах гидроузлов, стоят следующие основные исследовательские и практические задачи: выбор оптимального местоположения рыбопропускных сооружений на теле плотины и водозабора на участке водоема; обоснование конструктивных особенностей сооружения, обеспечивающих лучший заход в него пропускаемых видов рыб; выбор оптимальных суточного и сезонного графиков работы рыбопропускного сооружения, обеспечивающего максимальное привлечение в него рыбы, а для водозаборных устройств — исключаящее попадание рыбы; оценка условий прохождения пересажеными производителями приплотинной зоны верхнего бьефа и трассы, ведущей к нерестилищам; изучение условий существования и поведения скоплений рыбы в нижнем бьефе гидроузла с целью обоснования способов ее отпугивания из опасных зон и определения мест селективного отлова.



## Документация поведения рыбы в нижнем бьефе гидроузла

Подробные биотелеметрические наблюдения у плотин к настоящему времени проведены на Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС (Волгоград), Саратовской ГЭС (Балаково), Нижне-Тулумской ГЭС (Кольский залив Баренцева моря), Федоровском гидроузле (река Кубань), Рижской ГЭС (река Даугава) и Кочетовском гидроузле (река Дон). Рекогносцировочные исследования были предприняты в нижнем бьефе Краснодарского гидроузла, на участке Волжского водodelителя; в районах предполагаемого строительства Переволокской ГЭС (г. Куйбышев), на Верхне-Тулумском гидроузле, в районе строительства Тюя-Муюньюнского гидроузла (река Амударья) и в зоне Усть-Манычской плотины (Ростовская область). За рубежом аналогичные работы наиболее интенсивно ведутся у плотин водохранилищ бассейна реки Колумбия (США) [171, 186, 207, 248, 250].

Накопленная информация показывает, что рыбоход или рыбоподъемник оказывается эффективным только в том случае, если он находится на границе раздела потоков, вне зон циркуляции воды и к входу в него ведет естественная или искусственная направляющая ложбина. Эти условия оказались в той или иной степени выполненными на Саратовском, Краснодарском, Нижне-Тулумском и Кочетовском гидроузлах и в отношении одного из четырех рыбоподъемников Бонневильской плотины (США). Пропуск рыбы через эти сооружения эффективен [32, 60, 99].

Чтобы правильно выбрать место будущего рыбопропускного сооружения, необходимо, имея данные о путях движения рыбы и гидрологическом режиме в створе плотины до ее постройки, скорректировать их возможные изменения при новом режиме, возникающем после зарегулирования, и располагать рыбоподъемники в точках выхода на створ плотины скорректированных трасс.

Большую помощь при этом может оказать документация на действующей модели гидроузла поведения модельных рыб — прототипов будущих мигрантов [66]. Однако основную информацию для последующих проработок даст, видимо, анализ детальных исследований поведения меченых рыб в районах уже существующих гидросооружений разного типа.

Рассмотрим в этом аспекте результаты ряда выполненных работ. В течение четырех лет (1965—1969 гг.) изучалось миграционное поведение осетров в районе Волжской ГЭС им.

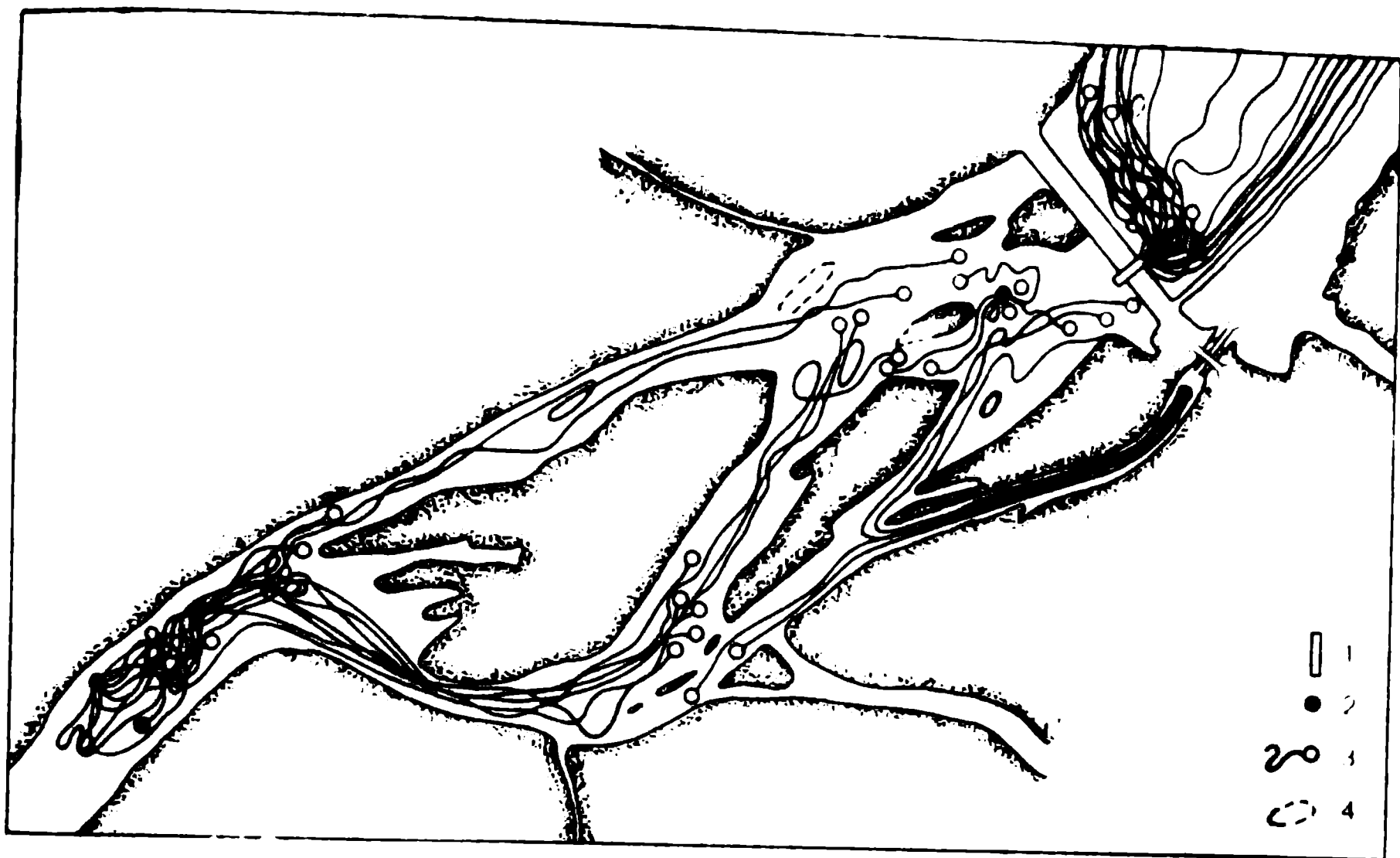


Рис. 58. Подход осетров под плотину Волгоградской ГЭС:

1 — рыбоподъемник; 2 — места выпуска; 3 — путь рыб; 4 — подводные возвышенности.

XXII съезда КПСС [72]. С 1961 г. пересадка рыб из нижнего бьефа в верхний здесь осуществляется с помощью двухнитчатого рыбоподъемника, расположенного между водосливной плотиной и ГЭС. За период 1961—1974 гг. было пропущено в верхний бьеф 462 тыс. производителей осетровых, что обеспечивает полное использование нерестилищ [17, 117].

Исследования проводились в мае — сентябре на 17-километровом участке Волги ниже и на 55-километровом участке выше плотины ГЭС в Волгоградском водохранилище.

Нижний бьеф этого гидроузла разделяется на три рукава: центральный, несущий основную массу воды (старое русло Волги), правобережный, сравнительно мелководный (Денежная воложка) и левобережный, используемый для прохода судов в шлюзово́й канал.

Большинство рыб (75%) для прохода под плотину пользуется центральным рукавом или в меньшей степени Денежной воложкой (рис. 58). По левобережному протоку рыба не мигрирует, но при выпуске в этом рукаве или в близлежащем канале, ведущем в судоходный шлюз, осетры способны по нему пройти к плотине, т. е. игнорирование рыбами левобережного рукава объясняется, видимо, только условиями ориентации при выборе двух потоков в месте слияния центрального и левобе-

режного рукавов. Наиболее спрямленные пути рыбы отмечаются на сравнительно простых по рельефу отрезках рукавов, и наиболее сложны они в местах слияния потоков и резкого перепада глубин. Несмотря на частные отклонения, можно говорить о значительном совпадении трасс движения отдельных рыб и однотипности их реакций на изменение глубины и направления потоков воды. Сопоставление пути следования рыб с рельефом дна на различных отрезках второго участка показывает, что большая часть осетров прошла в местах с глубиной 7—8 м, вдоль склонов подводных углублений или возвышений дна, т. е. рыба двигалась, видимо, только в придонном слое воды. Максимальная скорость движения отдельных рыб варьировала в пределах 17—220 см/с, средняя — 5—70 см/с, среднечасовая скорость всей группы подопытных осетров 30 см/с (1,1 км/ч).

Таким образом, пути подхода рыб в приплотинную зону независимо от сезона и года совпадают на всех характерных участках трассы и на каждом из них прямо зависят от рельефа дна, направления потока воды и скорости течения. Рельеф дна приплотинного участка нижнего бьефа достаточно сложен. Характерным для него (по данным эхолотных съемок) является чередование участков с резким перепадом глубин.

Осетры, прошедшие между островами вечером или утром при работе ГЭС с минимальной нагрузкой, легко достигли левого берега и поднялись вдоль него к плотине, где начали поиск прохода в верхний бьеф. Путь остальных рыб сложнее. Осетры, подошедшие в дневное время, достигнув углубления, расположенного за головной частью острова Спорный, сконцентрировались и оставались здесь, совершая незначительные перемещения, до следующего дня и только на рассвете начали активно продвигаться вперед. Ни одна из прошедших вверх рыб не пыталась проникнуть в правобережный сектор приплотинной зоны или подойти к турбинам. Все меченые особи стремились обойти потоки воды слева.

Путь рыб, подошедших к левобережной части плотины и оказавшихся в зоне постоянного циркуляционного течения, также необычайно сложен (рис. 59, а). Поведение всех осетров в этом районе характеризовалось кратковременным подъемом к плотине, последующим скатом, отстаиванием на глубоких участках или за подводными возвышенностями. Движение осетров вверх после отстаивания происходило двумя путями: вдоль характерных изобат левого берега и по границе между левым потоком воды из агрегатов ГЭС и зоной циркуляционного течения. Подъем и скат представляли собой в целом замкнутое круговое движение.

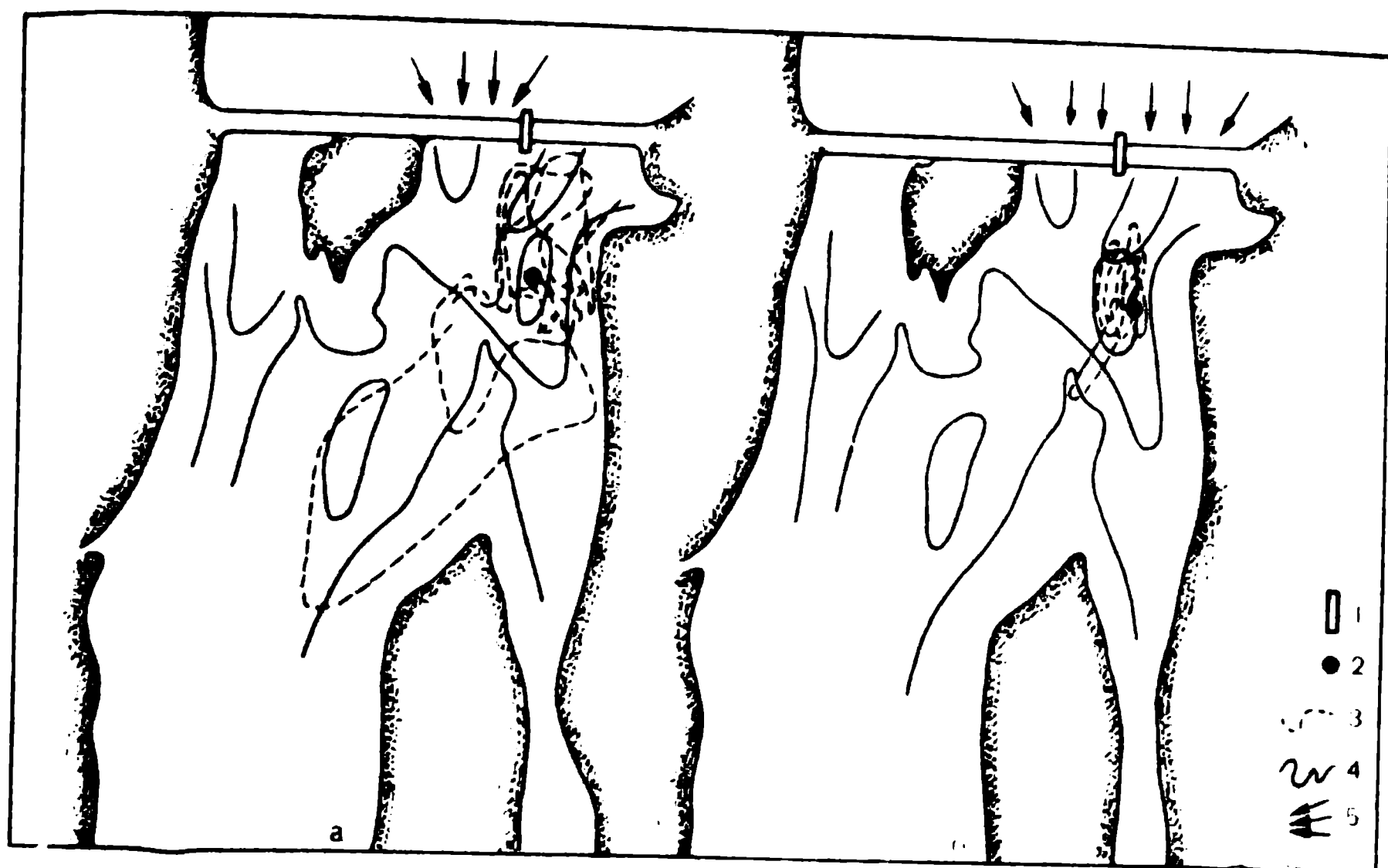


Рис. 59. Поведение осетров в приплотинной зоне нижнего бьефа Волгоградской ГЭС летом (а) и весной, при работе водосливной плотины (б).

1 — рыбоподъемник; 2 — места выпуска; 3 — путь рыб; 4 — изобаты; 5 — направление течений.

Если летом или осенью при полностью закрытых затворах секции водослива осетр имеет значительную площадь для перемещений (практически весь участок против водослива), то весной при паводковом сбросе воды рыбы большую часть времени проводят между двумя потоками — от турбин и от водослива (рис. 59, б).

Во все сроки и годы наблюдений скорости движения осетров относительно берега в приплотинной зоне нижнего бьефа оказались очень небольшими (до 20 см/с). При этом у рыб, только что подошедших снизу, скорость движения в 1,2—1,4 раза выше, чем у рыб, прошедших водослив или выпущенных в приплотинном участке. Ни одна из 52 прослеженных в нижнем бьефе Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС рыб в рыбоподъемник не вошла.

Поведение осетров в районе Саратовской ГЭС изучалось в 1966—1969 гг. до и после зарегулирования стока. До зарегулирования стока из девяти осетров, выпущенных в 1,0—3,0 км ниже острова, в 13 км от будущей плотины три поднялись по правому рукаву и пять — по левому. В правом рукаве осетры следовали вверх вдоль коренного берега, а в левом, где русло

пролегает ближе к левому берегу, — по обоим склонам русла (рис. 60, а). Одна рыба сначала шла по левобережному склону, а затем под высоковольтной линией переместилась под правый берег. Выше острова все осетры следовали в узкой полосе вдоль правого берега над изобатами 6—10 м. Индивидуальная скорость движения на отдельных участках пути варьировала в пределах 8—62 см/с с учетом встречного течения, скорость которого составляет 0,4—0,8 м/с, фактическая скорость рыб составляла примерно 80—134 см/с.

В 1969 г. из девяти меченых рыб только один осетр (самец) прошел по левому рукаву, остальные проследовали вверх по правому (рис. 60, б). Интересно, что два осетра заходили в левый проток, но, пройдя по нему соответственно 1,0 и 3,5 км, скатились вниз и затем один из них стал подниматься вверх по правому рукаву, а другой скатился вниз на 20 км и вышел из района наблюдений. Существенных различий в трассах движения рыб, прошедших по правому рукаву, не обнаружено, все осетры держались русловой части реки как днем, так и ночью. Наибольшие различия в трассах рыб были зарегистрированы при подходе к острову, где образуются завихрения от слияния двух потоков, и под линией электропередач. Максимальная скорость отдельных рыб варьировала в пределах 33—330 см/с. Среднечасовая скорость шести осетров в правом рукаве без учета встречного течения составила 15 см/с, а в левом рукаве — 25 см/с.

Таким образом, перемещения осетров относительно берега происходят с небольшой скоростью. Фактические же скорости движения после зарегулирования стали выше: 134—500, в среднем около 165 см/с. Увеличилась и вариабельность скорости движения отдельных рыб: если до возведения плотины период повышенных скоростей плавания у рыб составлял 1,5—2 ч, то сейчас он сократился до 50 мин, что связано с увеличением скорости потоков после зарегулирования.

До зарегулирования реки осетры шли вверх по обоим протокам, предпочитая левый, после зарегулирования — преимущественно по правому: из семи рыб только одна прошла по левому рукаву. Во время гидростроительства вода этого рукава была более загрязнена, и по нему стало осуществляться интенсивное судоходство. Как показали наблюдения, осетры четко реагируют на проходящие суда: при встрече с ними они изменяют направление движения или затаиваются на глубине. Вероятно, эти два фактора и послужили причинами изменения трасс движения рыб. В этом же районе были проведены наблюдения за глубиной следования рыб в дневное время. Оказалось,

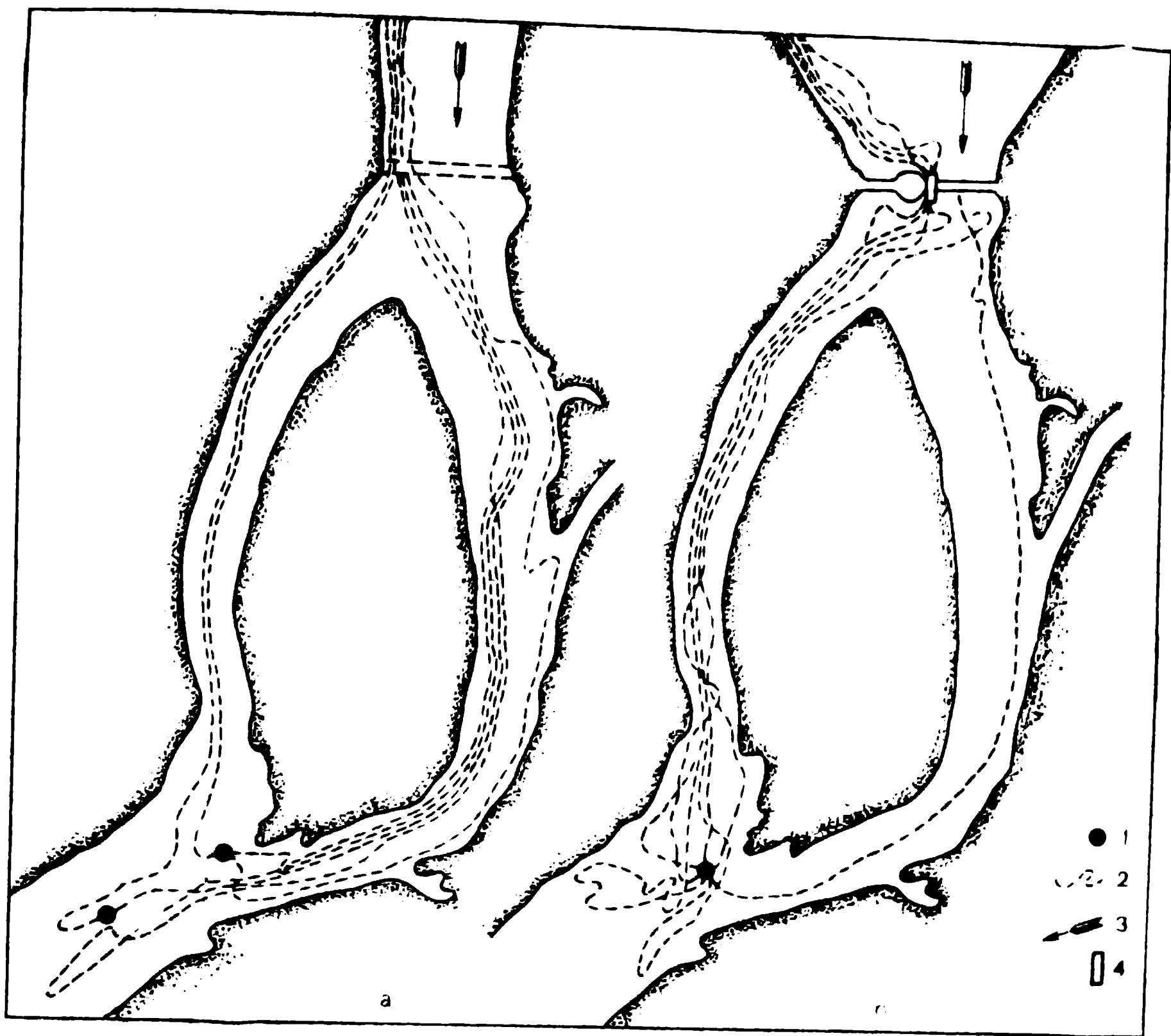


Рис. 60. Миграция осетров в районе Саратовского гидроузла до (а) и после (б) зарегулирования стока:

1 — место выпуска; 2 — путь рыб; 3 — направление течений; 4 — рыбоподъемник.

что глубина следования осетров варьирует в больших пределах ( $\pm 5$  м), но в большинстве случаев рыба придерживалась придонных слоев воды. На участках с глубинами 8—10 м осетр двигался на расстоянии 2—4 м от дна. Некоторые особи поднимались к поверхности воды и в течение 5—20 мин перемещались на глубине 1—2 м. В результате быстрого подъема осетры часто выскакивают на поверхность воды. При пересечении русла рыба не уходила на глубину, а придерживалась примерно середины толщи воды [20]. Такое же поведение отмечено и у американского короткорылого осетра [199]. При сравнении поведения осетров в разных условиях освещенности и при различных скоростях течения не было обнаружено зависимости

между глубиной следования рыбы и изменениями параметров среды.

Наблюдения за мечеными осетрами непосредственно в приплотинной зоне нижнего бьефа проводились во время строительно-монтажных работ на плотине и в первый год работы рыбоподъемника ниже насыпной плотины, где раньше пролегало русло Волги. Во время исследований направление и скорости потоков в правобережной части плотины ниже насыпной дамбы, около которой расположен рыбоподъемник, слабо зависели от режима работы ГЭС. Наибольшая скорость течения зарегистрирована напротив работающих турбин: 1,5—1,7 м/с — у поверхности и 1,2—1,4 м/с — у дна. Привлекающий поток из рыбоподъемника при открытии его затворов на 1,0—1,5 м имел скорость на выходе 0,54—0,71 м/с у дна и 0,9 м/с у поверхности и прослеживался на расстоянии более 100 м.

Осетры из правого рукава, не снижая скорости, по границе потока от агрегатов ГЭС быстро достигли плотины в районе рыбоподъемника, где и предприняли первые попытки найти выход в верхний бьеф. Время подхода рыб к плотине зависело в основном от времени их выпуска. Один осетр, поднявшийся в приплотинную зону по левому рукаву, и два других, выпущенных под левым берегом, двигались к плотине под углом 45—60° к направлению основного потока от ГЭС и вышли также в район рыбоподъемника. Все особи, как подошедшие снизу, так и выпущенные в приплотинной зоне, в первый день имели наибольшую двигательную активность и совершали частые броски к плотине. После очередной неудачной попытки пройти вверх рыбы сносились течением вниз на 100—300 м, откуда они вновь поднимались вверх. На второй день пребывания рыб в приплотинной зоне число попыток пройти вверх значительно уменьшилось. На третий-четвертый день осетры уходили из зоны рыбоподъемника на бывшее русло Волги под насыпную плотину, где течение более спокойное. Некоторые особи после ряда безуспешных попыток найти проход в верхний бьеф в правобережной зоне около рыбоподъемника выходили в центральную или левобережную часть приплотинной зоны, где поток имеет значительно большую скорость. Здесь они неоднократно бросками подплывали к плотине, но сразу же сносились течением. Через некоторое время эти особи вновь оказывались в правобережной части приплотинной зоны.

В целом из 16 осетров, прослеженных в приплотинной зоне, 10 длительное время находились в районе рыбоподъемника, а четыре зашли под насыпную плотину, которая расположена сразу же за рыбоподъемником. Отсюда рыбы при очередной по-



пытке пройти вверх по границе потока, идущего от ГЭС, неизменно попадали на участок, прилегающий к рыбоподъемнику.

Несомненно, удачным следует считать тот факт, что привлекающая струя из рыбоподъемника граничит с основным потоком, скорость которого такова, что рыба стремится его обойти и таким образом оказывается в правобережной части приплотинной зоны, где расположен рыбоподъемник.

Наблюдения на ирригационном Федоровском гидроузле (река Кубань, в 70 км ниже Краснодара) позволили выявить новую, чем для волжских гидроузлов, систему отношений рыб к условиям приплотинной зоны [78]. Непосредственно под плотиной и в 2 км ниже ее сделаны искусственные нерестилища, которые, по имеющимся сведениям [114], успешно осваиваются севрюгой. Это подтверждают и данные телеметрических прослеживаний, показывающие, что некоторые меченые особи, попав на искусственные нерестилища, прекращают миграцию и остаются на них до конца работы передатчика, т. е. два-четыре дня.

Рельеф дна приплотинной зоны Федоровского гидроузла непрерывно изменяется: намываются илисто-песчаные бары, образуются новые углубления, исчезают старые. Наиболее существенные топографические изменения происходят непосредственно под плотиной, что связано с прямым воздействием сбросов воды. По мере удаления от гидроузла рельеф дна изменяется в меньшей степени.

Деформация дна и перераспределение потоков вызывают изменение основных трасс подхода производителей в приплотинную зону. В первый год наблюдений (1969 г.) мигранты в 300—400 м от плотины резко поворачивали до правого берега к левому и далее шли вдоль левобережной разделительной дамбы, где была вымыта узкая ложбина глубиной до 7 м (рис. 61, а). Из 46 прослеженных в это время рыб 40 перемещались весь период наблюдения только под левым берегом, изредка выходя в центральную часть приплотинной зоны и сразу возвращаясь обратно в ложбину, шесть рыб прошли к плотине вдоль правого берега. Они изредка заходили в первый или третий входы рыбонакопительного канала рыбохода, но быстро возвращались обратно в реку. Скорость движения меченых севрюг непосредственно в приплотинной зоне варьировала в пределах 0,04—0,55 м/с и в среднем составляла 0,15 м/с.

В первый год исследовалось влияние режима сброса воды через плотину на подход рыбы. Плотина состоит из семи секций, и характер гидравлического режима нижнего бьефа определяется степенью открытия их затворов. Было опробовано пять

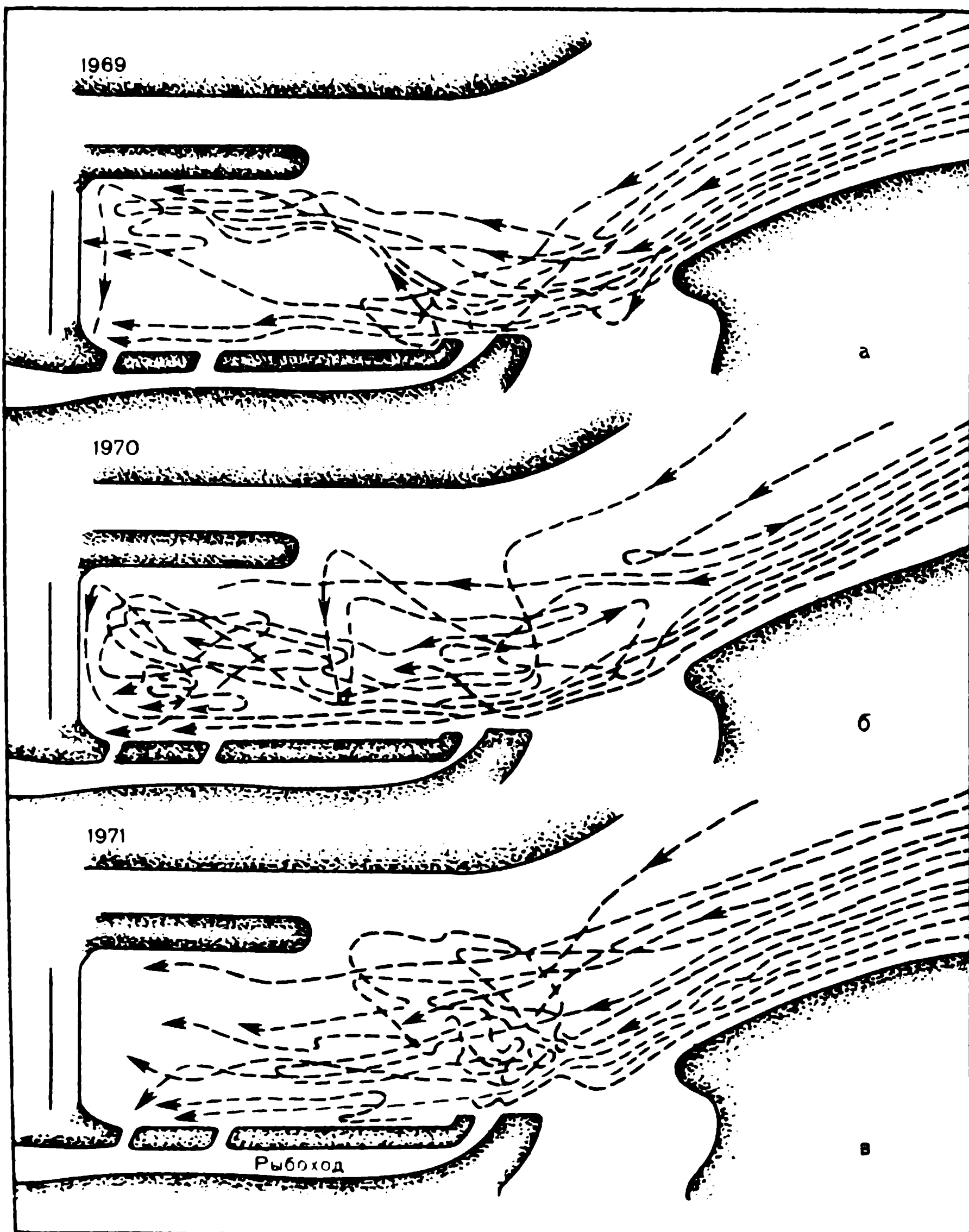


Рис 61 Изменение трасс подхода севрюги под плотину Федоровского гидроузла в разные годы.

различных режимов: увеличенное открытие левобережных, центральных и правобережных щитов, равномерно увеличенное открытие щитов от левого берега к правому и равномерное открытие всех щитов. Все опробованные варианты режима сброса воды существенно не повлияли на типичные для этого года трассы перемещения меченых рыб под плотиной; основная масса рыб, по-прежнему, находилась под левым берегом.

Несколько изменились трассы подхода производителей под плотину в следующем, 1970 г. (рис. 61, б). Так же, как и раньше, в 300—400 м от плотины многие меченые особи, поднимающиеся по русловой части реки, сворачивали от правого берега к левому, но не подходили к нему так близко, как в 1969 г., а перемещались чаще в центральной части прилегающей зоны. Некоторые особи неоднократно подходили к плотине, чередуя подъемы с последующим скатом и остановками. Заметно уменьшились по сравнению с 1969 г. скорости движения рыб, которые теперь не превышали 0,35 м/с.

В 1971 г. из 17 прошедших к плотине севрюг 11 подошли к приплотинной зоне под правым берегом по руслу, а шесть — по середине реки или ближе к левому берегу. Все производители, которые двигались по руслу, задерживались в небольшом углублении против третьего входа в рыбоход, причем пять особей стояли здесь по двое-трое суток. Нами не отмечалось, как в прошлые годы, резкого поворота рыб от правого берега к левому. Только две особи (самцы) после непродолжительного затаивания в этом углублении повернули почти перпендикулярно к берегу и вышли к плотине по левой половине приплотинной зоны. В этот период наблюдений рыбы перемещались практически по всей акватории приплотинной зоны (рис. 61, в).

Максимальная продолжительность нахождения под плотиной самок 53 ч, самцов — 69 ч. Было обнаружено, что самки продвигались чаще почти под берегом, а самцы в равной степени придерживались как центральных, так и прибрежных участков.

Наиболее предпочитаемыми рыбами участками оказались прежде всего углубления дна в 100—300 м от плотины. Трехлетние наблюдения показали, что при существующем режиме рыба, даже подошедшая вплотную к входным лоткам рыбохода, не заходит в них. Некоторые особи, чаще самки, подолгу находились перед входом в судоходный канал, перемещаясь в 30—50 м ниже его разделительной дамбы, где глубина сравнительно невелика. Однако в судоходный канал меченые рыбы ни разу не заходили. Обычно выходящие из шлюза или, наоборот, входящие в него суда отпугивали рыб и они или скатывались, или смещались ближе к центру приплотинной зоны.

Считалось, что при полном открытии затворов плотины, когда осуществляется транзитный сброс воды, все находящиеся под плотинной производителе сносятся сильным потоком воды далеко вниз и только спустя 1—1,5 сут способны пройти в верхний бьеф.

Наблюдения, выполненные во время транзитного сброса воды в 1971 г., показали, что к моменту открытия затворов в приплотинной зоне находились три самца севрюги: один неподалеку от первого входа в рыбоход и два других ближе к середине реки, примерно против второго входа в рыбоход. Кроме того, еще две меченые севрюги (самка и самец) перемещались на нижнем искусственном нерестилище.

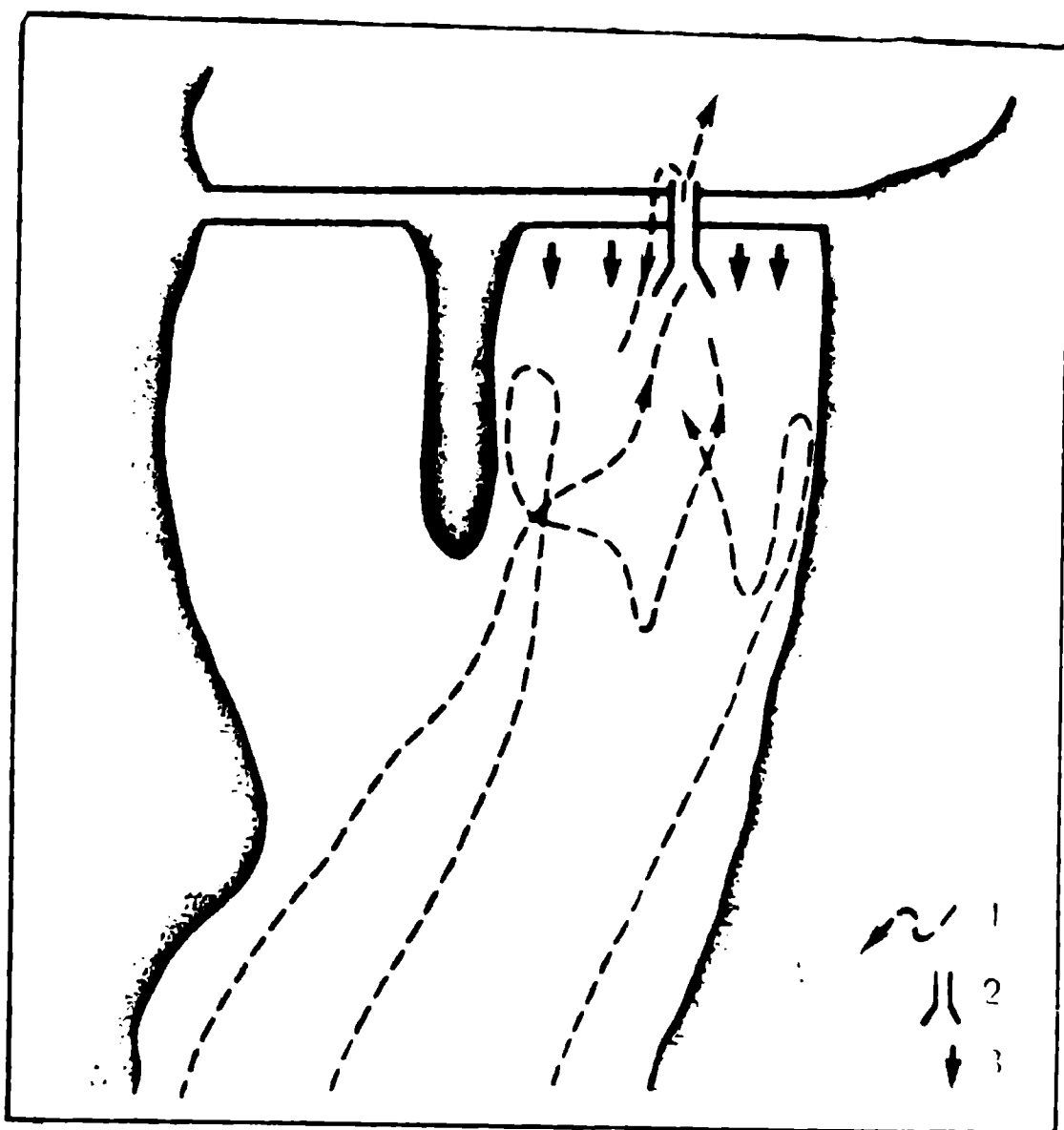
Наращение скорости течения во время открытия затворов плотины происходило постепенно от 0,71 до 0,82 м/с у дна и от 0,79 до 1,1 м/с у поверхности (в 150 м ниже плотины). Градиент нарастания скорости течения составлял примерно 0,015 м/с в час. Вплоть до полного открытия затворов плотины рыбы перемещались так же, как и в обычные дни. При полном открытии лишь одна рыба скатилась вниз на 250 м. Причину ее ската трудно объяснить, так как даже при нормальном режиме работы гидроузла неоднократно наблюдался скат одиночных рыб из приплотинной зоны. Через 2 ч после полного открытия плотины одна севрюга прошла через пролет плотины в верхний бьеф и без остановки продолжала подниматься вверх. Еще две севрюги прошли вверх через пролеты плотины спустя 5 и 10 ч. Меченые рыбы, задержавшиеся на искусственном нерестилище, в последующие дни оставались на своих старых местах, не делая попыток подняться вверх.

По результатам наблюдений для Федоровского гидроузла предложен левобережный вариант рыбоходного шлюза с направляющим устройством. Существующий правобережный рыбоход предложено использовать как искусственное нерестилище, так как по прямому назначению он работать не может.

Выше Федоровского гидроузла река Кубань позднее была перекрыта плотинной Краснодарского гидроузла (рис. 62). В центральной части пятипролетной водосливной плотины сооружен рыбоподъемник. При разработке этого сооружения были учтены рекомендации, выданные нами на основе изучения миграционного поведения осетровых, в частности сконструирован и построен ведущий к входной камере рыбоподъемника донный лоток. В результате эффективность работы этого сооружения оказалась высокой: только за апрель — октябрь 1974 г. через рыбоподъемник была осуществлена пересадка из нижнего в верхний бьеф более полумиллиона особей 20 видов рыб.

Рис. 62. Подход севрюги под плотину Краснодарского гидроузла:

1 — путь рыб; 2 — рыбоподъемник; 3 — направление потоков воды.



Рекогносцировочное обследование скоплений рыб под плотиной Краснодарского гидроузла показало, что наибольшие скопления рыб, преимущественно мелких стайных, приходятся на центральную часть приплотинной зоны, как раз против рыбоподъемника, по мере удаления от плотины распределение рыб по сечению реки становится более равномерным. Мигранты подходят к плотине в основном двумя прибрежными трассами.

Выявление перемещений рыб в зоне плотины этого гидроузла оказалось возможным только с помощью радиопередатчиков, так как из-за малой глубины под плотиной, наличия звуковых помех от шума падающей через водослив воды, а также множества воздушных пузырьков ультразвуковые передатчики-метки оказались малоэффективными.

Успешно работающий рыбопропускной шлюз Кочетовского гидроузла на реке Дон был сконструирован с учетом результатов телеметрических наблюдений на Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС. Поток воды из него по скорости резко отличается от соседних потоков, идущих из водосливов. В мае 1973 г. в районе бьефа этого гидроузла было проведено телеметрическое прослеживание 10 осетров и восьми севрюг [22].

Прежде чем попасть в привлекающий шлейф рыбопропускного шлюза, осетровые неоднократно делают попытки пройти вверх против течения в основном потоке воды. Движение рыб

происходит по двум трассам, по которым они попадают в шлейф (рис. 63).

Характерными элементами поведения осетровых у этого гидроузла были кратковременный подъем вверх, последующий скат, чаще к левому берегу, отстаивание на глубине или в зоне меньших скоростей течения, повторное движение вверх. При подъеме вверх, скате и отстаивании осетры около половины времени находились над глубинами не более 4 м, несмотря на наличие здесь более глубоких ям. Движение вверх, к плотине, происходит в интервале скоростей течения 0,2—0,8 м/с, движение вниз — при 0,15—0,9 м/с. Отстаивается рыба в зонах со скоростью течения 0,15—0,4 м/с. Заходы в основной поток у правого берега, где скорость течения составляет 0,9—1,0 м/с и более, наблюдались в редких случаях. Максимальные скорости рыб отмечены в 6, 14—16, 18—19 и 23—24 ч, что в общем соответствовало утренней и вечерней активности меченых рыб. Средняя скорость плавания у донского осетра составляла 0,03 м/с, т. е. была значительно ниже, чем у волжского (0,2 м/с).

Достигнув створа плотины, рыба легко попадает в относительно более спокойную зону перед входом в рыбопропускной шлюз, откуда и проникает в его приемную камеру. Из меченых осетров один зашел в шлюз и был пропущен в верхний бьеф на девятые сутки, а еще один был пойман сетью в 70 м ниже рыбопропускного сооружения на седьмой день с начала прослеживания. Сопоставление этих данных с общим числом осетров, пропущенных в верхний бьеф в 1973 г. (352 экз.), позволяет оценить общую численность рыб, подходивших в нижний бьеф Кочетовского гидроузла в апреле — июне 1973 г. Она составляет приблизительно 1800 особей. Эти же данные свидетельствуют о том, что после подхода осетровые могут находиться в районе нижнего бьефа в течение семи-девяти суток.

Пропуск семги через плотину Нижне-Туломской ГЭС осуществляется рыбоходом лестничного типа. Удачное расположение входных камер этого рыбохода вблизи агрегатов ГЭС обеспечивает высокую эффективность его работы. Для выявления оптимальных условий захода в него рыб в 1968—1969 гг. нами были проведены исследования перемещений 29 особей семги в нижнем бьефе этого гидроузла [46, 77].

Было обнаружено, что подход рыбы к плотине в значительной степени определялся режимом работы ГЭС. Обычно рыба следовала на границе или в центре потока, идущего от агрегата, имеющего наибольшую нагрузку. Достигнув плотины, семга сносила сильным течением вниз, после чего вновь устремлялась вверх. При движении вверх рыба часто совершала резкие бро-

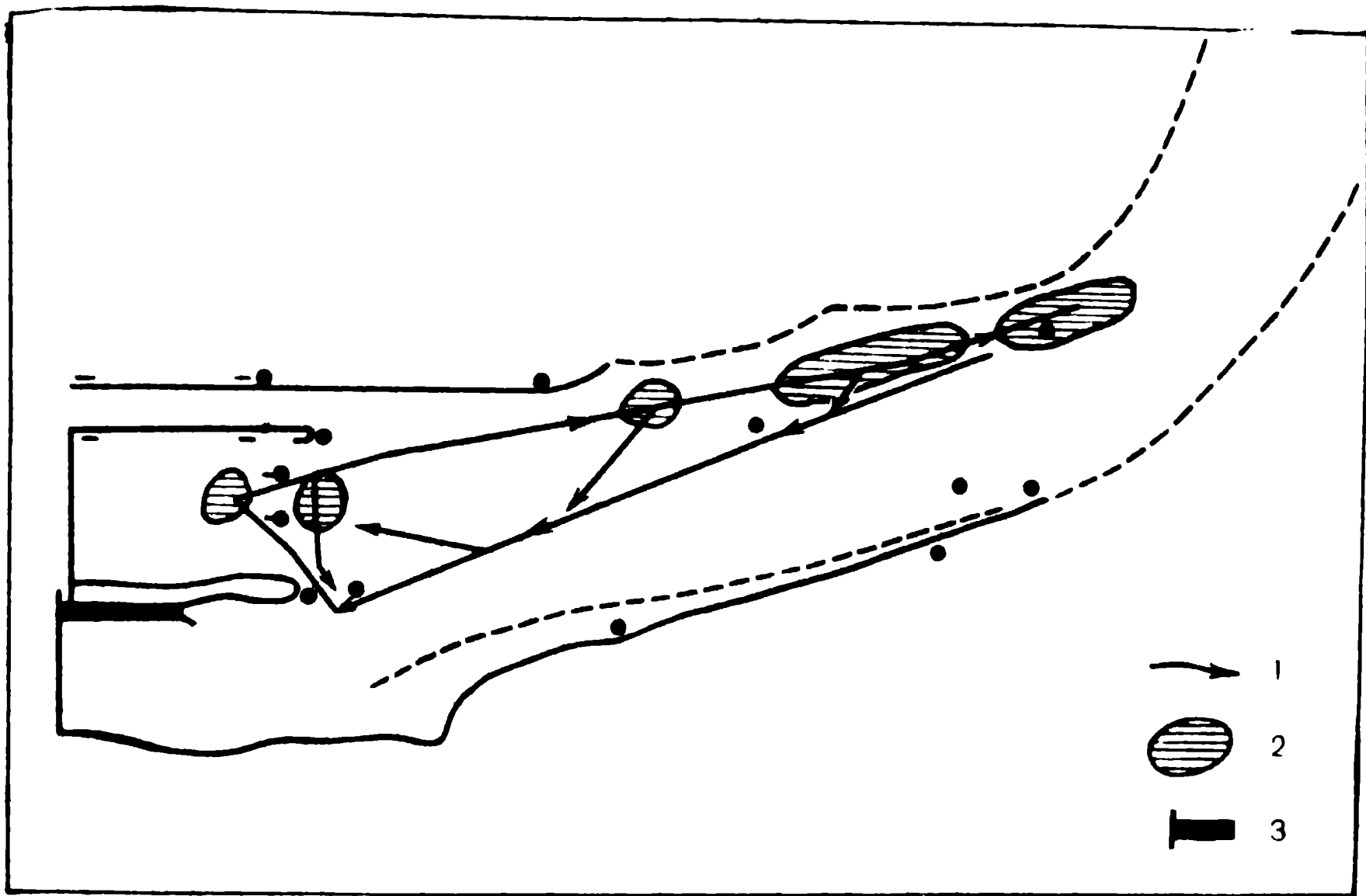


Рис. 63. Основные трассы подъема (1) и места отставивания осетровых (2) у рыбопропускного шлюза (3) Кочетовского гидроузла.

ски, которые заканчивались кратковременным сносом вниз по течению. Подход рыбы к плотине зависел от времени суток: днем попыток пройти вверх наблюдалось значительно меньше, чем ночью. Обычно уже после двух-трех неудачных попыток рыба днем скатывалась вниз по течению и выходила на мелко-водные участки, перемещаясь по всей акватории нижнего бьефа с заходом на отмели глубиной до 0.5 м (рис. 64). Ночью семга большую часть времени находилась в непосредственной близости от плотины против работающих агрегатов. С 6—8 ч утра скорость движения рыбы уменьшалась почти в 2 раза и начинался медленный скат ее от плотины. Эти данные хорошо совпадают с результатами наблюдений за суточным ритмом захода рыб в нижние камеры рыбохода, когда максимум захода приходился на утро (3—7 ч) и вечер (17—22 ч) [67].

Относительно берега скорость движения семги непосредственно под плотиной составляла всего 1—10 м/мин. Фактическая скорость (с учетом встречного течения) колеблется в пределах 50—150 м/мин.

За время наблюдений зарегистрировано пять случаев захода меченых рыб в рыбоход в первые сутки прослеживания и четыре — на 5—15-й день после выпуска. Таким образом, из



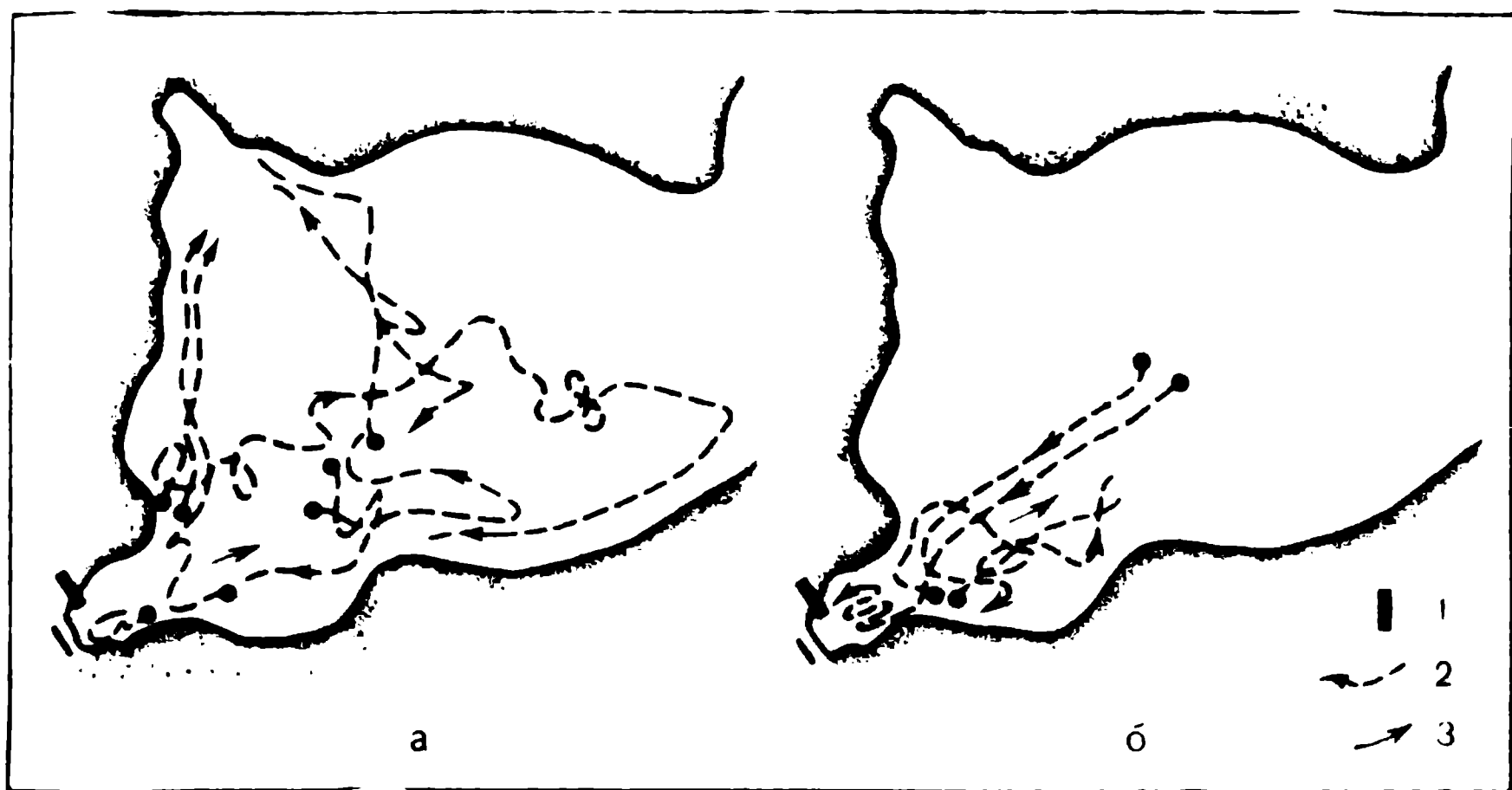


Рис. 64. Поведение семги под плотинной Нижне-Тулумского гидроузла днем (а) и ночью (б):

1 — рыбоход; 2 — путь рыб; 3 — направление течений.

29 меченых рыб в рыбоход зашли девять, что составляет примерно одну треть.

В августе 1968 г. при начинающемся приливе в рыбоход зашли две особи. Одна семга до полуночи находилась в потоке воды, идущем от агрегата, работающего с наибольшей нагрузкой. После того как эту турбину остановили, рыба сразу же перешла вдоль плотины в поток, идущий от крайнего к рыбоходу агрегата, вблизи которого скорость течения превышала 2 м/с. В этом потоке рыба медленно скатилась вниз, а затем при очередной попытке пройти вверх попала в струю рыбохода и через несколько минут зашла в него. Весь рыбоход длиной более 500 м эта семга прошла за двое суток.

Поведение другой семги, зашедшей в рыбоход, было несколько иным. По потоку, исходящему от ближних к рыбоходу агрегатов, рыба поднялась к плотине, но тотчас же ее снесло течением вниз. После кратковременной остановки она вновь начала подъем к рыбоходу и вскоре зашла в него. В течение последующих 10 сут эта рыба так и не зашла в ловушку, расположенную на выходе в верхний бьеф, а находилась в нижних камерах рыбохода.

В июле 1969 г. были прослежены пути захода в рыбоход еще трех меченых семг. Одна из них, поднявшись в полночь к плотине вдоль берега, при начинающемся отливе зашла в нижнее окно рыбохода. В тот же день утром сюда зашла и вторая

семга (уровень воды в это время понизился на 1 м) и через двое суток попала в ловушку.

Третья семга после длительного перемещения на мелководных участках прошла к плотине по центру отводящего канала, затем перешла в поток, идущий от крайнего к рыбоходу агрегата, а вечером следующего после выпуска дня зашла в рыбоход. Через 1,5 ч после захода ее обнаружили в нижних камерах рыбохода, где она находилась более 2 ч, а затем скатилась вниз. В момент захода этой семги также начинался отлив. Таким образом, попадание рыб в привлекающую струю воды из рыбохода чаще происходит не при полном отливе или приливе, а спустя 2—4 ч после их начала.

Наблюдения за глубиной следования семги показали, что в отлив она придерживалась придонной границы потока, где скорость течения на 0,2—0,4 м/с меньше, чем в центре. На мелководных участках семга так же, как и при скате, в большинстве случаев находилась вблизи дна. Интересно отметить, что при прохождении отмели глубиной около 1 м одна меченая рыба, видимо, стремясь быстрее миновать опасный участок, плыла у самой поверхности так, что был виден передатчик-метка, прикрепленный к спинной части тела. На участках глубиной до 6 м рыба придерживалась придонных слоев воды и шла примерно в 1—2 м от дна. В приплотинной зоне, где на всем сечении реки скорость течения у поверхности превышает 1,8 м/с, семга также находилась в придонном слое воды, что, возможно, связано с меньшей, чем у поверхности, скоростью течения. Иногда рыба делала сильные броски вперед, при этом она стремительно поднималась к поверхности воды.

После прохождения Нижне-Туломского водохранилища производители семги и кумжи, нерестилища которых расположены в верховьях реки Туломы, должны преодолеть плотину Верхне-Туломской ГЭС. Сброс воды через эту ГЭС осуществляется в узкий длинный туннель, в котором имеется круглосуточное освещение. Для пропуска лососей через плотину в этом туннеле сразу за рабочими агрегатами ГЭС, огражденными электрическими рыбозаградителями, находится рыбоход. Телеметрические наблюдения за семгой и кумжей показали, что рыба длительное время не решается зайти в туннель, подолгу перемещается вблизи него, а подчас вообще скатывается обратно вниз по течению (рис. 65). Также затруднен заход рыб и во входную камеру рыбохода, привлекающая струя которого сразу же теряется в основном потоке, идущем от ГЭС. Этим наряду с малочисленностью верхнетуломского стада семги, вероятно, и обусловлена низкая эффективность работы данного рыбохода.

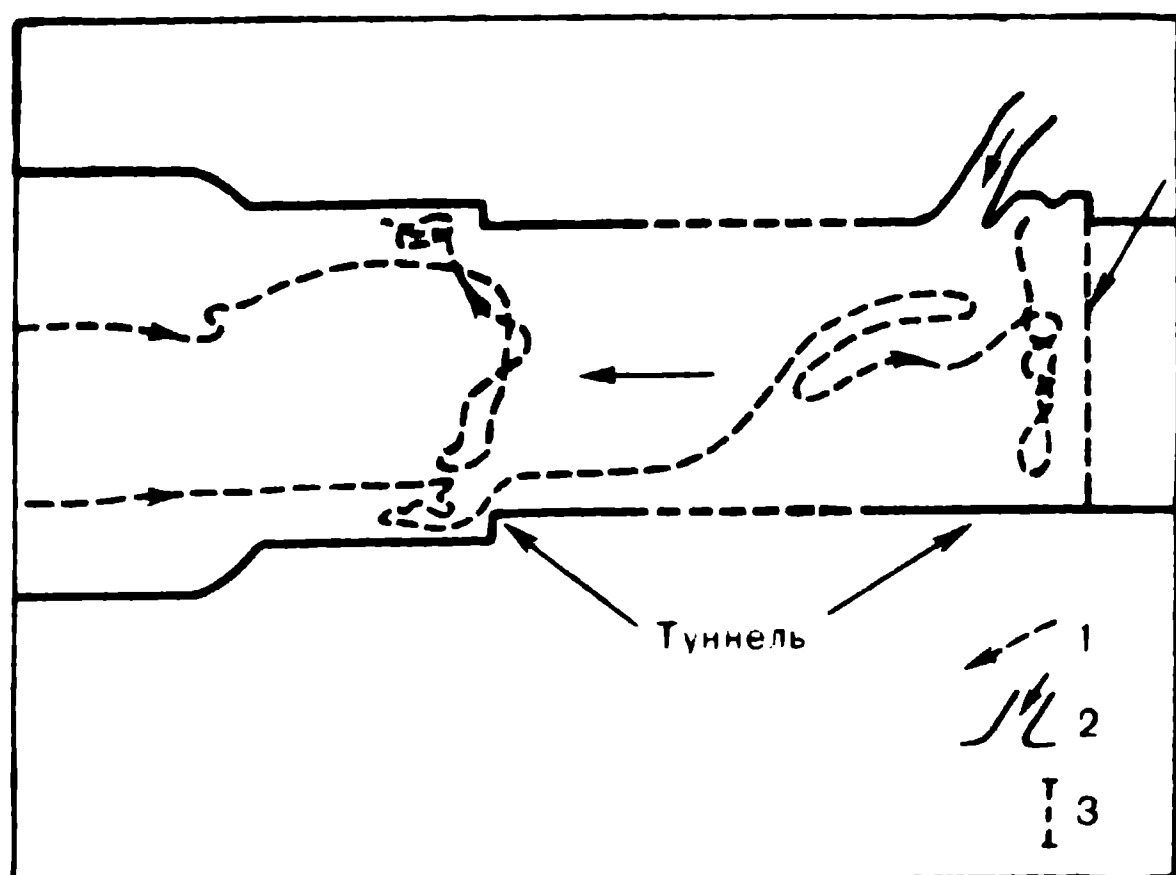


Рис. 65. Перемещение семги и кумжи перед туннелем и в туннеле Верхне-Тулومского гидроузла:

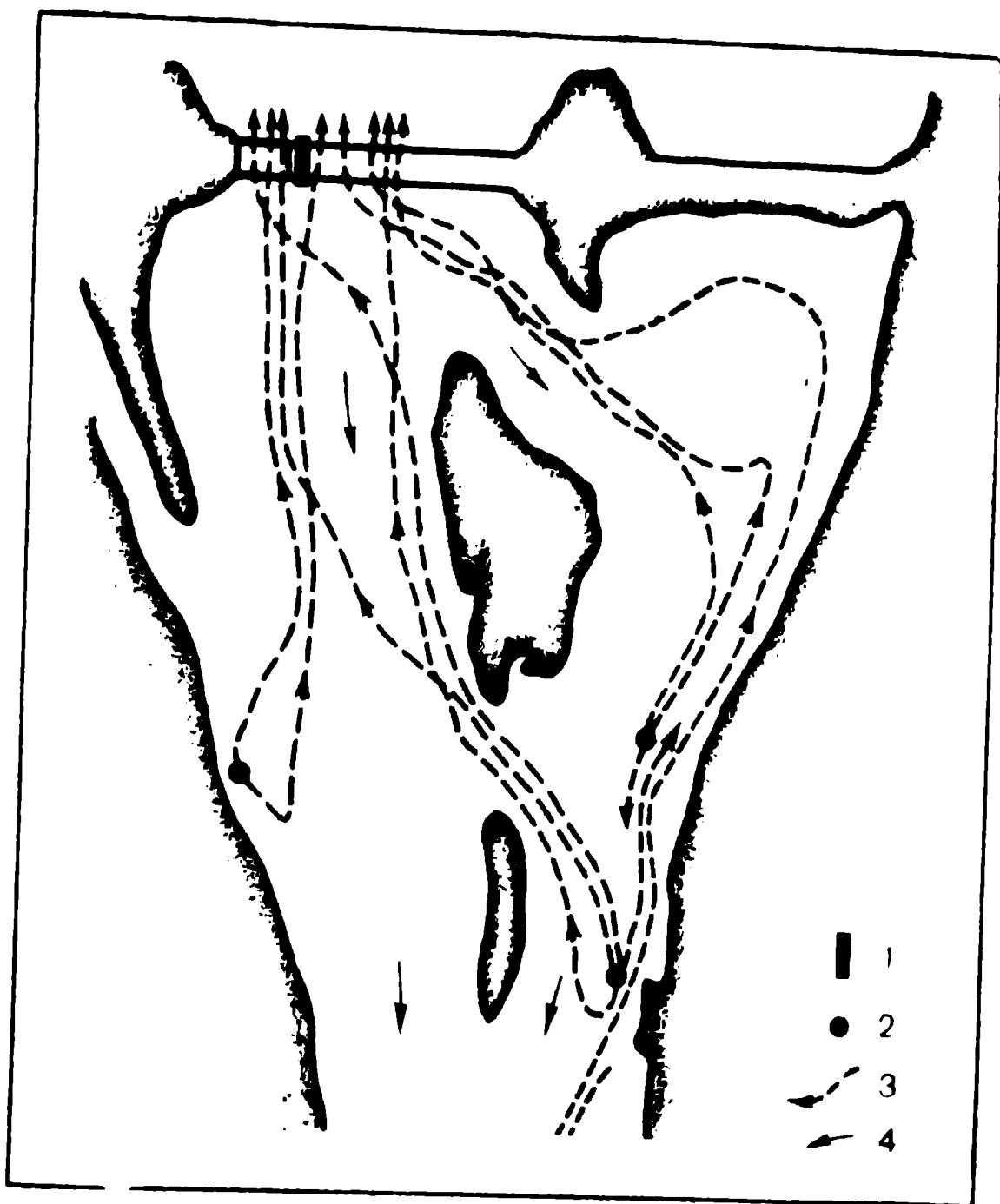
1 — путь рыбы; 2 — вход в рыбоход; 3 — рыбозаградитель.

Обобщенный анализ поведения рыб в нижних бьефах действующих гидроузлов [46, 51, 72, 77, 78, 207] позволяет с высокой степенью вероятности прогнозировать эффективность работы вводимых в эксплуатацию сооружений. Впервые такой прогноз был составлен нами для Нижневолжского вододелителя и рыбохозяйственного комплекса Рижского гидроузла.

Волжский вододелитель сооружен в 50 км выше Астрахани и предназначен для обводнения восточной части дельты [14]. Основная часть сооружения — плотина с судоходными и рыбопропускными шлюзами. Подъемные заслоны плотины позволяют пропускать в западную часть дельты минимум воды, а основную ее массу направлять на восток по руслу реки Бузан. Существует опасение, что при работе вододелителя мигрирующие по западным рукавам рыбы, а это основная часть волжского стада осетровых, не смогут пройти к нерестилищам. В августе 1976 г. у неработающего вододелителя была произведена комбинированная съемка перемещения осетров. Биотелеметрическое прослеживание меченных ультразвуковыми передатчиками особей осуществлялось наряду с локацией движущихся скоплений осетров гидролокатором «Лещ». Было установлено, что часть мигрантов проходит к плотине почти по прямой линии, переходя с русла на мелководные участки, прилегающие к плотине, и ориентируясь, видимо, только на встречный поток воды. Другие производители продолжают подниматься к плотине вверх по руслу реки и выходят под насыпную дамбу, а отсюда через проток, образовавшийся между островом и плотиной, — к открытым заслонам вододелителя (рис. 66). Все осетры успешно прошли створ плотины вододелителя через правобереж-

Рис. 66. Прохождение осетрами плотины Нижневолжского вододели-теля:

1 — рыбоподъемник; 2 — ме-  
ста выпуска; 3 — путь рыб;  
4 — направление течений.



ные и центральные пролеты, между которыми расположены рыбопропускные сооружения.

Двигутся осетры большими скоплениями: на 5-километровом участке русла в августе гидролокатор регистрировал одновременно 270—300 особей перед и 10—20 экземпляров после начала неводного лова на расположенных ниже вододели-теля тонях, т. е. по данным биотелеметрического прослеживания можно с высокой точностью оценивать интенсивность промыс-лового использования запасов рыб.

На Рижской ГЭС стационарное рыбопропускное сооружение отсутствует. Гидрологические и русловые процессы в нижнем бьефе этого гидроузла очень динамичны и сложны. В этом слу-чае предложено применять мобильные рыбопропускные соору-жения [43], которые в основном представляют собой плавучую установку, состоящую из передвижного рыбонакопителя и само-ходного садка-контейнера. Для выбора мест установки рыбо-накопителя, принцип работы которого основан на привлекаю-щем действии собственного потока воды, необходимо знать ме-ста концентраций рыбы, пути ее перемещения, ритмику двига-тельной активности.

Проектом предполагалось установить такую плавучую установку вблизи от ГЭС. Для перегрузки мигрирующей рыбы в транспортные средства и перевозки ее в верхний бьеф в 5 км ниже ГЭС построен рыбохозяйственный створ. Два года подряд нами исследовалось распределение рыбы в нижнем бьефе этой ГЭС. Оказалось, что больше всего рыбы концентрируется в 8—10 км ниже по реке. Подход рыбы к рыбохозяйственному створу невелик. Рижская ГЭС — станция остропикового режима и работает несколько часов в сутки. В остальное время происходит накопление воды в водохранилище и течение в нижнем бьефе отсутствует. Длительное отсутствие течений как основных ориентиров анадромных мигрантов (лосося и сырти) для движения вверх по реке, видимо, и объясняет задержку рыбы в отдалении от ГЭС на больших глубинах. Биотелеметрические наблюдения позволили четко определить места установки плавучего рыбо-накопителя (рис. 67) и показать, что образование промысловых скоплений рыбы в районе запроектированного рыбохозяйственного створа возможно только в исключительных случаях.

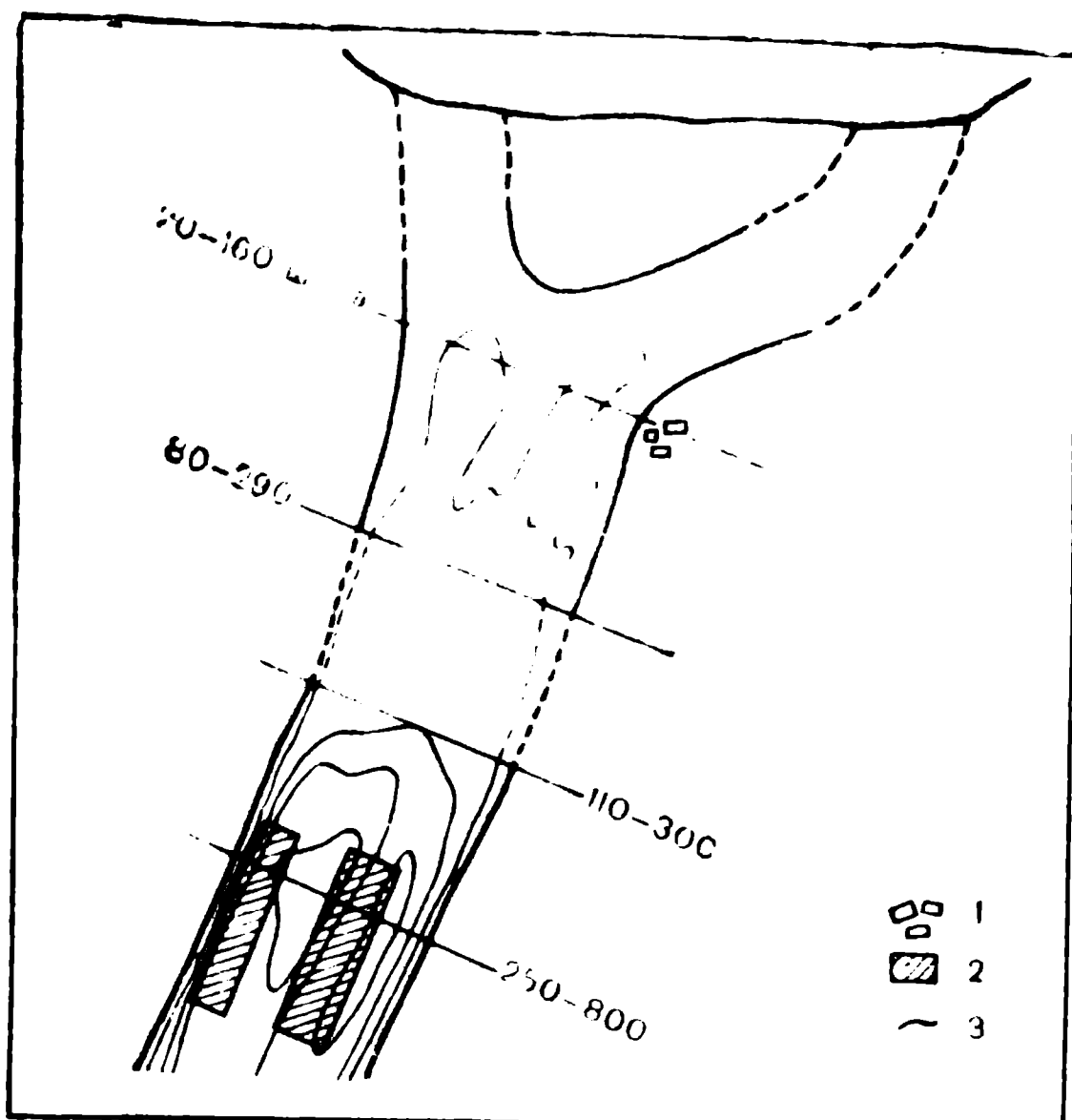
Методика изучения поведения рыб в нижних бьефах плотин гидроузлов значительно отличается от методики проведения подобных работ в обычных условиях водоема. Прежде всего необходимо учитывать очень сложный и часто неустойчивый гидрологический режим этих участков. Наличие в зоне гидроузла звуковых помех (работа агрегатов ГЭС, шум падающей воды) усложняет обнаружение сигнала передатчиков. Множество береговых огней затрудняет пеленгацию следящего судна по наземным ориентирам. Ниже перечислены особенности, на которые следует обратить внимание при работах в данных районах.

1. Выпуск мигрирующих рыб целесообразно производить ниже приплотинной зоны гидроузла. Это исключает возможность пассивного выноса рыб вниз по течению, поскольку в сильном потоке не все мигранты сразу же после выпуска способны правильно сориентироваться и успешно сопротивляться сносу. Кроме того, такой выпуск позволит проследить пути подхода под гидроузел и выявить закономерности поведения рыб именно в тех местах, которые избираются ими, а не исследователем.

Несомненно, в ряде случаев целесообразно выпускать рыб и непосредственно в приплотинной зоне, например у гидроузлов низконапорного действия, где скорости течений быстро уменьшаются и уже в 100—200 м от плотины незначительно отличаются от обычных для незарегулированной реки. В ряде случаев возникает необходимость изучения способности рыб находиться в спокойных участках приплотинной зоны, куда меченые рыбы, выпущенные ниже гидроузла, могут в большинстве слу-

Рис. 67. Плотность рыб и места оптимального расположения плавучего рыбоуловителя в нижнем бьефе Рижского гидроузла:

1 — рыбохозяйственный комплекс; 2 — участки, наиболее благоприятные для установки рыбоуловителя; 3 — изобаты.



чаев заходить только спустя несколько дней после ряда безуспешных попыток пройти вверх.

2. Звуковые помехи, возникающие от работающих агрегатов или падения воды через водосливные устройства, осложняют проведение работы непосредственно у гидроузла. В данном случае, если позволяют глубины, следует применять не ультразвуковые, а радиопередатчики или их комбинации.

3. В условиях сложных непостоянных потоков воды в приплотинных участках важное значение для последующего анализа поведенческих реакций рыб на эти потоки приобретают данные о направлении и скорости течений непосредственно в местах следования рыбы. Одноразовая гидрологическая съемка района работ в результате быстрой изменчивости распределения водных потоков недостаточна для анализа поведения рыб. В то же время частое измерение течений непосредственно на пути движения меченой рыбы трудоемко, поэтому данные по гидрологии участка при всех возможных режимах работы гидроузла необходимо иметь до начала проведения телеметрических работ. Несомненно, в отдельных наиболее интересных участках и непосредственно в местах прохождения меченой рыбы можно проводить контрольные замеры.

Изменчивость направлений потоков воды, в которых движется рыба, осложняет расчет ее фактической скорости. Если

поток направлен не строго по направлению движения рыбы, требуется введение поправки на снос рыбы в сторону от основного курса движения. Величина этой поправки зависит от скоростей потока воды и рыбы и от угла между их направлениями.

4. Следует обратить внимание на трудность определения истинного направления на меченую рыбу у гидроузлов, стоящих на нешироких реках, берега которых покрыты бетонными плитами. В данном случае отраженный от бетона сигнал может быть ложно принят за истинный. Чтобы избежать этого, пеленгацию меченой рыбы надо осуществлять здесь с нескольких точек, меняя местоположение следящего катера или соответствующим образом располагая береговые станции.

### **Особенности поведения рыбы в верхнем бьефе гидроузла**

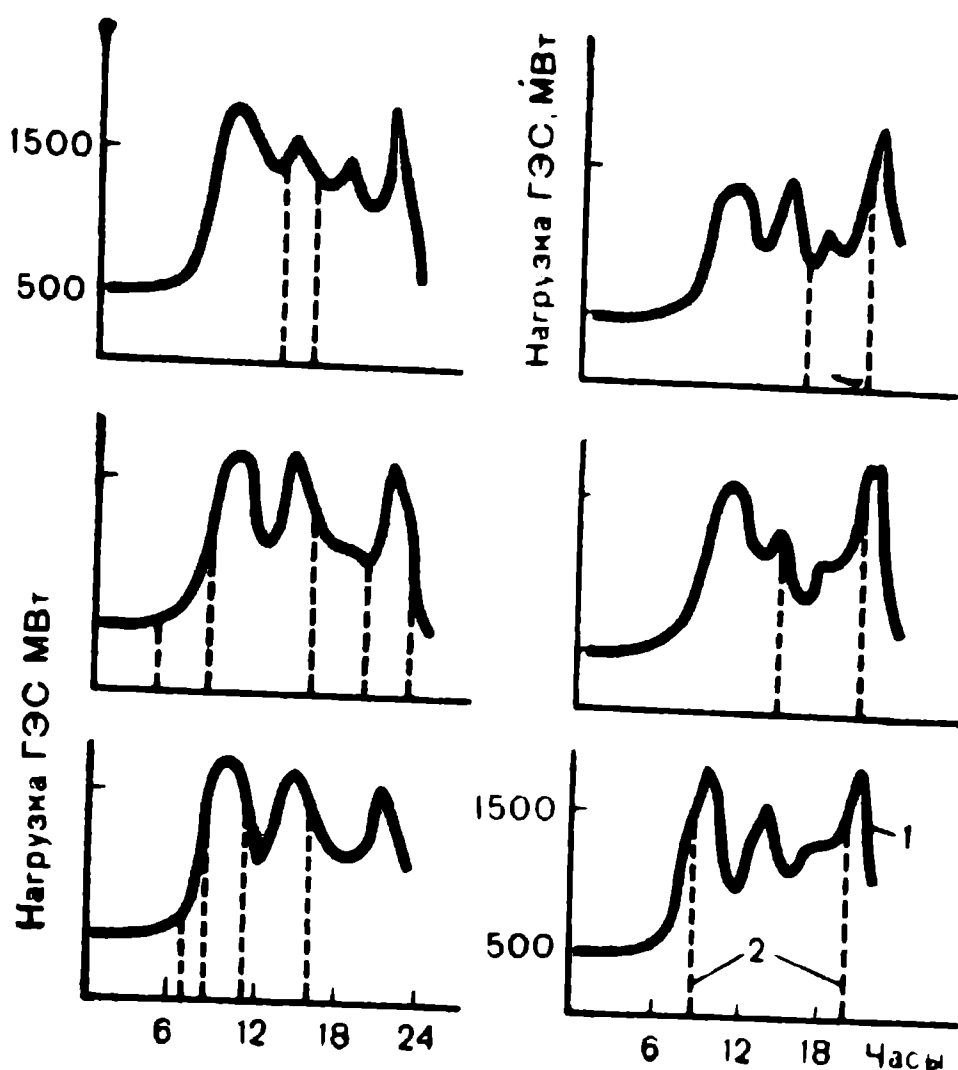
Слежение за меченой рыбой в верхнем бьефе производится в створе плотины и на трассах движения к нерестилищам.

В приплотинной зоне верхнего бьефа Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС прослеживались осетры, вышедшие из рыбоподъемника. Из 94 меченых осетров осенью 1966 г. 65 особей успешно прошли сложную по режиму приплотинную зону и стали подниматься вверх. 29 осетров прошли между решетками сороудерживающего сооружения и через турбины ГЭС скатились в нижний бьеф. Соотношение полов скатившихся рыб было близко к 1 : 1, длина тела у самок варьировала в пределах 124—140 см, у самцов — 106—120 см. Сопоставление времени ската осетров с режимом работы агрегатов ГЭС показывает, что почти все рыбы попадали в турбины во время резкого изменения объема стока воды (рис. 68). Скат обычно происходил спустя 1—2 ч после соответствующего изменения режима работы турбин [72]. В период пропуска паводковых вод весной интенсивный скат осетров происходит и через секции водосливной плотины. При этом в нижний бьеф сбрасываются как рыбы, только что пропущенные рыбоподъемником, так и производители, совершающие посленерестовую миграцию в море.

Для определения возможности ската осетров через водослив были проведены специальные опыты [19]. Оказалось, что все меченые особи после ската через водослив при открытии затвора на 2 или 4 м сразу же уходили из зоны больших течений, некоторые из них выходили в зону циркуляционных течений, которая находится между двумя потоками (от агрегатов ГЭС и



Рис. 68. Режим работы ГЭС (1) и время ската рыб через плотину (2).



водослива), другие залегли в яму и отстаивались там длительное время.

Четыре осетра были сброшены в водослив при полностью открытом (на 8 м) затворе. Сигнал от двух из них исчез через несколько секунд после выпуска, у других метки работали нормально. Один из этих осетров плыл вниз со скоростью течения, другой около суток находился вблизи той секции водослива, куда был сброшен. Чтобы определить степень травмирования рыбы при прохождении водослива, в нижнем бьефе производился контрольный отлов меченых рыб. Вторично было поймано пять осетров: три — сброшенных при частично и два — при полностью открытом затворе. Первые три рыбы не имели никаких внешних повреждений. После вторичного выпуска их поведение оставалось таким же, как у других рыб, выпущенных в приплотинном участке, но двигательная активность была несколько ниже.

Траектории движения рыб в верхнем бьефе после выхода из рыбоподъемника в июле — августе при неработающем водосливе различны, а весной, во время половодья, большинство осетров начинали движение вверх, придерживаясь границ основного потока воды. Наилучшие условия прохождения вверх после выхода из камеры рыбоподъемника в водохранилище для рыб создаются при равномерно высоких нагрузках на агрегаты ГЭС в самом начале утреннего (8—12 ч) и в конце вечернего (16—20 ч) максимумов их работы [72]. По мере удаления от

плотины трассы движения осетров существенно упрощаются и они проявляют стандартный стереотип следования вдоль склонов коренного русла против потока воды.

Условия ориентации рыб на выходе из рыбоподъемника Саратовской ГЭС при правобережном, в отличие от Волгоградского гидроузла, расположении рыбоподъемника значительно благоприятнее [51].

В Нижне-Тулском водохранилище после выхода из рыбохода в верхний бьеф семга сразу попадает в экологическую обстановку, отличную от обстановки нижнего бьефа: малая скорость течений (до 0,4 м/с) и большие глубины (до 12—14 м), поэтому в приплотинной зоне верхнего бьефа трассы движения отдельных рыб очень различаются. Отмечается скат рыб по течению, переходы от одного берега к другому, галсовидные поиски в средней части акватории. Продолжительность пребывания рыбы на этом участке длиной менее 1 км колеблется от 0,5 до 4—5 ч. Скорость подъема вверх невелика и составляет в среднем для самцов 0,55 км/ч и для самок — 0,4 км/ч. Небольшая ширина, наличие постоянного стокового течения в приплотинной зоне значительно упрощают условия ориентации рыб, и они после короткого периода адаптации к новым условиям выходят в основной плес водохранилища.

В водохранилищах мигранты часто длительное время перемещаются вокруг островов, скатываясь по течению и совершая поисковые броски в стороны (рис. 69). Период блужданий в районе островов может затянуться до нескольких часов, прежде чем рыба продолжит прерванное движение. Однако выйдя в это время на русловой склон или в береговую полосу водохранилища, рыба дальше быстро мигрирует вверх, пока не достигнет своих нерестилищ [52].

Такое же поведение отмечено у чавычи, кижуча и стального лосося в верхнем бьефе Бонневильской плотины на реке Колумбия [171]. Рыбоход на этой плотине расположен в стороне от ГЭС, рядом с водосливом.

При закрытой водосливной плотине лососи не сразу уходят вверх по течению, делая вблизи нее множество переходов, что связано с низкой скоростью течения, поскольку основной поток воды, направленный к ГЭС, остается в стороне (рис. 70). Последующее движение вверх происходит только вдоль прибрежной зоны водохранилища на глубине от 1,5 до 12 м. По мере удаления от плотины путь отдельных рыб становится удивительно однообразным.

Наблюдения за перемещениями рыб в створе плотины со стороны верхнего бьефа наиболее удобно и безопасно прово-

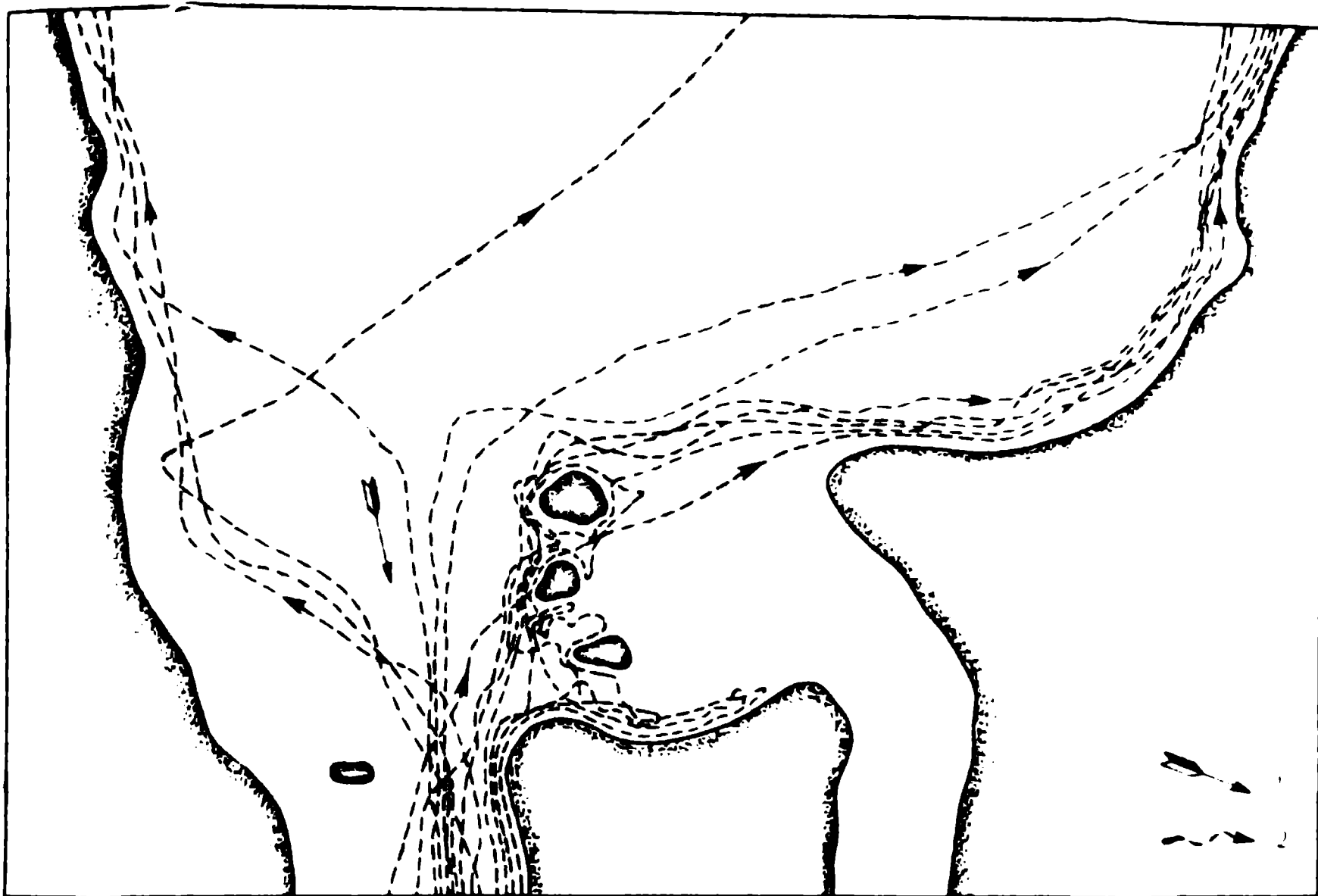


Рис. 69. Перемещения семги в районе островов:  
1 — направление течений; 2 — путь рыб.

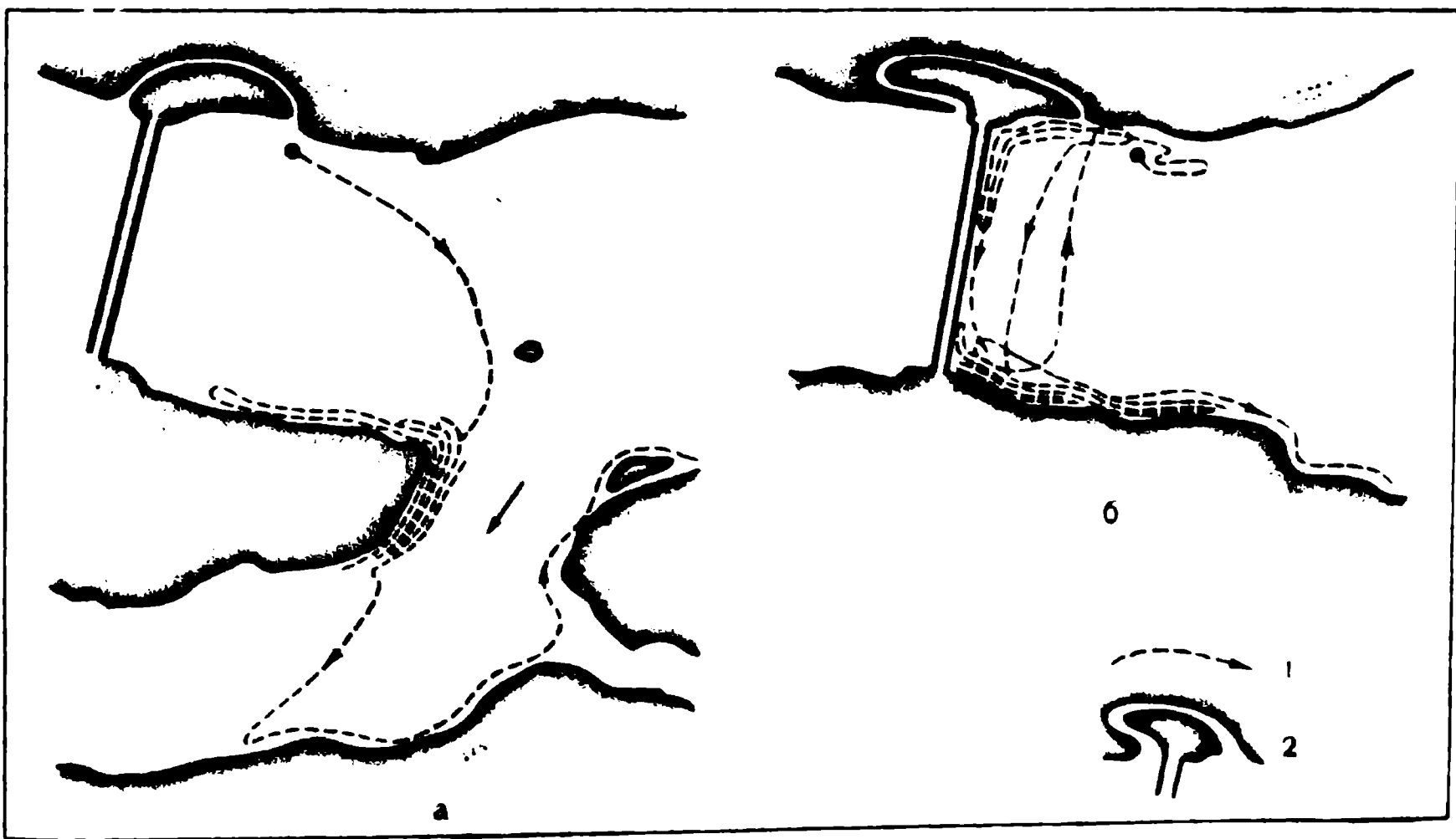


Рис. 70. Перемещение чавычи около полуострова (а) и у водосливной плотины (б) Бонневильского гидроузла [171]:  
1 — путь рыб; 2 — рыбоход.

дить с одной-двух стационарных точек, устанавливая аппаратуру на волнозащитных и сороудерживающих сооружениях. На период работ целесообразно иметь третью стационарную точку с аппаратурой и в нижнем бьефе для учета скатившихся рыб и наблюдений за ними.

Биотелеметрические исследования позволяют определить комплекс требований к конструкции основных узлов входного и выходного устройств рыбоподъемника. Накопленная информация показывает, что для успешной работы рыбопропускного сооружения вход в него со стороны нижнего бьефа должен быть конструктивно сопряжен с рельефом прилегающего участка водоема. Это обеспечивает эффективный пропуск всех видов рыб независимо от особенностей их экологии.

Выше уже приводились примеры удачного согласования отметок дна и входа путем сооружения направляющих лотков. Отсутствие подобного согласования на рыбоподъемниках Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС и ряде других гидроузлов — основная причина их плохой работы. Согласующий лоток должен иметь конфигурацию, способствующую лучшему распознаванию рыбой привлекающего потока воды из рыбоподъемника. Шлейф этого потока должен прослеживаться на расстоянии от входа не менее чем 100—150 м. Угол скоса стенок лотка не должен превышать 50—60°. Лучший подход рыбы к рыбопропускному сооружению наблюдается в том случае, когда в нем отсутствуют вибрирующие элементы, освещение и он расположен в нижнем бьефе на расстоянии, равном 50—100 м от тела плотины.

Для обеспечения нормального выхода рыбы в водохранилище необходимо сооружение в верхнем бьефе адаптационных камер и направляющей стенки, препятствующей попаданию рыбы в близлежащие секции водослива или турбины, если рыбопропускное сооружение расположено рядом с ними. Длина стенки в верхнем бьефе, как показывает опыт наблюдений на Кочетовском, Краснодарском и Волгоградском гидроузлах, должна быть не менее 100—200 м.

Эффективность работы рыбоподъемника во многом зависит от того, насколько суточная цикличность шлюзования согласована с динамикой подхода рыбы в нижний бьеф и суточной ритмикой ее активности. Контроль за подходом рыбы может быть осуществлен установкой на входе в рыбопропускное сооружение телеметрической стационарной станции, «просматривающей» в часы наибольшей двигательной активности рыбы прилегающий участок нижнего бьефа и определяющей ее численность.

Эти данные могут быть также использованы для прицельного селективного отлова рыбы.

Сведения о суточных ритмах активности многих ценных проходных рыб к настоящему времени уже собраны. Если они в каком-то конкретном случае отсутствуют, их сравнительно легко получить, проведя 2—3-суточное прослеживание партии из 10—15 меченых рыб интересующего вида по стандартной методике, описанной выше.

Знание суточного ритма активности рыбы позволяет «настроить» по нему график работы рыбопропускного сооружения. Практика показала, что совершенно не обязательно осуществлять рабочие циклы круглосуточно. Активная работа рыбопропускного сооружения должна начинаться за час до утреннего и вечернего пиков двигательной активности рыб и прерываться в часы их дневного и ночного покоя. Регулярное определение количества подошедшей к входу в сооружение рыбы позволяет производить только эффективные шлюзования, исключив ненужные траты воды, энергии и материально-технических средств при отсутствии скоплений.

Выбор оптимального режима работы рыбопропускного сооружения требует обязательного проведения серии прослеживаний движения меченых рыб после выхода в верхний бьеф при разных режимах работ агрегатов и секций водослива для определения наиболее благоприятных условий их ухода от плотины и предотвращения ската в нижний бьеф.

Биотелеметрический контроль за работой рыбопропускных сооружений представляется необходимым звеном их рациональной эксплуатации и должен рассматриваться как обязательный элемент службы гидроузла.

Существенную помощь биотелеметрия может оказать также при решении близких к проблеме рыбопропуска вопросов конструирования и размещения рыбозащитных и водозаборных сооружений.

Знание трасс массовых перемещений рыб в районах предполагаемых водозаборных сооружений позволяет располагать их на менее посещаемых рыбой участках, а учет суточной и сезонной ритмики двигательной активности рыб дает возможность рекомендовать оптимальный режим работы водозаборов, при котором засасывание рыбы в их системы минимально [66, 68].

Полевые экологические данные, получаемые комплексом методов, в который входит биотелеметрия, необходимы также при проектировании эффективно действующих рыбозащитных сооружений на водозаборных устройствах и участках водоемов, опасных для жизни рыб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводная биотелеметрия как средство исследования жизнедеятельности и поведения гидробионтов возникла на базе достижений современной радиоэлектроники благодаря проникновению в экологию идей общей теории связи и теории информации.

В настоящее время биотелеметрия широко внедряется в гидробиологию и практику водопользования. Определяется круг очередных биологических и инженерно-технических задач, подлежащих решению с помощью биотелеметрии, совершенствуются методы сбора и обработки информации, выявляются возможности использования существующих приборов и оборудования в смежных областях знаний, разрабатываются новые телеметрические системы.

Одна из основных задач биотелеметрии на данном этапе — накопление данных о связях между элементами поведения рыб и других водных животных и градиентами физических и химических полей энергии на биотопах.

Установление этих связей будет не только способствовать решению важнейших проблем ориентации и навигации гидробионтов, но и создаст основу для разработки методов и средств управления их поведением.

Для выполнения этой задачи необходимо получение разносторонней информации о состоянии организмов и среды и о системах сложных биоценотических взаимоотношений. Успех здесь в значительной степени зависит от массовости охвата исследованиями типичных экологических ситуаций водоемов и видового состава их населения, а также от вооруженности исследователей необходимыми средствами сбора информации. Прежде всего нужны приборы, обеспечивающие прецизионные измерения градиентов полей, воспринимаемых рыбой: температуры, солености, концентрации водородных ионов, освещенности, напряженности электрического и магнитного полей, показателей газового состава воды, акустических каналов и др.

Представляется необходимой разработка как стационарных вариантов такой аппаратуры, так и полевых, обеспечивающих с требуемой точностью измерение указанных параметров с подвижной платформы. Поскольку основная цель этого исследования — установление корреляционных связей между параметрами и поведенческими реакциями гидробионтов, важное место в решении данного комплекса задач занимает повышение точности геодезической привязки станций отбора информации, а также точности определения во времени местоположения исследуемого биологического объекта. Эти задачи могут быть решены путем создания на опытных полигонах полустационарных станций сбора, передачи и первичной автоматической обработки информации о среде и реакциях объекта на изменение параметров среды.

Важное место в этом комплексе занимает точное определение местоположения объекта относительно станций. По-видимому, наиболее перспективны при определении местоположения применительно к рассматриваемому комплексу задач импульсно-дальномерный и разностно-дальномерный методы.

Актуальной научно-технической задачей является дальнейшая разработка информационных передатчиков, в том числе многоканальных, которые одновременно с данными о местоположении объекта выдавали бы информацию о параметрах среды и физиологическом состоянии объекта (частота сердечных сокращений, параметры, характеризующие двигательную активность, и др.).

Некоторые из этих задач в настоящее время, как уже отмечалось, решаются, но необходима интенсификация исследований и разработок. Важную роль при этом может сыграть реализация опыта, накопленного в биотелеметрических исследованиях наземных животных, птиц, черепах, крокодилов и ракообразных [12, 181, 191, 196, 247].

Для определения местоположения и учета рыбных скоплений во внутренних водоемах, а также повышения эффективности промысловой разведки рыбы применительно к задачам морского и океанического промысла представляется весьма перспективной комплексация исследовательских работ, проводимых методами подводной биотелеметрии, и учетных съемок методами гидроакустической рыболокации. В этом направлении пока сделаны лишь первые шаги.

Высокая экономичность и широкие возможности использования биотелеметрической аппаратуры при решении ряда дополнительных задач в сфере водопользования участков акватории очевидна [168].



Немаловажное значение для успешного развития рассмотренного нового направления в гидробиологии и инженерной биологии имеет подготовка технических и научных кадров, а также широкая информация научной общественности и специалистов различных отраслей водного хозяйства о целях, задачах, проблемах и достижениях подводной биологической телеметрии.

Широкое внедрение телеметрии в водохозяйственные исследования и практику явится еще одним важным шагом в решении проблемы охраны среды и рационального комплексного использования водных ресурсов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимова А. М. Роль органов чувств в ориентации леща, синца, плотвы и густеры Киевского водохранилища.— Вестник зоологии, 1976, № 3, с. 40—44.
2. Абросимова А. М., Васина О. Т., Гуменюк С. Б. Влияние некоторых органов чувств на дистантную ориентацию рыб.— Вестник зоологии, 1971, № 2, с. 79—80.
3. Абчук В. А., Суздаль В. Г. Поиск объектов.— М.: Советское радио, 1977.— 334 с.
4. Аграновский К. Ю. Основы теории радиоэлектронных систем морских объектов.— Л.: Судостроение, 1974.— 346 с.
5. Айзенберг А. З. Коротковолновые антенны.— М.: Связьиздат, 1962.— 815 с.
6. Астафьев Г. П., Шебшаевич В. С., Юрков Ю. А. Радионавигационные устройства и системы.— М.: Советское радио, 1958.— 863 с.
7. Бабский Е. Б., Сорин А. М., Давыдов С. Н. Приборы эндорадиозондирования.— М.: Наука, 1975.— 175 с.
8. Белоцерковский Г. Б. Антенны.— М.: Оборонгиз, 1962.— 492 с.
9. Белькович В. М., Дубровский Н. А. Сенсорные основы ориентации китообразных.— Л.: Наука, 1976.— 204 с.
10. Биологическая телеметрия/[Е. Б. Бабский, Р. М. Баевский, Е. С. Геллер и др.]; под ред. В. В. Парина.— М.: Медицина, 1971.— 263 с.
11. Биологические основы управления поведением рыб под ред. Б. П. Мантейфеля.— М.: Наука, 1970.— 302 с.
12. Биотелеметрия: Перевод с английского О. И. Ларичева и Ю. И. Шмуклер под ред. Н. А. Бернштейна и Л. А. Водолазского.— М.: Мир, 1965.— 435 с.
13. Борисенков Е. П., Романов М. А. Алгоритмы и программы статистической обработки информации на ЭВМ.— Л.: Гидрометеиздат, 1969.— 363 с.
14. Буданов В. И. К геоморфологии дельты Волги — Труды ВНИРО, 1975, т. 108, с. 44—49.
15. Вентцель Е. С. Теория вероятностей.— М.: Наука, 1964.— 576 с.
16. Вовк Ф. И. Воспроизводство запасов осетровых рыб в нижнем бьефе плотины Волжской ГЭС им. 22 съезда КПСС — Труды Волгоградского отделения ГосНИОРХа, 1965, т. II, с. 3—78.
17. Вовк Ф. И., Пашкин Л. М., Батычков Г. А. Эффективность работы рыбоподъемника Волгоградского гидроузла — Рыбное хозяйство, 1976, № 6, с. 16—17.
18. Гайдук В. В., Малинин Л. К. Информационный ультразвуковой передатчик-метка для биотелеметрических исследований.— Информационный бюллетень ИБВВ АН СССР, 1971, № 12, с. 74—78.

19. Гайдук В. В., Малинин Л. К., Поддубный А. Г. К вопросу о предотвращении ската отнерестившихся производителей осетра через турбины ГЭС.— Рыбное хозяйство, 1970, № 10, с. 13—15.
20. Гайдук В. В., Малинин Л. К., Поддубный А. Г. Определение глубины следования рыб в светлое время суток.— Вопросы ихтиологии, 1971, вып. 1, т. II, с. 167—171.
21. Гайдук В. В., Поддубный А. Г. Гидрокаппаметр для полевых измерений электропроводности, температуры и освещенности воды.— Гидробиологический журнал, 1970, т. 6, с. 113—117.
22. Голованов В. К., Поддубный А. Г. Поведение осетровых в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла.— Информационный бюллетень ИБВВ АН СССР, 1976, № 29, с. 54—56.
23. Горелик Г. С. Колебания и волны.— М.; Физматгиз. 1959.— 572 с.
24. Двухбазовые диоды в автоматике / [А. Е. Ольсевич, В. В. Михайлов, В. И. Беличенко, Г. П. Фоменко].— М.: Энергия, 1972.— 72 с.
25. Дислер Н. Н. Органы чувств системы боковой линии и их значение в поведении рыб.— М.: Изд-во АН СССР, 1960.— 310 с.
26. Зенкович А. В. Искажения частотно-модулированных колебаний.— М.: Советское радио, 1974.— 295 с.
27. Зуссер С. Г. Суточные вертикальные миграции рыб.— М.: Пищевая промышленность, 1971.— 224 с.
28. Ильина Н. И., Мишукова Т. Ф., Рождественская А. Д. Некоторые особенности влияния зарегулирования реки Туломы на основные моменты воспроизводства и численности семги.— В кн.: Материалы Всесоюзного симпозиума по биологическим основам управления поведением рыб в связи с применением рыбозащитных и рыбопропускных сооружений. М., 1971, с. 26—29.
29. Исаев А. И. О работе рыбопропускных сооружений в Советском Союзе.— В кн.: Поведение рыб в зоне гидротехнических сооружений. М., 1967, с. 43—50.
30. Казарин Ю. М., Коломенский Ю. А., Пестов Ю. К. Радиотехнические системы.— М.: Советское радио, 1968.— 496 с.
31. Камп Л. Подводная акустика: Перевод с английского М. М. Кригер под ред. С. Н. Ржевкина.— М.: Мир, 1972.— 328 с.
32. Киппер З. М., Милейко И. В. Рыбопропускные сооружения Советского Союза.— М.: Рыбное хозяйство, 1962.— 72 с.
33. Ковалевская Л. А. Энергетика движущейся рыбы.— Труды Морского гидрофизического института АН СССР, 1956, № 7, с. 161—165.
34. Кожин Н. И. Осетровые СССР и их воспроизводство.— Труды ВНИРО, 1964, т. 52, с. 21—58.
35. Кожин Н. И., Гербильский Н. Л., Казанский Б. Н. Биотехника разведения осетровых и принципиальная схема осетрового рыбоводного завода.— В кн.: Осетровое хозяйство в водоемах СССР. М., 1963, с. 29—34.
36. Козлов Л. Ф. О биологическом коэффициенте полезного действия некоторых морских рыб.— Бионика, 1970, вып. 4, с. 44—46.
37. Крыхтин М. Л. Мечение осенней кеты и горбуши в лимане р. Амур.— Вопросы ихтиологии, 1964, т. 4, вып. 2, с. 270—279.
38. Лавриненко В. Ю. Справочник по полупроводниковым приборам.— Киев: Техника, 1973.— 576 с.
39. Лаздин А. В., Протасов В. Р. Электричество в жизни рыб.— М.: Наука, 1977.— 88 с.
40. Латхи Б. П. Системы передачи информации.— М.: Связь, 1971.— 220 с.

41. Лебедев Н. В., Логвиненко Б. М., Фадеев Е. В. О возможности использования акустических колебаний для защиты молоди рыб от попадания в водозаборные сооружения.— В кн.: Поведение рыб в зоне гидротехнических сооружений. М., 1967, с. 107—108.
42. Логинов В. Н. Электрические измерения механических величин — М.: Энергия, 1976.— 104 с.
43. Малеванчик Б. С. Плавучая установка для накопления и транспортировки рыбы.— Рыбное хозяйство, 1966, № 2, с. 12—14.
44. Малинин Л. К. Участки обитания и инстинкт возвращения рыб.— Зоологический журнал, 1969, т. 48, вып. 3, с. 381—391.
45. Малинин Л. К. Использование ультразвуковых передатчиков для мечения леща и щуки.— Информационный бюллетень ИБВВ АН СССР, 1970а, № 7, с. 64—69; № 8, с. 75—78.
46. Малинин Л. К. При помощи ультразвукового передатчика.— Рыбоводство и рыболовство, 1970б, № 5, с. 10—11.
47. Малинин Л. К. Домашние участки и фактический путь рыб в речном плесе Рыбинского водохранилища.— Труды ИБВВ АН СССР, 1971, вып. 22 (25), с. 158—165.
48. Малинин Л. К. Скорости миграций рыб.— Рыбное хозяйство, 1973, № 8, с. 16—17.
49. Малинин Л. К. Скорости движения семги (*Salmo salar* L.) при анадромной миграции в пресной воде.— Зоологический журнал, 1975, т. 54, вып. II, с. 1729—1731.
50. Малинин Л. К., Лапкин В. В., Рукавицын Г. И. Чувствительность незлектрических рыб к постоянным электрическим полям.— Информационный бюллетень ИБВВ АН СССР, 1976, № 30, с. 19—21.
51. Малинин Л. К., Поддубный А. Г., Гайдук В. В. Стереотипы поведения волжского осетра в районе Саратовской ГЭС до и после зарегулирования реки.— Зоологический журнал, 1971, т. 50, вып. 6, с. 847—857.
52. Малинин Л. К., Поддубный А. Г., Свирский А. М. Поведение семги (*Salmo salar* L.) при нерестовой миграции через водохранилище.— Журнал общей биологии, 1974, т. 35, № 4, с. 645—650.
53. Мантейфель Б. П. Изучение поведения рыб в СССР.— В кн.: Поведение и рецепция рыб. М., 1967, с. 3—13.
54. Мантейфель Б. П., Наумов Н. П., Якоби В. Э. Ориентация и навигация в мире животных.— В кн.: Бионика. М., 1965, с. 245—250.
55. Матюхин В. А. Биоэнергетика и физиология плавания рыб.— Новосибирск: Наука, 1973.— 154 с.
56. Мильштейн В. В., Рожков В. В. Использование ультразвука в качестве рыбозаградителя.— Научно-техническая информация ВНИРО, 1964, вып. 12, с. 9—10.
57. Мельников В. Н. Биофизические основы промышленного рыболовства.— М.: Пищевая промышленность, 1973.— 392 с.
58. Мордухай-Болтовской Ф. Д. Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов.— В кн.: Экология организмов водохранилищ-охладителей. Л., 1975, с. 7—69.
59. Николаев А. С. Некоторые итоги изучения трасс движения взрослых лососей в Камчатском заливе.— Вопросы ихтиологии, 1977, вып. 1 (102), т. 17, с. 148—158.
60. Никоноров И. В., Кутянина Л. Г. Рыбопропускные сооружения в СССР.— Рыбное хозяйство, 1976, № 7, с. 26—32.
61. Никоноров И. В., Патсев А. Х. Влияние звукового и электромагнитных полей на поведение каспийской кильки.— Рыбное хозяйство, 1968, № 9, с. 11—12.

62. Овчинников В. В., Глейзер С. И., Галактионов Г. З. Особенности ориентации речного европейского угря *Anguilla anguilla* L. на некоторых этапах миграционного пути.— Вопросы ихтиологии, 1973, вып. 3 (80), т. 13, с. 543—553.
63. Орлов Л. В., Шабров А. А. Расчет и проектирование системы гидроакустических рыбопоисковых станций.— М.: Пищевая промышленность, 1974.— 275 с.
64. Основные особенности поведения и ориентации рыб под ред. Б. П. Мантейфеля.— М.: Наука, 1974.— 222 с.
65. Отпугивание рыб взрывом / [Л. Н. Рудаковский, Л. Н. Солодилов, В. Р. Протасов и др.].— Вопросы ихтиологии, 1970, вып. 4 (23), т. 10, с. 745—746.
66. Павлов Д. С. Оптомоторная реакция, ориентация рыб в потоке воды и некоторые вопросы устройства рыбопропускных и рыбозащитных сооружений.— В кн.: Поведение рыб в зоне гидротехнических сооружений. М., 1967, с. 51—64.
67. Павлов Д. С., Пахорук А. М. Биологический анализ работы Нижне-Тулумского рыбохода.— В кн.: Материалы Всесоюзного симпозиума по биологическим основам управления поведением рыб в связи с применением рыбозащитных и рыбопропускных сооружений. М., 1971, с. 67—70.
68. Павлов Д. С., Пахорук А. М. Биологические основы защиты рыб от попадания в водозаборные сооружения.— М.: Пищевая промышленность, 1973.— 280 с.
69. Поддубный А. Г. Некоторые особенности распределения рыбного леща в нагульный период.— Бюллетень Института биологии водохранилищ АН СССР, 1959, № 5, с. 32—36.
70. Поддубный А. Г. О локальных стадах леща в Рыбинском водохранилище.— Труды Института биологии водохранилищ АН СССР, 1960, вып. 3 (6), с. 216—226.
71. Поддубный А. Г. Некоторые результаты дистанционных наблюдений за поведением мигрирующих рыб.— В кн.: Бионика. М., 1965, с. 255—263.
72. Поддубный А. Г. Экологическая топография популяций рыб в водохранилищах.— Л.: Наука, 1971.— 312 с.
73. Поддубный А. Г., Голованов В. К., Лапкин В. В. Поведение рыб в термоградиентных условиях в зависимости от сезона года.— Информационный бюллетень ИБВВ АН СССР, 1976, № 30, с. 41—43.
74. Поддубный А. Г., Гордеев Н. А. Результаты облова открытых плесов водохранилища кольцевой сетью.— Труды ИБВВ АН СССР, 1966, вып. 10 (13), с. 229—241.
75. Поддубный А. Г., Гордеев Н. А., Пермитин И. Е. Направление движения нагульных скоплений рыб и его связь с элементами среды.— Труды ИБВВ АН СССР, 1968, вып. 16 (19), с. 202—249.
76. Поддубный А. Г., Калинин Л. К., Гайдук В. В. Опыт подледных телеметрических наблюдений за поведением зимующих рыб.— Информационный бюллетень ИБВВ АН СССР, 1970, № 6, с. 65—70.
77. Поддубный А. Г., Калинин Л. К., Гайдук В. В. Поведение семги (*Salmo salar* L.) в условиях искусственных помех Нижне-Тулумской ГЭС.— Информационный бюллетень ИБВВ АН СССР, 1971, № 10, с. 57—61.
78. Поддубный А. Г., Калинин Л. К., Свирский А. М. Особенности поведения севрюги (*Acipenser stellatus* Pallas) в условиях вынужденного задерживания под плотиной Федоровского гидроузла на р. Кубани.— Вопросы ихтиологии, 1974, вып. 5 (88), т. 14, с. 894—902.

79. Поддубный А. Г., Спектор Ю. И. Исследование миграционного поведения осетров в зоне плотин биотелеметрическим методом.— В кн.: Вопросы бионики. М., 1967, с. 491—497.
80. Плохинский Н. А. Биометрия.— М.: Изд-во МГУ, 1970.— 367 с.
81. Подлипалин Ю. Д. Способность некоторых рыб Черного моря ориентироваться на источник звука.— Вопросы ихтиологии, 1962, вып. 4 (25), т. 2, с. 721—724.
82. Протасов В. Р. Биоакустика рыб.— М.: Наука, 1965.— 207 с.
83. Протасов В. Р. Биоэлектрические поля в жизни рыб.— М.: ЦНИИТЭИРХ, 1972.— 228 с.
84. Протасов В. Р., Подлипалин Ю. Д., Круминь В. М. Роль гравитационных волн в ориентации рыб.— В кн.: Вопросы бионики. М., 1967, с. 475—491.
85. Радаков Д. В. Стайность рыб как экологическое явление.— М.: Наука, 1972.— 174 с.
86. Радиотехнические схемы на транзисторах и туннельных диодах. Под ред. Р. А. Валитова.— М.: Связь, 1972.— 164 с.
87. Ризванов Р. А. Биология нереста судака (*Lucioperca lucioperca* L.) Ладожского озера.— Вопросы ихтиологии, 1970, вып. 5 (64), т. 10, с. 819—826.
88. Романенко Е. В., Янов В. Г., Акопьян А. И. Методика исследований эхолокационного аппарата дельфина с помощью радиотелеметрической системы.— В кн.: Морфология, физиология и акустика морских млекопитающих. М., 1974, с. 153—160.
89. Рокицкий П. Ф. Биологическая статистика.— Минск: Высшая школа, 1973.— 320 с.
90. Сабуренков С. Н., Сбикин Ю. Н., Павлов Д. С. О скоростях движения рыб.— В кн.: Поведение рыб в зоне гидротехнических сооружений. М., 1967, с. 124—136.
91. Серебров Л. И. Применение количественных методов для изучения поведения донных промысловых рыб.— Рыбное хозяйство, 1974, № 9, с. 14—16.
92. Скучик Е. Основы акустики.— М.: Иностранная литература, 1958.— 617 с.
93. Сметанин М. М., Поддубный А. Г. К вероятностному описанию поведения мигрирующих рыб.— Информационный бюллетень ИБВВ АН СССР, 1973, № 18, с. 42—45.
94. Соколов В. Е., Степанов Н. С. Радиотелеметрия в экологии животных, радиопрослеживание животных.— Зоологический журнал, 1968, вып. 1, т. 47, с. 20—35; вып. 2, с. 173—186.
95. Соколов О. Н. О подводной освещенности.— Труды ВНИРО, 1958, № 36, с. 295—303.
96. Сташкевич А. П. Акустика моря. — Л.: Судостроение, 1966.— 354 с.
97. Суйков В. В., Павлов А. Т. Гидроакустическая антенная решетка.— В кн.: Вопросы электроники СВЧ. Саратов, 1976, с. 31—33.
98. Суточные ритмы питания и двигательной активности некоторых пресноводных хищных рыб/[Б. П. Мантейфель, И. И. Гирса, Т. С. Лещева, Д. С. Павлов].— В кн.: Питание хищных рыб и их взаимоотношения с кормовыми организмами. М., 1965, с. 3—90.
99. Тихий М. И., Викторov П. В. Запасы рыб и гидростроительство — М.: Пищепромиздат, 1940.— 200 с.
100. Тихомиров В. В. Биотелеметрические системы.— М.: Наука, 1974.— 233 с.
101. Труды IV Всесоюзной конференции «Биологическая и медицинская электроника».— Свердловск, 1972.— 124 с.

102. Труды Всесоюзной конференции «Проблемы радиотелеметрии в физиологии и медицине».—Свердловск, 1968.—162 с.
103. Трухачев Б. С., Удалов Н. П. Полупроводниковые тензопреобразователи.—М.: Энергия, 1968.—75 с.
104. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин.—М.: Госэнергоиздат, 1951.—688 с.
105. Тюрин А. М., Сташкевич А. П., Таранов Э. С. Основы гидроакустики.—Л.: Судостроение, 1966.—295 с.
106. Удалов Н. П. Полупроводниковые датчики.—М.: Энергия, 1965.—239 с.
107. Унгерман М. Н., Губер П. К. Техника океанологических наблюдений на поисковых и промысловых судах.—М.: Пищевая промышленность, 1973.—212 с.
108. Управляемые р—п—р—п-переключатели в аппаратуре для гидробионических исследований / [А. М. Агизим, Л. А. Кудин, В. А. Свирщев, Ю. И. Спектор].—Киев: Наукова думка, 1977.—110 с.
109. Физическая акустика. В 9-ти томах, т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А. Пер. с англ. Л. Д. Розенберг. Под ред. Мэзона У., М., «Мир», 1966, 392 с.
110. Фриш К. Из жизни пчел: Перевод с немецкого / пер. Г. И. Губина.—М.: Мир, 1966.—200 с.
111. Хаслер А. Д., Гендерсон Х. Проблемы телеметрического изучения ориентации рыб при возвращении к месту нереста.—В кн.: Биотелеметрия. М., 1965, с. 245—252.
112. Холодов Ю. А. Образование условных рефлексов на магнитное поле у рыб.—Труды Совещания по физиологии рыб, 1958, с. 82—89.
113. Холодов Ю. А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля.—М.: Наука, 1975.—207 с.
114. Хорошко П. Н., Власенко А. Д. Искусственные нерестилища осетровых рыб.—Вопросы ихтиологии, 1970, вып. 3 (62), т. 10, с. 411—419.
115. Хортон Д. У. Основы гидролокации.—Л.: Судпромгиз, 1961.—484 с.
116. Честной В. И. Суточная ритмичность траловых уловов рыбы.—В кн.: Материалы Всесоюзной конференции по вопросам изучения поведения рыб в связи с техникой и тактикой промысла. Мурманск, 1968, с. 128—144.
117. Шилов В. И., Хазов Ю. К. Размножение осетровых в Саратовском и Волгоградском водохранилищах.—Труды Саратовского отделения ГосНИОРХа, 1971, т. II, с. 52—70.
118. Шишкова Б. В. О реакциях рыбы на звук и шумовых спектрах траулера.—Рыбное хозяйство, 1958, № 3, с. 33—39.
119. Шишкова Е. В. Физические основы рыболокации.—М.: Пищепромиздат, 1963.—147 с.
120. Шмидт П. Ю. Миграции рыб.—М., Л.: ОГИЗ — Биомедгиз, 1936.—327 с.
121. Юданов К. И. Расшифровка эхограмм гидроакустических рыбопоисковых приборов.—М.: Пищевая промышленность, 1967.—116 с.
122. Alabaster I. S. Effects of heated discharges on freshwater fish in Britain. «Biol. aspects of thermal poll.», Vanderbilt Univ. Press, 1969, 354—370.
123. Andersen A. Laksen som stofinder, «Vor vider», 1965, 3.
124. Bass G. A., M. Rascovich. A device for the sonic tracking of large fishes. «Zoologica», 1965, v. 50, N 2, 75—82.
125. Batschelet E. Statistical methods of the analysis of problems in animal orientation and certain biological rhythms. Am. Inst. biol. Sci., Washington, D. C., 1965, 1—57.



126. Becker C. D. Columbia river thermal effects study: reactor effluent problems. «J. Water Poll. Control Feder», 1973, v. 45, N 5, 850—869.
127. Bercy C., Vigneron J. Rapport de fin de contrat N 055-74-E. Université Paris VII groupe de biotelemetry, 1976, 1—36.
128. Black E. C., Barrett L. Increase in levels of lactic acid in the blood of cutthroat and steelhead trout following handling and live transportation. «Canad. Fish.—Cult», 1957, 20, 13—24.
129. Black E. C., Conner A. R. Effects of MS 222 on glycogen and lactate levels in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) «J. Fish. Res. Board Canada», 1964, 21, N 6, 1539—1542.
130. Blaxter J. H. S. Swimming speeds of fish. Ann. FAO, Conference on fish behaviour, Bergen. 1967, 1—31.
131. Bulletins of Marine Biotelemetry Research Group, Japan, 1968—77, NN 1—7.
132. Carey F. G., Lawson K. D. Temperature regulation in a free swimming bluefin tuna. «Comp. Biochem. Physiol.» 1973, 44A, 375—392.
133. Carlin B. Migration of salmon. «Laxforskning inst Medd. Report», 1969, 2—4.
134. Coman P. R. The Pleasant River. «Atlant. Salmon», 1963, 3.
135. Cooper J. C., Scholz A. T. Homing of artificially imprinted steelhead (rainbow) trout (*Salmo gairdneri*). «J. Fish. Res. Board Can.», 1976, 33, N 4, Part I, 826—829.
136. Coutant C. C. Temperature, reproduction and behaviour. «Chesapeake Science», 1969, v. 10, 261—274.
137. Coutant C. C. Temperature selection by fish — a factor in power-plant impact assessments. Proc. Symp. on the Phys. and Biol. Eff. on the Env. of Cooling Systems and Thermal Disch. at Nucl. Power Stat., 1974, 575—597.
138. Craigie E. H. A preliminary experiment upon the relation of the olfactory sense to the migration of the sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka* Walb.). «Trans. Roy. Soc. Can.», 1926, v. 5, 215—224.
139. «Cromwell» studies ultrasonic tags in sonar tracking of tunas. Commer. Fish. Rev», 1968, v. 30, 10.
140. Dalen D. Forsøk med akustiske merker i Barentshavet vinteren 1975. Fiskets gang», 1975, n. 25, 422—425.
141. Deelder C. L. On the migration of the elver (*Anguilla vulgaris*) of sea. «J. Cons. perm. int. Explor. Mer», 1952, v. 18, 187—218.
142. Dill P. A. Perception of polarized light by yearling sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). «J. Fish. Res. Board Can.», 1971, 28, N 9, 1319—1322.
143. Dodson J. J., Leggett W. C., Jones R. A. The behavior of adult American shad (*Alosa sapidissima*) during migration from salt to fresh water as observed by ultrasonic tracking techniques. «J. Fish. Res. Board Can.», 1972, 29, N 10, 1445—1449.
144. Dodson J. J., Leggett W. C. Behavior of adult American shad (*Alosa sapidissima*) homing to the Connecticut River from Long Island Sound. «J. Fish. Res. Board Can.», 1973, 30, N 12, Part I, 1847—1860.
145. Dodson J. J., Leggett W. C. Role of olfaction and vision in the behavior of American shad (*Alosa sapidissima*) homing to the Connecticut river from Long Island Sound. «J. Fish. Res. Board Can.», 1974, 31, 10, 1607—1619.
146. Doi S., Imamura A., Machinaka S. Relation between migration and environment of yellowtails (*Seriola quinqueradiata*) in Toyama Bay,

based on results by use of marine biotelemetry system in 1974 and 1975.—  
«Bull Marine Biol. Res. Group» (Japan), 1977, N 7, 9—17.

147. Douglas G. P. Frequency and signal range for ultrasonic transmitters. Underwater telemetry (Newsletter), 1975, N 9, 1.

148. Elson P. F., Lauzier L. M., Zitko V. A preliminary study of salmon movements in a polluted estuary. Marine Pollution and Sea Life, 1972, 325—330.

149. Fagey D. E., McCleave J. D., Doyon G. E. Responses of Atlantic salmon parr to output of pulsed ultrasonic transmitters. «Trans. Amer. Fish. Soc.», 1977, v. 106, N 5, 489—496.

150. Frank T. H. Telemetry of the electrocardiogram of free swimming *Salmo irideus*. «IEEE Trans. Bio—Medical Engineering», 1968, v. 15, N 2, 111—114.

151. Fried S. M., McCleave J. D., Stred K. Buoyancy compensation by Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts tagged internally with dummy telemetry transmitters. «J. Fish. Res. Board Can.», 1976, v. 33, 1377—1380.

152. Gallepp G. W., Magnuson J. J. Effects of negative buoyancy on the behavior of the bluegill (*Lepomis macrochirus* Rafinesque). «Trans. Amer. Fish. Soc.», 1972, v. 101, N 3, 507—512.

153. Greer Walker M., Mitson R. B., Storeton—West. T. Trials with a transponding acoustic fish tag tracked with an electronic sector scanning sonar «Nature», London, 1971, v. 229, N 5281, 196—198.

154. Groot C. K. On the orientation of young sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) during their seaward migration out of lakes. «Behaviour», 1965, suppl., 14, 1—198.

155. Groot C., Simpson K., Todd I., Murray P. D., Buxton G. A. Movements of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in the Skeena River estuary as revealed by ultrasonic tracking. «J. Fish. Res. Board Can.», 1975, 32, N 2, 233—243.

156. Groot C., Simpson K., Turner C., Nash F. Analysis of ultrasonic tracking records of adult sockeye salmon migration in Babine lake.—Fish. Res. Board Can., Techn. report, 1972, N 335, 1—142.

157. Hara T. J. An electrophysiological basis for olfactory discrimination in Homing Salmon: a Review. «J. Fish. Res. Board Canada», 1970, 27, 3, 565—586.

158. Harden Jones F. K. Fish migration. Martin's press, London, 1968, 1—325.

159. Hart L. G., Summerfelt R. C. Surgical procedures for implanting ultrasonic transmitters in flathead catfish (*Pylodictis olivaris*) — «Trans. Amer. Fish. Soc.», 1975, v. 104, N 1, 56—59.

160. Hartt A. C., Smith L. S., Dell M. B. Tagging and sampling. Ann. Report 1965, Internat. North Pacific Fish. Comm., 1967, 72—82.

161. Hasler A. D. Homing of salmon. Underwater guideposts. Univ. Wisconsin, press Madison, Milwaukee and London, 1966, 1—155.

162. Hasler A. D., Gardella E. S., Horrall R. M., Henderson H. F. Openwater orientation of white bass (*Roccus chrysops*) as determined by ultrasonic tracking methods. «J. Fish. Res. Board Canada», 1969, 26, N 8, 2173—2192.

163. Hasler A. D., Horrall R. M. et al. Sun orientation and homing in fishes. «Limnol. Oceanogr.», 1958, v. 3, 353—361.

164. Hawkins A. D., MacLennan D. N., Urquhart G. G., Robb C. Tracking cod (*Gadus morhua* L.) in a Scottish sea loch. «J. Fish Biol.», 1974, 6, N 3, 225—236.

165. Henderson H. F., Hasler A. D., Chipman G. C. An ultrasonic transmitter for use in studies of movements of fishes. «Trans. Amer. Fish. Soc.», 1966, v. 95, N 4, 350—356.
166. Holliday F. G. T., Tytler P., Young A. H. Activity levels of trout (*Salmo trutta*) in Airthrey Loch. (Stirling) and Loch Leven (Kinross). «Proc. Roy. Soc. Edinburgh», 1974, B, 74, N 1, 315—331.
167. Ibaragi T. Electrocardiograms and their telemetry as physiological information on rainbow trout. «Bull. Marine Biotech. Res. Group» (Japan), 1970, N 3, 12—19. (Transl. ser. Fish. Res. Board Can., N 1956)
168. Ichihara T. The present state of biotelemetry research activity. «Bull. Marine Biotech. Res. Group» (Japan), 1969, N 2, 3—14. (Transl. ser. Fish. Res. Board Can., N 1936).
169. Jahn L. A. Open-water movements of the cutthroat trout (*Salmo clarki*) in Yellowstone Lake after displacement from spawnings streams. «J. Fish. Res. Board Can.», 1966, v. 23, N 10, 1475—1485.
170. Jensen A. L., Duncan R. N. Homing of transplanted Coho salmon. «Progr. Fish—Cult.», 1971, 33, N 4, 216—218.
171. Johnson J. H. Sonic tracking of adult salmon at Bonneville Dam, 1957, «Fish. Bull.», (USA), 1960, v. 60, N 176, 471—485.
172. Kajihara T., Uchida I., Shirohata S., Soma M. Tracking of rainbow trout and red sea turtles using a radio beacon. «Bull. Marine Biotelemetry Res. Group», (Japan), 1969, N 2, 14—23. (Transl. Ser. Fish. Res. Bd. Can. N 1927).
173. Kakimoto H., Murayama H. Movement of yellowtails in the coastal waters of Sado Island. «Bull. Marine Biotech. Res. Group» (Japan), 1977, N 7, 35—46.
174. Kanwisher J., Lawson K., Sundnes G. Acoustic telemetry from fish «Fish. Bull.», (USA), 1974, v 72, N 2, 251—255.
175. Kelso J. R. M. Influence of a thermal effluent on movement of brown bullhead (*Ictalurus nebulosus*) as determined by ultrasonic tracking. «J. Fish. Res. Board Can.», 1974, v. 31, N 9, 1507—1513.
176. Kelso J. R. M. Diel movement of walleye (*Stizostedion vitreum vitreum*) in West Blue Lake (Manitoba) as determined by ultrasonic tracking. «J. Fish. Res. Board Can.», 1976, v. 33, N 9, 2070—2072.
177. Kelso J. R. M. Movement of yellow perch (*Perca flavescens*) and white sucker (*Catostomus commersoni*) in a nearshore Great Lakes habitat subject to a thermal discharge. «J. Fish. Res. Board Can.», 1976, v. 33, N 1, 42—53.
178. Kendle E. R., Morris L. A. A gastric battery for fish.—«Progr. Fish.—Cult.», 1972, v. 34, 216—218.
179. Kleerecoper H. G. Olfaction in fishes. Indiana University Press. Bloomington, London, 1969, 1—222.
180. Knight A. E., Marancik G. Monitoring movements of juvenile anadromous fish of radiotelemetry.—«Progr. Fish.—Cult.», 1977, v. 39, N 3, 148—150.
181. Koo T. S. Y., Wilson J. S. Sonic tracking striped bass in the Chesapeake and Delaware Canal. «Trans. Amer. Fish. Soc.», 1972, v. 101, N 3, 453—462.
182. Kroll J. C., Clark D. R., Albert J. W. Radiotelemetry for studying thermoregulation in free — ranging snakes. «Ecology», 1973, 54, N 2, 454—456.
183. Kuiper J. W. The microphonic effect of the lateral line organ. Gröningen the Netherlands Biophysical Group. Naturvikingundig Lab. 1956. 1—5.

184. Kuroki T., Kawaguchi K., Sakamoto W., Watanabe H. A new telemetric apparatus to detect fish location and its surrounding water temperature. «Bull. Jap. Soc. Sci. Fish», 1971, v. 37, 964—972.
185. Leggett W. C., Jones R. A. Net avoidance behaviour in American shad (*Alosa Sapidissima*) as observed by ultrasonic tracking techniques. «J. Fish. Res. Board Can.», 1971, v. 28, N 8, 1167—1171.
186. Liscom K. L. Sonic tags in sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) give travel time through metropolitan waters.—«Marine Fish. Rev.», 1973, v. 35, N 9, 38—41.
187. Lonsdale E. M. Radio telemetry for tracking and EKG studies of fresh water fish. Proc. 49th Annu. Conf. West. Assoc. State game and Fish Commiss., Jackson Lake Lodge, Wyo., 1969, 222—224.
188. Lonsdale E. M., Baxter G. T. Design and field tests of a radio—wave transmitter for fish tagging. «The Progr. Fish—Cult.», 1968, v. 30, N 1, 47—52.
189. Lonsdale E. M., Dunmire I., Brown S. A transistorized self pulsing oscillator for telemetry. Proc. National. Telem. Conf. Los Angeles, 1964, Section 2.
190. Luke D. M., Pincock D. G., Stasko A. B. Pressure-sensing ultrasonic transmitter for tracking aquatic animals.—«J. Fish. Res. Board Can.», 1973, v. 30, 1402—1404.
191. Lund W. A., R. C. Lockwood Jr. Sonic tag for large decapod crustaceans. «J. Fish. Res. Bd. Canada», 27, 1147—1151.
192. Machinaka S. Result of behavioral study of a yellowtail in Toyama Bay by a biotelemetry system. «Bull. Marine Biotel. Res. Group» (Japan), 1977, N 7, 3—8.
193. Madison D. M., Horrall R. M., Stasko A. B., Hasler A. D. Migratory movements of adult sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in coastal British Columbia as revealed by ultrasonic tracking. «J. Fish. Res. Board Can.», 1972, v. 29, 1025—1033.
194. Madison D. M., Scholz A. T. et al. Olfactory hypotheses and salmon migration: a synopsis of recent findings. «Fish. Res. Board Can.», 1973, Rept 414, 1—35.
195. Magnuson J. J. Swimming activity of the scombrid fish *Euthynnus affinis* as related to search for food. FAO Fish Repts., 1969, v. 2, N 62, 439—451.
196. Martin H., Evans W. E., Bowers C. A. Methods for radio tracking marine mammals in the open sea. Proc. IEEE Eng. Ocean Environ, 1971, 44—49.
197. Mann H. Über das Rückkehrmögen verpflanzter Flub. Aale. Arch. «Fischereiwissenschaft.», 1964, Bd. 15, 3, 177—185.
198. McCleave J. D., Homing and orientation of cutthroat trout (*Salmo clarki*) in Yellowstone Lake with special reference to olfaction and vision. «J. Fish. Res. Board Can.», 1967, v. 24, N 10, 2011—2044.
199. McCleave J. D., Fried S. M., Towl A. K. Daily movements of shortnose sturgeon (*Acipenser Brevirostrum*) in a Maine estuary. «Copeia», 1977, N 1, 149—157.
200. McCleave J. D., Horrall R. M. Ultrasonic tracking of homing cutthroat trout (*Salmo clarki*) in Yellowstone Lake. «J. Fish. Res. Board Can.», 1970, 27, N 4, 715—730.
201. McCleave J. D., LaBar G. W. Further ultrasonic tracking and tagging studies of homing cutthroat trout (*Salmo clarki*) in Yellowstone Lake. «Trans. Amer. Fish. Soc.», 1972, 101, N 1, 44—54.

202. McCleave J. D., Bommel S. A., Cathcart C. L. Weak electric and magnetic fields in orientation. «Ann. N. Y. Acad. Sci.», 1971, 188, 270—282.
203. McCleave J. D., Stred K. A. Effect of dummy telemetry transmitters on stamina of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. «J. Fish. Res. Board Can.», 1975, v. 32, N 4, 559—563.
204. Miller R. B. Movements of cutthroat trout after different periods of retention upstream and downstream from their homes. «J. Fish. Res. Board Can.», 1954, v. 11, 550—558.
205. Milton R. B. and Stovetson-West T. J. A transponding acoustic fish tag. «The Radio and Electr. Eng.», 1971, 11, 483—489.
206. Monan G. E. Sonic tracking—a scientific assist to steelheading in ice Harbor Reservoir. «Salmon Trout Steelheader», sept., 1971, Oregon, 16—18.
207. Monan G. E., Johnson J. H., Esterberg G. F. Electronic tags and related tracking techniques aid in study of migrating salmon and steelhead trout in the Columbia River basin. «Mar. Fish. Rev.», 1975, 37, N 2, 9—15.
208. Moriarty B. G. Movements of Salmon around Ireland, X. From the north Mayo Coast (1962—64). «Proc. the Royal Irish Acad.», 1968, v. 66, S. B. N 1, 1—7.
209. Murray R. W. Temperature receptors. «Advances in comp. Physiol. and Biochim.», 1, 1962, 117—171.
210. Nomura S., Ibaraki T., Shirahata S. Electrocardiogram of the rainbow trout and its radio transmission. «Japan» J. Veterin Sci., 1969, v. 31, N 3, 135—147.
211. Novotny A., Esterberg G. A 132-kilocycle sonic fish tag. «Progr. Fish.—Cult.», 1962, v. 7, 139—141.
212. Nyman L. Some effects of temperature on eel (*Anguilla*) behaviour. «Rept. Inst Freshwater Res. Drottningholm». 1972, N 52, 90—102.
213. Nyman L. Behaviour of fish influenced by hotwater effluents as observed by ultrasonic tracking. «Rept. Inst. Freshwater Res. Drottningholm», 1975, N 54, 63—74.
214. Olla B. L., Bejda A. J., Martin A. D. Daily activity, movements, feeding, and seasonal occurrence in the tautog (*Tautoga onitis*). «Fish. Bull.», (USA), 1974, v. 72, N 1, 27—35.
215. Pride I. G., Young A. H. The ultrasonic telemetry of cardiac rhythms of wild brown trout (*Salmo trutta*) as an indicator of bio-energetics and behaviour. «J. Fish. Biol.», 1977, v. 10, N 4, 299—318.
216. Proceedings of the National Telemetry Conference. Los Angeles, USA, 1964.
217. Proceedings of the National Telemetry Conference. San Francisco, USA, 1967.
218. Rommel S. A., McCleave J. D. Sensitivity of American eels (*Anguilla rostrata*) and Atlantic Salmon (*Salmo salar*) to Weak Electric and Magnetic Fields. «J. Fish. Res. Board Can.», 1973, v. 30, N 5, 657—663.
219. Rakovich B. D. A 5—MHZ switching multivibration using a complementary pair of transistor. «The Radio and Electr. Eng.», 1968, 5.
220. Saila S. B., Shappy K. A. Random movement and orientation in Salmon migration. «J. Cons. perm. Intern. Expl. Mer.», 1963, v. 28, N 1, 153—166.
221. Scholz A. T., Cooper I. S., Madison D. M. et al. Olfactory imprinting in coho salmon: behavioral and electrophysiological evidence. «Proc. 16th Conf. Great. Lakes Res. Huron, Ohio, 1973», Ann. Arbor, 1973, 143—153.

222. Schuijff A., Siemelink M. E. The ability of cod (*Gadus morhua*) to orient towards a sound source. «Experientia», 1974, v. 30, N 7, 773—775.

223. Schwassmann H. O. Biological rhythms. «Fish physiology». N. Y., London, Acad. Press, 1971, 371—428.

224. Shepherd B. G. Transmitter attachment and fish behaviour. «Underwater telemetry (Newsletter)», 1973, 5, 8—11.

225. Shepherd B. G. Activity localization in coastal cutthroat trout (*Salmo clarki clarki*) in a small bog lake. «J. Fish. Res. Board Can.», 1974, v. 31, N 7, 1246—1249.

226. Soichiro S. Effect of externally attached sonic tags on fish behavior. «Bull. Marine Biol. Res. Group» (Japan), 1971, N 4, 3—12. (Transl. ser. Fish. Res. Board Can., N 2304).

227. Soma M., Ichikawa K., Nakamura Y. The development of pressure sensor element for bio—telemetry. «Bull. Marine Biol. Res. Group» (Japan), 1973, N 5, 21—30.

228. Soma M., Ichikawa K., Nakamura Y. et al. Antennas for biotelemetry and their propagation characteristics. «Bull. Marine Biol. Res. Group» (Japan), 1969, N 2, 23—31. (Transl. ser. Fish. Res. Board Can., N 1928).

229. Standora E. A. A multichannel transmitter for monitoring shark behavior at sea. «Underwater telemetry Newsletter», 1972, 2(1), 1—8.

230. Stasko A. B. Review of field studies on fish orientation. «Ann. N. Y. Acad. Sci.», 1971, v. 188, 12—29.

231. Stasko A. B. Long—term transmitter retention. «Underwater telemetry Newsletter», 1973, 5, 4—5.

232. Stasko A. B. Progress of migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*) along an estuary, observed by ultra—sonic tracking. «J. Fish. Biol.», 1975, v. 7, N 3, 329—338.

233. Stasko A. B. Tracking of cod. «Underwater telemetry Newsletter», 1976, N 10, 14—15.

234. Stasko A. B., Horrall R. M., Hasler A. D., Stasko D. Coastal movements of mature Fraser River pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) as revealed by ultrasonic tracking. «J. Fish. Res. Board Can.», 1973, 30, N 9, 1309—1316.

235. Stasko A. B., Polar S. M. Hydrophone and bow-mount for tracking fish by ultrasonic telemetry. «J. Fish. Res. Board. Can.», 1973, 10, 119—121.

236. Stasko A. B., Rommel S. A. Jr. Ultrasonic tracking of Atlantic salmon and eels. ICES (FAO) ICNAF Symp. on Acous. Meth. in Fish. Res. Bergen, 1973, 1—11.

237. Stasko A. B., Rommel S. A. Ultrasonic tracking of Atlantic salmon and eels. «Papp. et proc.—verb reun. Cons int. exp. mer.», 1977, v. 170, 36—40.

238. Stewart V. N. Ultrasonic tracking of Atlantic sailfish. «Underwater telemetry Newsletter», 1976, N 10, 5—6.

239. Telemetry symposia. «Underwater telemetry Newsletter», 1975, N 9, 7—8.

240. Templeton W. L., Coutant C. C. Studies on the biological effects of thermal discharges from nuclear reactors to the Columbia river at Hanford. «Environmental aspects of nuclear power stations». Vienna, 1971, 591—614.

241. Tesch F. W. Versuche zur telemetrischen Verfolgung der Laichwanderung von Aalen (*Anguilla anguilla*) in der Nordsee. «Helgoländ. Wiss. Meeresuntersuch.», 1972, Bd. 23, N 2, 165—183.
242. Tesch E. W. Influence of geomagnetism and salinity on the directional choice of eels. «Helgoländ. Wiss. Meeresuntersuch.», 1974, Bd. 26, N 3—4, 382—395.
243. Tesch E. W. Speed and direction of silver and yellow eels (*Anguilla anguilla*) released and tracked in the open North Sea. «Ber. Dtsch. wiss. Kom. Meeresforsch.», 1974, a, v. 23, N 2, 181—197.
244. Tesch E. W. Migratory behaviour of displaced homing yellow eels (*Anguilla anguilla*) in the North Sea, «Helgoländ. Wiss. Meeresuntersuch.», 1975, Bd. 27, N 2, 190—198.
245. Tesch E. W. Tracking of silver eels (*Anguilla anguilla*) in different shelf areas of the Northeast Atlantic.—Symp. on eel res. and manag., ICES / EIFAC, 1977, N 29, 1—32.
246. Tesch E. W. and Lelek A. Directional behaviour of transplanted stationary and migratory forms of the eel (*Anguilla anguilla*) in a circular tank. «Netherlands Journal Sea Research», 1973, 7, 46—52.
247. Stasko A. B., Buerkle U. Underwater noise from boats. Underwater telemetry (Newsletter), 1975, N 9, 8—9.
248. Trefethen P. S. Sonic fish tracking. «Spec. Publ. Intern. Commis. Northwest, Atlant. Fish», 1963, v. 4, 81—83.
249. Trefethen P. S., Dudley J. W., Smith M. R. Ultrasonic tracer follows tagged fish. «Electronics», 1957, v. 30, 156—160.
250. Trefethen P., Sutherland D. Passage of adult chinook salmon through Brownlee reservoir, 1960—62. «Fish. Bull.» (USA), 1968, v. 67, N 1, 35—45.
251. Uenoyama K. Behavioral study of yellowtails in Wakasa Bay by biotelemetric technique. «Bull. Marine Biol. Res. Group» (Japan), 1977, N 7, 19—34.
252. Underwater telemetry Newsletter. Tracking aquatic animals. 1971—76, NN 1—10 (Canada, New Brunswick), 1976—77, NN 11—12 (USA, Oak Ridge).
253. University of Minnesota Workshop on underwater telemetry and its applications to U. S. Atomic Energy commission problems. «Underwater telemetry Newsletter», 1975, N 8, 1—10.
254. Young A. H., Tytler P., Holliday F. G. T. New developments in ultrasonic fish tracking. «Proc. Roy. Soc. Edinburgh», 1976, V. B. 75, N 3, 145—155.
255. Young A. H., Tytler P., Holliday F. G. T., MacFarlane A. A small sonic tag for measurement of locomotor behavior in fish. «J. Fish. Biol.», 1972, v. 4, N 1, 57—65.
256. Yuen H. S. H. Behavior of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) as determined by tracking with ultrasonic devices. «J. Fish. Res. Board Can.», 1970, v. 27, N 11, 2071—2079.
257. Warden R. L., Lorio W. J. Movements of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) in impounded waters as determined by underwater telemetry. «Trans. Amer. Fish. Soc.», 1975, N 4, 696—702.
258. Wardle C. S., Kanwischer J. W. The significance of heart rate in free swimming cod (*Gadus morhua*): some observations with ultrasonic tags. «Marine Behav. Physiol.», 1974, v. 2, 311—324.
259. Waterman T. H., Forward R. B., Jr. Field demonstration of polarotaxis in the fish (*Zenarchopterus*), «J. Exp. Zool.», 1972, v. 180, N 1, 33—54.



260. Webb P. W. The swimming energetics of trout. II. Oxygen consumption and swimming efficiency. «J. Exp. Biol.», 1971, v. 55, N 2, 521—540.
261. Weintraub M. J., MacKay R. S. Respiratory and heartbeat synchrony studied by telemetry in the trout (*Salmo gairdneri*). «Copeia», 1975, N 1, 78—85.
262. Westin L., Nyman L. Activity, orientation and migration of Baltic eels. «ICES/EIFAC, Symp. eel research and manag.», 1977, N 31, 1—14.
263. Winn H., Salmon M. and Roberts N. Sun — compass orientation by parrot fishes. «Z. Tierpsychol.», 1964, Bd. 21, N 7, 798—812.
264. Winters G. H. Estimates of tag extrusion and initial tagging mortality in Atlantic herring (*Clupea harengus harengus*) released with abdominally inserted magnetic tags. «J. Fish. Res. Board Can.», 1977, v. 34, 354—359.
265. Ziebell C. B. Ultrasonic transmitters for tracking channel catfish. «Prog. Fish—Cult.», 1973, v. 35, N 1, 28—32.
266. Zimmerman M. A., McCleave J. D. Orientation of elvers of American eels (*Anguilla rostrata*) in weak magnetic and electric fields. «Helgoländ. Wiss. Meeresuntersuch.», 1975, Bd. 27, N 2, 175—189.

## BIOTELEMETRY IN FISHERIES RESEARCH AND PRACTICE

*Poddubny A. G., Malinin L. K., Spector Yu. I.*

In this book new methods of ichthyological research are discussed which giving telemeter information about fishes location in space, their physiological indices, factors of environment tracks, speeds and rhythms of swimming. The subject of underwater biotelemetry is considered here and characteristics of radio, ultrasound and combined telemetrical systems, sensors, devices, receivers and types bearing finger are described.

Much attention is paid to organization and carrying out biotelemetrical research of fishes, peculiarities of computation and analysis of paths, speeds and rhythms of fishes swimming.

Data on speed and rhythms of swimming of different fishes species in various ecological situations are given. Possibilities of use of new methods for study of migrators behaviour in the region of hydraulic structures as well as in fishing industry and fishculture are stated.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДВОДНОЙ БИОТЕЛЕМЕТРИИ</b>	<b>7</b>
<hr/>	
Физические основы подводной биотелеметрии . . . . .	7
Принципы построения подводных биотелеметрических систем . . . . .	7
Гидроакустические линии связи . . . . .	12
Электромагнитные линии связи . . . . .	20
Современные системы подводной биотелеметрии . . . . .	24
Передачики-метки . . . . .	25
Приемная аппаратура . . . . .	51
Организация и проведение биотелеметрических исследований . . . . .	56
Подготовка полигона . . . . .	56
Отлов и мечение рыб . . . . .	57
Определение координат меченой рыбы . . . . .	61
Ход наблюдений . . . . .	75
Обработка данных биотелеметрических наблюдений . . . . .	77
<b>ПРИМЕНЕНИЕ БИОТЕЛЕМЕТРИИ В РЫБНОМ ХОЗЯЙСТВЕ</b>	<b>84</b>
<hr/>	
Ориентация рыб . . . . .	84
Методические особенности натурных исследований ориентации рыб . . . . .	85
Биотелеметрические исследования ориентации рыб в водоемах различного типа . . . . .	89
Влияние температуры на ориентационное поведение рыб . . . . .	107
Трассы, скорость и ритмика движения рыб . . . . .	113
Закономерности перемещений мигрирующих рыб . . . . .	113
Скорости и ритмика движения рыб . . . . .	121
Особенности поведения рыб во время размножения, нагула и зимовки . . . . .	129
Поведение рыб в зоне орудий лова . . . . .	139
Поведение рыб в зонах гидротехнических сооружений . . . . .	144
Документация поведения рыбы в нижнем бьефе гидроузла . . . . .	146
Особенности поведения рыбы в верхнем бьефе гидроузла . . . . .	166
Заключение . . . . .	172
Список использованной литературы . . . . .	175

## CONTENTS

Preface . . . . .	3
<b>TECHNICAL ASPECTS OF UNDERWATER BIOTELEMETRY . . . . .</b>	<b>7</b>
<hr/>	
Physical basis of underwater biotelemetry . . . . .	7
Principles of construction of underwater biotelemetrical systems . . . . .	7
Hydroacoustic link . . . . .	12
Radio link . . . . .	20
Modern systems of underwater biotelemetry . . . . .	24
Transmitters — tags for fishes . . . . .	25
Receivers . . . . .	51
Organization and realization of biotelemetrical research . . . . .	56
Preparation of research region . . . . .	56
Fishes catching and tagging . . . . .	57
Determination of coordinates of position of marked fishes . . . . .	61
Course of observation . . . . .	75
Treatment of data on biotelemetrical observation . . . . .	77
<b>APPLICATION OF BIOTELEMETRY IN FISHERY . . . . .</b>	<b>84</b>
<hr/>	
Orientation of fishes . . . . .	84
Methodical peculiarities of field research of fishes orientation . . . . .	85
Biotelemetrical research of fishes orientation in reservoirs of various types . . . . .	89
Temperature effect on orientational behaviour of fishes . . . . .	107
Paths, speeds and rhythms of fishes movements . . . . .	113
Regularities of movement of migrating fishes . . . . .	113
Speeds and rhythms of fishes movements . . . . .	121
Peculiarities of fishes behaviour while reproduction, foraging excursion and wintering . . . . .	139
Behavior of fishes in zones of fishing gear . . . . .	139
Behaviour of fishes in regions of hydraulic structures . . . . .	144
Behaviour of fishes in the tailwater . . . . .	146
Peculiarities of fishes behaviour in the headwater . . . . .	166
Conclusion . . . . .	172
Literature cited . . . . .	175

АРТУР ГЕОРГИЕВИЧ ПОДДУБНЫЙ  
ЛЕВ КОНСТАНТИНОВИЧ МАЛИНИН  
ЮРИЙ ИЗРАЙЛЕВИЧ СПЕКТОР

## БИОТЕЛЕМЕТРИЯ В РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ НАУКЕ И ПРАКТИКЕ

Редактор Л. Л. Кожина  
Художник С. Н. Орлов  
Художественный редактор  
В. В. Водзинский  
Технический редактор

Г. Г. Хацкевич  
Корректоры Е. А. Постникова,  
М. А. Шегал

ИБ № 641

Сдано в набор 12.07.78. Подписано в печать 19.03.79. Т-06807. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 1. Литературная гарнитура. Высокая печать. Объем 12 печ. л. Усл. п. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,71. Тираж 730 экз. Заказ 1678. Цена 85 к.

Издательство «Пищевая промышленность»,  
113035, Москва, М-35, 1-й Кадашевский пер., 12.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

Подводная биотелеметрия открывает путь к познанию многих сторон жизнедеятельности водных животных, изучение которых еще совсем недавно казалось мало осуществимым.

В ихтиологии с помощью биотелеметрии, дающей четкое представление о трассах, ритмике и скорости движения отдельных особей и групп меченых рыб, исследуются их миграционные циклы, механизмы ориентации, чувствительность и реакции на природные и искусственно вводимые раздражители, устойчивость ареалов, закономерность распределения в водоеме, динамика, возрастные и видовые особенности физиологического состояния.

Многоканальные передатчики-метки позволяют одновременно получить информацию о нескольких параметрах поведения рыбы и состоянии окружающей ее среды. Меченые рыбы «видны» на экране гидро-

локатора: они успешно выполняют роль разведчиков скоплений особей своего и других видов. Это облегчает поиск скоплений и определение их плотности.

Весьма эффективным оказалось применение биотелеметрии при изыскании новых средств рыбопропуска и рыбозащиты.

Разработка миниатюрных меток-приемоответчиков, имеющих обратную связь, открывает предпосылки для направленного воздействия на рыбу, т. е. управления ее поведением на расстоянии.

Биотелеметрическая аппаратура способна круглогодично работать в водоемах любого типа. Кроме биотелеметрической информации с ее помощью удобно с нужным интервалом времени получать данные о состоянии и микроструктурных изменениях гидрофизических и химических параметров водных масс в водоеме и на биотопе.