

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**



**Южное отделение Института океанологии  
им. П.П. Ширшова**

**P.P. Shirshov Institute of Oceanology  
South Branch**

# **Dynamical Processes In the Sea Nearshore Zone**

Edited by

Prof. R.D. Kos'yan (SB SIO RAS),

Dr. I.S. Podymov (SB SIO RAS),

Dr. N.V. Pykhov (SIO RAS)

**Moscow  
Scientific World  
2003**

# **Динамические процессы береговой зоны моря**

Под редакцией

доктора географических наук Р.Д. Косьяна (ЮО ИО РАН),  
кандидата технических наук И.С. Подымова (ЮО ИО РАН),  
кандидата физ.-мат. наук Н.В. Пыхова (ИО РАН)

**Москва**  
**Научный мир**  
**2003**

УДК 551.24  
ББК 26.222.5  
Д 46

Д 46 **Динамические процессы береговой зоны моря.** (Под ред. Р.Д. Косьяна, И.С. Подымова, Н.В. Пыхова). – М.: Научный мир, 2003. – 320 с.

**ISBN 5-89176-197-1**

**ББК 26.222.5**

В монографии представлены результаты натуральных и теоретических исследований гидродинамических процессов и динамики наносов в прибрежно-шельфовой зоне.

Приведены статистические закономерности и методы прогноза ветрового волнения полученные по результатам непрерывных измерений. Рассмотрены вопросы трансформации групповой структуры нерегулярных волн, механизмы генерации и типы инфрагравитационных волн в береговой зоне моря; представлены особенности циркуляции вод, формирование и параметры антициклонических вихрей и статистические характеристики течений на шельфе Черного моря. Рассмотрены основные закономерности и модели прогноза вдольбереговых, компенсационных и разрывных течений, генерируемых штормовыми волнами. Выявлены основные механизмы и временные масштабы взвешивания наносов нерегулярными волнами в зоне их деформации и разрушения. Приведены модели для расчета временной изменчивости концентрации взвешенных наносов при нерегулярном волнении и различной шероховатости дна, которые позволяют прогнозировать эволюцию аккумулятивного подводного склона как в пределах длительности отдельных штормов, так и в масштабах нескольких десятилетий с учетом изменения уровня моря.

Модели, методы расчетов и данные натуральных наблюдений могут быть использованы при прогнозе воздействия антропогенных факторов на окружающую среду, а также при постановке изысканий для решения прикладных задач в прибрежной зоне моря.

Монография будет интересна и полезна широкому кругу научных и инженерно-технических работников: океанологам, гидрофизикам, геологам, гидротехникам, исследователям, занимающимся вопросами охраны окружающей среды. Книга также будет полезна аспирантам и студентам соответствующих специальностей.



**Публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-05-78017)**

**Dynamical Processes In the Sea Nearshore Zone.** (Edited by R.D. Kos'yan, I.S. Podymov, N.V. Pykhov). – М.: Scientific World, 2003. – 320 p.

The monograph represents the results of field and theoretical study of hydro- and sediment dynamics in the coastal zone of the sea. The statistical regularities and prognostic methods for the wind waves are obtained using continuous long-period buoy measurements. The transformation of the group structure of irregular waves as well as generation and types of infra-gravitational waves in a near-shore zone are investigated. On the Black Sea shelf, water circulation including generation and parameters of anti-cyclonic eddies, and statistical characteristics of currents are studied using field measurements. The prognostic models for undertow, longshore and rip currents generated by storm waves in the near-shore zone are developed. The mechanisms and time scales of sediment pick-up by irregular waves in the shoaling and breaking waves are studied. The models of suspended sediment distribution over flat and rippled bed under irregular waves is represented. The morphodynamic models taking into account sea level changes enable to predict the evolution of an accumulative beach profile for the time scale range from separate storm duration to some decades.

The presented models, computing methods and observational data can be useful in relation to prediction of anthropogenic impact on the environment, and to practical topics like engineering survey in coastal zone.

The book is intended for researchers and engineers in the fields of oceanology, hydrophysics, geology, hydraulic engineering, environment control.



**Published at financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant № 02-05-78017)**

**ISBN 5-89176-197-1**

© Институт океанологии РАН, 2003.

© Научный мир, 2003.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

<b>Введение</b> (Р.Д.Косьян, Н.В.Пыхов) .....	11
<b>Глава 1. Состав и характеристика аппаратуры для натурных измерений</b> .....	15
1.1. Турбидиметр (Р.Д. Косьян, И.С.Подымов) .....	15
1.2. Электромагнитный датчик скорости водного потока (Р.Д. Косьян, И.С.Подымов) .....	27
1.3. Датчик уровня донных отложений (Р.Д. Косьян, И.С.Подымов) .....	34
1.4. Волновой буй (Р.Д.Косьян, О.В.Пушкарев) .....	43
1.5. Методы и средства исследования циркуляции вод и течений (В.Г.Кривошея, ЮО ИО РАН) .....	44
<b>Глава 2. Краткая характеристика натурных экспериментов и полигонов</b> (Р.Д.Косьян, И.С.Подымов) .....	47
2.1. Эксперимент “Новомихайловка - 93” (Черное море) .....	48
2.2. Эксперимент “Norderney-94” (Северное море) .....	51
2.3. Эксперимент “Ebro Delta - 96” (Средиземное море) .....	58
2.4. Эксперимент “Новосибирск- 98” (Обское море) .....	60
2.5. Эксперимент “Новомихайловка – 99” (Черное море) .....	63
2.6. Южная Озереевка (В.Г.Кривошея, ЮО ИО РАН) .....	67
<b>Глава 3. Исследование и моделирование процессов трансформации нерегулярных волн</b> .....	70
3.1. Результаты измерений параметров поверхностных волн с помощью буя в районе г. Геленджика (Б.В.Дивинский, ЮО ИО РАН) .....	70
3.2. Основные механизмы генерации и типы инфрагравитационных волн в береговой зоне моря (С.Ю.Кузнецов, ИО РАН) .....	91
3.3. Трансформация групповой структуры волн в прибрежной зоне (С.Ю.Кузнецов, ИО РАН, Я.В. Сапрыкина, ИВЭП СО РАН) .....	92
3.4. Исследование групповой структуры волн в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджика (С.Ю.Кузнецов, ИО РАН, Я.В. Сапрыкина, ИВЭП СО РАН, Б.В.Дивинский, ЮО ИО РАН) .....	117
<b>Глава 4. Натурные исследования пространственно-временной изменчивости течений прибрежно-шельфовой зоны черноморского побережья России</b> (В.Г.Кривошея, ЮО ИО РАН) .....	131
4.1. Общая характеристика циркуляции вод .....	131
4.2. Анализ результатов натурных экспериментов .....	135
4.3. Роль течений и циркуляции вод в экологии российского шельфа Черного моря .....	148

<b>Глава 5. Натурные исследования и математическое моделирование вдоль береговых, компенсационных и разрывных течений</b> ( <i>И.О.Леонтьев, ИО РАН</i> ) .....	152
5.1. Общая характеристика прибрежной циркуляции .....	152
5.2. Уравнения прибрежной динамики .....	155
5.3. Коэффициент донного трения для прибрежного течения .....	157
5.4. Коэффициент горизонтального обмена .....	160
5.5. Вдольбереговое течение .....	164
5.6. Компенсационное противотечение .....	170
5.7. Разрывное течение .....	176
<b>Глава 6. Закономерности распределения взвешенных наносов в береговой зоне моря во время штормов</b> ( <i>Р.Д.Косьян, С.М.Анцыферов, ИО РАН</i> ) .....	180
6.1. Общая постановка задачи .....	180
6.2. Обобщение результатов исследований распределения взвешенных наносов в условиях шторма в бесприливном море .....	181
6.3. Теоретические модели движения взвешенных наносов .....	189
6.4. Расчет вертикального профиля концентрации наносов, взвешенных волнами .....	191
6.5. Задачи динамики песчаных микроформ, образованных волнением .....	192
6.6. Взвешивание песчаных наносов на временных масштабах поверхностных волн .....	195
6.7. Результаты исследования процессов взвешивания наносов в приливном море .....	197
<b>Глава 7. Натурные исследования механизмов и временных масштабов взвешивания наносов нерегулярными волнами</b> ( <i>Н.В.Пыхов</i> ) .....	123
7.1. Слабое взаимодействие волн с дном: слабдеформированные, неразрушенные волны, рифельное дно .....	123
7.2. Сильное взаимодействие волн с дном: сильнодеформированные, неразрушенные волны, плоское дно .....	123
7.3. Сильное взаимодействие волн с дном: разрушающиеся волны .....	234
7.4. Обсуждение результатов и выводы .....	345
<b>Глава 8. Моделирование пространственно-временной изменчивости взвешивания и транспорта наносов</b> .....	123
8.1. Конвективно-диффузионная модель взвешивания наносов нерегулярными волнами над рифельным дном ( <i>Н.В.Пыхов, П.Л.Воробьев ИО РАН</i> ) .....	123
8.2. Моделирование временной изменчивости взвешивания наносов нерегулярными волнами над плоским дном ( <i>Н.В.Пыхов, П.Л.Воробьев ИО РАН</i> ) .....	123
8.3. Влияние особенностей групповой структуры волн на транспорт взвешенных наносов ( <i>С.Ю.Кузнецов, ИО РАН</i> ) .....	123
8.4. Оценка применимости энергетического подхода для расчета поперечного транспорта взвешенных наносов ( <i>Н.В.Пыхов, С.Ю.Кузнецов, ИО РАН</i> ) .....	123

---

<b>Глава 9. Моделирование морфодинамики подводного склона и береговой линии под действием нерегулярных штормовых волн и течений (И.О.Леонтьев, ИО РАН) .....</b>	<b>123</b>
9.1. Штормовые деформации профиля берегового склона .....	123
9.2. Профиль равновесия .....	123
9.3. Штормовые деформации поверхности берегового склона .....	123
9.4. Долгосрочный морфодинамический прогноз .....	123
<b>Глава 10. Механизмы переноса загрязняющих веществ и тонкодисперсных осадков из береговой зоны на шельф и континентальный склон (Н.В.Пыхов) .....</b>	<b>123</b>
10.1. Краткая характеристика источников и содержания загрязняющих веществ в прибрежно-шельфовой зоне .....	123
10.2. Основные факторы, определяющие перенос загрязняющих веществ и тонкодисперсных осадков на шельфе .....	123
10.3. Оценка эрозии и переноса донных осадков на шельфе .....	123
<b>Глава 11. Перенос и рассеивание загрязняющих веществ в бухтах (на примере Геленджикской бухты) (Н.В.Есин, ЮО ИО РАН) .....</b>	<b>123</b>
11.1. Источники поступления ЗВ и краткая характеристика экологической ситуации .....	123
11.2. Моделирование циркуляции воды и переноса ЗВ в Геленджикской бухте .....	123
<b>Заключение (Р.Д.Косьян, Н.В.Пыхов) .....</b>	<b>123</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>123</b>

---

## CONTENTS

---

---

<b>Introduction</b> (R.D.Kos'yan, N.V.Pykhov) .....	11
<b>Chapter 1. Field measurements equipment set-up</b> .....	15
1.1. Turbidimeter (R.D.Kos'yan, I.S.Podymov) .....	15
1.2. Electro-magnetic current meter (R.D.Kos'yan, I.S.Podymov) .....	27
1.3. Bottom sediment level gauge (R.D.Kos'yan, I.S.Podymov) .....	34
1.4. Wave buoy (R.D.Kos'yan, O.V.Pushkaryov, SB SIO RAS) .....	43
1.5. Methods and means for water circulation and currents study (V.G.Krivosheya, SB SIO RAS) .....	44
<b>Chapter 2. Brief characteristics of field experiments and testing grounds</b> (R.D.Kos'yan, I.S.Podymov) .....	47
2.1. "Novomikhailovka - 93" (Black Sea) .....	48
2.2. "Norderney-94" (North Sea) .....	51
2.3. "Ebro Delta - 96" (Mediterranean Sea) .....	58
2.4. "Novosibirsk- 98" (Obsskoye Sea) .....	60
2.5. "Novomikhailovka - 99" (Black Sea) .....	63
2.6. Yuzhnaya Ozereyevka (Black Sea) (V.G.Krivosheya, SB SIO RAS) .....	67
<b>Chapter 3. Study and modeling of irregular waves transformation processes</b> .....	70
3.1. Results of measuring of surface waves parameters with help of buoy in Gelendzhik area (B.V.Divinski, SB SIO RAS) .....	70
3.2. Main mechanisms of generation and types of infra-gravitational waves in the coastal zone (S.Yu.Kuznetsov, SIO RAS) .....	91
3.3. Transformation of waves grouped structure in the nearshore zone (S.Yu.Kuznetsov, SIO RAS, Ya.V.Saprykina, IWEP SibB RAS) .....	92
3.4. Study of waves grouped structure in Black Sea coastal zone of Gelendzhik area (S.Yu.Kuznetsov, SIO RAS, Ya.V.Saprykina, IWEP, SibB RAS, B.V.Divinski, SB SIO RAS) .....	117
<b>Chapter 4. Field study of spatial-temporal changeability of currents on Russian part of Black Sea coastal - shelf zone</b> (V.G.Krivosheya, SB SIO RAS) .....	131
4.1. General characteristics of water circulation .....	131
4.2. Field experiment results .....	135
4.3. Role of currents and water circulation in the ecology of Russian shelf of Black Sea .....	148



<b>Chapter 5. Field studies and modeling of undertow, longshore and rip currents in the zone of waves transformation and breaking during storms</b> ( <i>I.O.Leontyev, SIO RAS</i> ) .....	152
5.1. General description of nearshore circulation .....	152
5.2. Coastal zone dynamics equations .....	155
5.3. Bottom friction coefficient for the nearshore current .....	157
5.4. Coefficient of lateral mixing .....	160
5.5. Longshore current .....	164
5.6. Undertow .....	170
5.7. Rip current .....	176
<b>Chapter 6. Regularities of suspended sediments distribution in the sea coastal zone during storms</b> ( <i>R.D.Kos'yan, S.M.Antsyferov, SIO RAS</i> ) .....	180
6.1. General statement of problem .....	180
6.2. Generalization of results of suspended sediment study under storm condition in a tideless sea .....	181
6.3. Theoretical models of suspended sediment distribution .....	189
6.4. Calculation of vertical profile of sediment suspended by waves .....	191
6.5. Wave generated ripples .....	192
6.6. Sand sediment suspending at temporal scales of surface waves .....	195
6.7. Results of sediment suspending study in a tidal sea .....	197
<b>Chapter 7. Field study of mechanisms and time scales of sediment suspension by irregular waves</b> ( <i>N.V.Pykhov</i> ) .....	123
7.1. Low energetic conditions: non-breaking, slightly shoaling waves, rippled bottom .....	123
7.2. High energetic conditions: shoaling waves over the flat bed .....	123
7.3. High energetic conditions: breaking waves .....	123
7.4. Discussion of results .....	123
<b>Chapter 8. Modeling of spatial - temporal variability of sediment suspension and transport</b> .....	123
8.1. Convection - diffusion model of sediments suspension by irregular waves over the rippled bottom ( <i>N.V.Pykhov, P.L.Vorob'yev, SIO RAS</i> ) .....	123
8.2. Modeling of temporal variability of sediment suspension by irregular waves over the flat bottom ( <i>N.V.Pykhov, P.L.Vorob'yev, SIO RAS</i> ) .....	123
8.3. Influence of waves grouped structure features on the suspended sediment transport ( <i>S.Yu.Kuznetsov, SIO RAS</i> ) .....	123
8.4. Evaluation of applicability of energy approach for calculation of cross-shore suspended sediment transport ( <i>N.V.Pykhov, S.Yu.Kuznetsov, SIO RAS</i> ) .....	123
<b>Chapter 9. Modeling of morphological changes of beach profile and shoreline under the irregular storm waves and currents</b> ( <i>I.O.Leontyev, SIO RAS</i> ) .....	123
9.1. Storm-induced morphological changes in beach profile .....	123
9.2. Beach equilibrium profile .....	123
9.3. Storm-induced morphological changes over the coastal area .....	123
9.4. Prediction of long-term morphological response .....	123

<b>Chapter 10. Mechanisms of pollutants and fine sediments transport from coastal zone to shelf and continental slope</b> ( <i>N.V.Pykhov</i> ) .....	123
10.1. Brief characteristics of pollutants sources and content in coastal-shelf area .....	123
10.2. Main factors determining transport of pollutants and fine sediments on the shelf .....	123
10.3. Assessment of erosion and bottom sediments transport on the shelf.....	123
<b>Chapter 11. Transport and dispersion of pollutants in bays</b> ( <i>N.V.Yesin, SB SIO RAS</i> ) .....	123
11.1. Pollutant sources and brief description of ecological situation .....	123
11.2. Modeling of water circulation and pollutants transport in the Gelendzhik bay .....	123
<b>Conclusion</b> ( <i>R.D.Kos'yan, N.V.Pykhov</i> ) .....	123
<b>References</b> .....	123

---

## ***ВВЕДЕНИЕ***

---

---

В прибрежно-шельфовой зоне морей России основными гидродинамическими процессами, определяющими циркуляцию вод, транспорт наносов, перенос и рассеяние загрязняющих веществ, поступающих в море за счет выноса рек, ливневых и канализационных стоков, являются: течения ветрового происхождения, антициклонические вихри, формируемые при приближении основных течений к берегу, вдольбереговые, компенсационные и разрывные течения, формирующиеся в зоне трансформации и разрушения нерегулярных волн; флуктуационные движения воды на разных частотах спектра подходящих волн (инфрагравитационные, гравитационные и турбулентные), обусловленные штормовыми волнами. Из перечисленных процессов наименее исследованы, на сегодняшний день, течения, вызываемые прибрежными антициклоническими вихрями, течения волнового происхождения (вдольбереговые, компенсационные и разрывные) и инфрагравитационные волны, формирующиеся в зоне трансформации и разрушения нерегулярных волн, макромасштабная турбулентность в зоне разрушения волн. Без понимания физической сущности и закономерностей этих процессов невозможен надежный количественный прогноз процессов переформирования рельефа дна, береговой линии, переноса загрязнений и экологических изменений в прибрежной зоне морей России.

В настоящее время наблюдается несоответствие между уровнем наших знаний о гидродинамических процессах в прибрежно-шельфовой зоне морей России и необходимостью эффективного прогнозирования возможных экологических изменений вследствие ее интенсивного экономического освоения, усиливающегося в последние годы. Возможность некоторого уменьшения этого несоответствия определяется результатами натурных исследований последних лет, согласно которым групповая структура волн и инфрагравитационные волны оказывают существенное влияние на транспорт наносов и течения волнового генезиса в зоне трансформации и разрушения волн (Hanes, 1991; Rykhov, Kos'yan, Kuznetsov, 1995; Kos'yan et al., 1996a, 1997a.). В существующих моделях процессы циркуляции вод, переноса осадков и загрязняющих веществ рассматриваются только средние по времени характеристики, без учета групповой структуры волн, ее трансформации в береговой зоне моря и вклада флуктуационного переноса осадков и примесей на различных частотах спектра нерегулярных волн.

С середины 80-х годов наметился заметный прогресс в понимании физических закономерностей и методов расчета параметров волн, прибрежных течений и транспорта наносов во время штормов в береговой зоне моря. Натурными исследованиями было показано, что, в первом приближении, изменение высших моментов (асимметрия, эксцесс и др.) волнового движения по мере приближения волн к берегу определяет характер обрушения волн, генерацию инфрагравитационных волн и волновых течений, процессы взвешивания и транспорта осадков, т.е. всю динамику береговой зоны. В теоретических ис-

следованиях основное внимание уделяется анализу количественных характеристик гидродинамических процессов путем численного решения уравнений Буссинеска с добавочными членами, параметрически описывающими потери энергии при обрушении волн. Это направление решения проблем гидродинамики береговой зоны является, несомненно, перспективным при условии устранения ряда недостатков в существующих моделях, связанных со слабой изученностью и не учетом влияния групповой структуры волн и инфрагравитационных волн на поле течений в береговой зоне моря.

Отсутствие стройной качественной картины нелинейной деформации нерегулярных волн часто приводит к неправильной интерпретации экспериментальных данных. Например, возникают парадоксы типа аномальной дисперсии волн (Kuznetsov, Speranskii, 1994), которая противоречит общепринятым представлениям о бездисперсионном характере волнового движения на предельно мелкой воде. Несмотря на то, что уравнения типа Буссинеска достаточно хорошо описывают распространение нерегулярных волн, групповая структура волн в существующих моделях игнорируется, и сравнение численных расчетов по моделям с экспериментом ведется лишь по осредненным во времени параметрам волн. Присутствие в натуральных условиях групповой структуры волн и инфрагравитационных волн с весьма широким спектром их масштабов приводит к неопределенности и произвольности выбора необходимого времени осреднения для получения достоверных оценок.

Для расчета расхода наносов по нормали к берегу и вдоль него используется преимущественно энергетическая концепция, согласно которой расход наносов определяется через диссипацию энергии волн. Наиболее часто для расчетов используется модель Байларда, созданная еще в 1981 году (Bailard, 1981). Детальная проверка основ этой модели по данным натуральных экспериментов на основе спектрального и взаимно-спектрального анализов (Kos'yan et al., 1997a; Kuznetsov, Pykhov, 1998) показала, что она, в лучшем случае, позволяет оценить лишь порядок величины расхода. В большинстве случаев, она неправильно предсказывает направление переноса осадков по нормали к берегу на частотах ветровых и инфрагравитационных волн. Вклад переноса осадков на этих частотах в результирующий транспорт наносов по нормали к берегу, особенно ощутим в зоне разрушения волн (Kos'yan et al., 1997a). Во время штормов в этой зоне перемещается основная масса осадков, приводя к морфодинамическим изменениям подводного склона и береговой линии. Основная причина расхождений в том, что энергетические модели основаны только на общезначимом подходе пропорциональности расхода наносов диссипации энергии волн без учета реально наблюдаемых в природе механизмов взвешивания осадков со дна. Кроме этого, они не учитывают: перемежаемость процессов перемещения осадков и их зависимость от групповой структуры волн (Hanes, Huntley, 1986; Osborne, Greenwood, 1992, 1993; Kos'yan et al., 1994; Пыхов, Косьян, Кузнецов, 1997); изменчивости спектрального состава индивидуальных волн и фазовые сдвиги между скоростью воды, параметрами турбулентности и концентрацией взвешенных наносов (Pykhov, Kos'yan, Kuznetsov, 1995; Kos'yan et al., 1997b).

К настоящему времени опубликован ряд морфодинамических моделей прибрежной зоны моря, использующих различные подходы к описанию действующих механизмов и применимых к различным участкам берегового склона (Larson, Kraus, 1989; Roelvink, Stive, 1989; Wang, Miao, Lin, 1992; Newe, Dette, 1995; Roelvink et al., 1995). Большинство из них относится к условиям регулярного волнения, воздействующего на однородный вдоль береговой склон, сложенный однородными по крупности песчаными наносами. При этих условиях одним из главных механизмов перемещения наносов по профилю считается

компенсационное противотечение, исследованию которого в последнее десятилетие уделялось значительное внимание (Stive, Wind, 1986; Svendsen et al., 1987; Okayasu, Katayama, 1992). Однако другие важнейшие факторы – поток заплеска, определяющий динамику периодически осушаемой части пляжа, флуктуационный перенос инфрагравитационными и ветровыми волнами – изучены весьма слабо, но вклад которых является существенным, что затрудняет количественное описание динамики наносов в этой области. В результате при моделировании эволюции профиля подводного склона используются различного рода экстраполяции без рассмотрения реальных механизмов перемещения наносов.

При рассмотрении проблем морфодинамики для условий неоднородной топографии дна возникает необходимость расчета горизонтальной циркуляции воды в зоне трансформации и разрушения волн. В настоящее время созданы весьма совершенные численные модели прибрежной циркуляции, основанные как на концепции радиационных напряжений (Van Dongeren et al., 1994; Pechon, Teisson, 1994), так и на уравнениях Буссинеска (Sorensen et al., 1994). Эти модели, к сожалению, также не учитывают групповую структуру подходящих к берегу волн и являются весьма «дорогими» в плане затрат компьютерного времени. Их применение для конкретных практических задач, связанных с большим количеством итераций по времени, часто оказывается неудобным и неэффективным. Поэтому, актуальной остается проблема выбора экономичной гидродинамической модели, учитывающей влияние групповой структуры волн, адаптированной к условиям морфодинамических расчетов и обеспечивающей приемлемую точность при минимальных затратах.

Для устранения отмеченных недостатков, прежде всего необходимы данные натуральных исследований, которые позволяют лучше понять физическую сущность рассматриваемых процессов. С этой целью с 1993 по 1999 гг. сотрудниками ИО РАН и ЮО ИО РАН был проведен ряд натуральных экспериментов на Черном, Северном и Средиземном морях, результаты которых позволили выявить основные особенности динамических процессов в прибрежно-шельфовой зоне и использовать их при моделировании этих процессов. Результаты исследований и построенные на их основе модели подробно обсуждаются в данной монографии.

В подготовке разделов книги приняли участие российские специалисты, активно работающие в области гидро- и литодинамики морей и крупных водоемов, разработки методов и аппаратуры экспериментальных гидро- и морфолитодинамических исследований (в алфавитном порядке): Анцыферов С.М. – глава 6; Воробьев П. Л. – разделы 8.1, 8.2; Дивинский Б.В. – разделы 3.1, 3.4; Есин Н.В. – глава 11; Косьян Р.Д. – введение, главы 1, 2, 6, заключение; Кривошея В.Г. – разделы 1.5, 2.6, глава 4; Кузнецов С.Ю. – разделы 3.2, 3.3, 3.4, 8.3, 8.4; Леонтьев И.О. – главы 5, 9; Монахов В.В. – раздел 4.3; Подымов И.С. – главы 1, 2; Пушкарев О.В. – раздел 1.4; Пыхов Н.В. – введение, главы 7, 10, разделы 8.1, 8.2 заключение; Сапрыкина Я.В. – разделы 3.3, 3.4.

В монографии представлены, в основном, результаты исследований по проекту № 803-4(00-П) “Исследование гидродинамических процессов в береговой зоне моря и их влияние на процессы переформирования берегов и перенос загрязнений” Федеральной целевой научно-технической программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения”, подпрограммы “Комплексные исследования океанов и морей Арктики и Антарктики”. Этот проект выполнялся Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН и его Южным отделением в 1998-2001 годах при финансовой поддержке Департамента наук о жизни и Земле Министерства

промышленности, науки и технологий Российской Федерации. Кроме этого, исследования осуществлялись при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 93-05-8133, 95-05-14343, 98-05-64460, 00-05-96013, 01-05-64842, 01-05-64258, 02-05-64160), а также грантов: НАТО “Партнерство ради мира”-LG-№ 974562, Американского фонда CRDF № RG1-2240 и Швейцарского национального научного фонда № 7SUPJ062194.00/1.

Натурные эксперименты были выполнены при поддержке: Министерства Промышленности, Науки и Технологий Российской Федерации; Немецкого Федерального Министерства Науки, Образования, Исследований и Технологий (BMBF); Международного Центра Исследований Прибрежных Ресурсов (CIIRC); Барселона, Испания; Центра “Динамика прибрежной зоны моря” Геленджик, Россия; российского детского Центра “Орленок”, п. Ново-Михайловка, Россия.

Авторы выражают всем перечисленным организациям свою искреннюю признательность и благодарность за поддержку исследований, благодаря которым подготовлена эта книга.

Авторский коллектив монографии надеется, что она будет полезна как широкому кругу специалистов (океанологам, геоморфологам, гидротехникам), деятельность которых сопрягается с изучением и освоением прибрежно-шельфовой зоны морей, так и студентам и аспирантам соответствующих специальностей, для которых она будет полезной в качестве пособия при изучении динамических процессов в прибрежно-шельфовой зоне.

---

## ***Глава 1. СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКА АППАРАТУРЫ ДЛЯ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ***

---

---

Различный временной масштаб гидро- и литодинамических процессов береговой зоны моря, подлежащих экспериментальному изучению, накладывает достаточно жесткие требования к техническим средствам измерения, накопления и обработки информации. Методика проведения экспериментальных исследований должна в себя включать:

- измерение мгновенных концентраций взвешенных наносов в ряде точек по вертикали и горизонтали;
- осреднение за 0,5-2 часа (период квазистационарного волнения) значений концентрации взвешенных наносов и оценка качественного состава и гидравлической крупности взвешенных и донных наносов;
- измерение возвышений свободной поверхности воды;
- измерение вектора скорости водного потока;
- непрерывное измерение параметров донных микроформ.

При этом желательно чтобы регистрация сигналов со всех датчиков производилась синхронно с частотой дискретизации близкой к 20 Гц, что позволит зарегистрировать моменты возникновения турбулентности. Для оперативной оценки качества получаемой информации и внесения необходимых корректив в ход эксперимента желательны экспресс-анализ и графическое отображение регистрируемых параметров на экране компьютера. Так выглядит общая схема организации натуральных измерений, позволяющая решить основную задачу экспериментальных литодинамических исследований, а именно, поиск связей концентрации, расхода взвешенных наносов и условий начала взвешивания песка с параметрами крупномасштабных турбулентных вихрей, донных форм, поверхностных волн и течений. Результаты таких исследований позволяют осмыслить механизмы формирования поля концентрации взвешенных наносов, возникновения флуктуаций расхода наносов и являются основой для проверки теоретических моделей. Методические вопросы наблюдений, выполнявшихся до 90-х годов, достаточно полно освещены в прежних публикациях авторов (Анцыферов, Косьян, 1986; Косьян, Пыхов, 1990, 1991; Antsyferov, Rukhov, Dachev, 1990 и др.). В настоящем разделе мы рассмотрим лишь новые приборы и методики исследований параметров динамических прибрежных процессов, появившиеся в распоряжении отечественных исследователей в последнем десятилетии.

### **1.1. Турбидиметр**

Выбор достоверного способа измерения мгновенных значений концентрации взвешенных наносов долгое время является одной из основных задач, без решения которой невозможно изучение процесса перемещения твердого материала водным потоком.

Оптические методы, являющиеся наиболее быстродействующими, позволяют проводить исследования высокочастотных нестационарных процессов в придонном слое, где преобладают достаточно крупные частицы неорганического происхождения ( $> 100$  мкм) с высокими концентрациями ( $> 10$  г/л).

Существуют два основных метода определения концентрации взвешенного в воде материала, базирующихся на оптическом принципе: измерение ослабления потока светового излучения за счет взвешенных частиц (турбидиметрия) и измерение световой энергии, рассеиваемой частицами под углами, отличными от нулевых по отношению к направлению падающего света (нефелометрия). Нефелометры непригодны для измерений в береговой зоне моря, поскольку калибровочные характеристики нефелометров сильно зависят от размеров взвешенных в воде частиц. По этой причине нефелометры, как правило, используются для измерения малых концентраций однородных частиц на сравнительно больших глубинах.

В результате наших исследований было показано что метод измерения ослабления потока светового излучения может быть успешно использован для мгновенных измерений высоких концентраций взвешенных наносов и отыскания эмпирических зависимостей, описывающих процесс транспорта наносов в береговой зоне (Kos'yan, Podymov, Kuznetsov, 1999).

**Краткая теория турбидиметрии.** В основе турбидиметрии лежит закон Бугера, в соответствии с которым начальный поток излучения  $\Phi_0$ , прошедший в некоторой среде путь  $l$ , ослабляется этой средой до уровня  $\Phi$  по формуле:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\varepsilon l), \quad (1.1)$$

где  $\varepsilon$  – показатель ослабления светового потока данной средой.

Оптические приборы конструируются таким образом, что позволяют получать электрические сигналы  $I_0$  и  $I$ , пропорциональные  $\Phi_0$  и  $\Phi$ , соответственно. Таким образом, для выходных параметров турбидиметра уравнение (1.1) можно записать в виде:

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon l), \quad (1.2)$$

или 
$$\varepsilon = \frac{1}{l} \ln \frac{I_0}{I}.$$

Оптический метод измерения концентрации предполагает, что между концентрацией взвеси и показателем ослабления существует линейная взаимосвязь.

Если предположить, что исследуемая среда (в нашем случае – вода) абсолютно прозрачна (т.е.  $\varepsilon = 0$ ), а в некотором облучаемом объеме  $V$  находится  $N$  частиц, распределенных по размерам от  $r_{\min}$  до  $r_{\max}$  в соответствии с некоторой функцией плотности распределения  $f(r)$ , то коэффициент  $\varepsilon$  определится зависимостью:

$$\varepsilon = \pi N \frac{1}{V} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q(r) f(r) r^2 dr, \quad (1.3)$$

где  $r$  – радиус частицы,  $Q(r)$  – фактор эффективности рассеяния.

К. С. Шифрин (1951) показал, что для крупных частиц ( $2\pi r / \lambda \approx 20 - 30$ , где  $\lambda$  – длина световой волны, фактор эффективности не зависит от их размера. Если приемное устройство прибора сконструировано таким образом, что улавливает только дифракционную компоненту света, рассеянного частицами, то  $Q(r) = 1$ .



Гранулометрический состав взвеси приближенно можно описать количеством частиц, содержащихся в каждой из конечного числа  $k$  дискретных фракций определенного диапазона размеров. Такую информацию о составе сыпучего материала дает, в частности, ситовой анализ. Применительно к нему наиболее предпочтительным параметром, характеризующим размер зерна наносов отдельной фракции, является приведенный объемный диаметр  $d_{pi}$ , связанный с размером ячеек сит  $d_i$   $i$ -й фракции соотношением (Векслер, 1971):

$$d_{pi} = 1,17d_i. \quad (1.4)$$

Тогда выражение (1.3) можно записать в виде (Онищенко, Косьян, 1989):

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4V} \sum_{i=1}^k n_i d_{pi}^2, \quad (1.5)$$

где  $n_i$  – число зерен  $i$ -й фракции в исследуемом объеме.

Весовую концентрацию взвеси  $S$  можно выразить через массу твердых частиц  $G$ , содержащихся в этом объеме:

$$S = G/V = \sum_{i=1}^k G_i/V, \quad (1.6)$$

где  $G_i$  – масса зерен  $i$ -й фракции.

Если предположить, что все зерна имеют одинаковую плотность, получим:

$$G_i = \frac{\pi}{6} \rho_s d_{pi}^3 n_i, \quad (1.7)$$

где  $\rho_s$  – плотность материала частиц.

Отсюда:

$$n_i = \frac{6}{\pi} \frac{G_i}{\rho_s d_{pi}^3}, \quad (1.8)$$

Подставим (1.8) в (1.5):

$$\varepsilon = \frac{3}{2\rho_s V} \sum_{i=1}^k \frac{G_i}{d_{pi}}. \quad (1.9)$$

Из приведенных выражений взаимосвязь между параметрами  $\varepsilon$  и  $S$  имеет вид:

$$S = \varepsilon \frac{2}{3} \rho_s \left( \sum_{i=1}^k G_i^* / d_{pi} \right)^{-1} = \varepsilon bA, \quad (1.10)$$

где

$$b = \frac{2}{3} \rho_s, \quad G_i^* = G_i / G; \quad A = \left( \sum_{i=1}^k G_i^* / d_{pi} \right)^{-1}. \quad (1.11)$$

Подставив в (1.10) выражение (1.2) получим связь искомой концентрации с измеряемыми величинами  $I_0$  и  $I$ :

$$S = bA \frac{1}{l} \ln \frac{I_0}{I}. \quad (1.12)$$

Выражение (1.12) является основным уравнением турбидиметрии. Как следует из (1.10) и (1.12), линейная зависимость между концентрацией взвеси и измеряемой величиной  $\ln(I_0/I)$  сохраняется только при условии, что во время измерений остаются неизменными и соответствующими условиям калибровки следующие параметры: состав взвешенных наносов (параметр  $A$ ); плотность зерен  $\rho_s$ ; база прибора  $l$ ; параметр  $I_0$ , характеризующий оптические свойства чистой воды. Из 4-х названных параметров только измерительная база  $l$  является жестко контролируемым параметром при конструировании турбидиметра. Состав взвешенных наносов и плотность зерен  $\rho_s$  обуславливают методическую ошибку турбидиметрического метода, величину которой можно оценить по данным экспериментальных исследований и результатам тарировки. В общем случае параметр  $I_0$  также приводит к дополнительной методической ошибке. Но если в конструкции измерительной системы предусмотреть дополнительный канал, который давал бы информацию об оптических свойствах воды, методическую ошибку, обусловленную изменением параметра  $I_0$ , можно существенно уменьшить.

При конструировании канала, контролирующего параметр  $I_0$ , необходимо точно определиться с понятием “оптические свойства воды”. В нашем случае под оптическими свойствами воды подразумевается прозрачность не чистой воды, а воды с той частью взвешенных наносов, которая не оседает, а переносится вместе с потоком воды. Т.е. для фиксирования  $I_0$  необходимо определить максимальный диаметр переносимых потоком частиц и создать такую дополнительную зону измерения, в которой присутствовали бы только переносимые частицы взвеси.

**Важные для турбидиметрии результаты натурных исследований.** Турбидиметры использовались в нескольких натурных экспериментах. В течение российско-германского натурального эксперимента “Нордерней-94” выявлена ярко выраженная взаимосвязь колебаний концентрации взвешенных песчаных наносов и кинетической турбулентной энергии в придонном слое прибойной зоны. По полученным данным измерений также оценены временные и пространственные масштабы турбулентных вихрей, образующиеся при разрушении волн.

Исходя из полученных значений зависимости концентрации взвешенного песка от турбулентной энергии можно предполагать, что должны существовать вихревые структуры взвешенного песка с пространственно-временными характеристиками, близкими к характеристикам турбулентных вихрей.

Приближенную оценку размеров турбулентных и песчаных вихрей можно получить путем использования для измерений объемной решетки, в которой расстояние между датчиками можно ориентировочно выбрать из графика рис. 1.1. Так, например, при исследованиях в прибрежной зоне с расстоянием от дна до поверхности 2,0 м наибольший диаметр вихрей составит 1,1 м (см. рис. 1.1). Поэтому, чтобы зафиксировать экстремальные значения вихрей турбулентности и концентрации, длина каждой грани измерительной решетки должна быть не менее половины наибольшего диаметра вихрей для конкретных условий исследований. В данном случае она должна быть не менее 0,55 м. Если на каждой грани располагать по 3 измерителя, то расстояние между ними должно составлять 0,275 м. Ориентировочные оценки размера решетки накладывают достаточно жесткие требования на размеры измерительных приборов, устанавливаемых на нее.

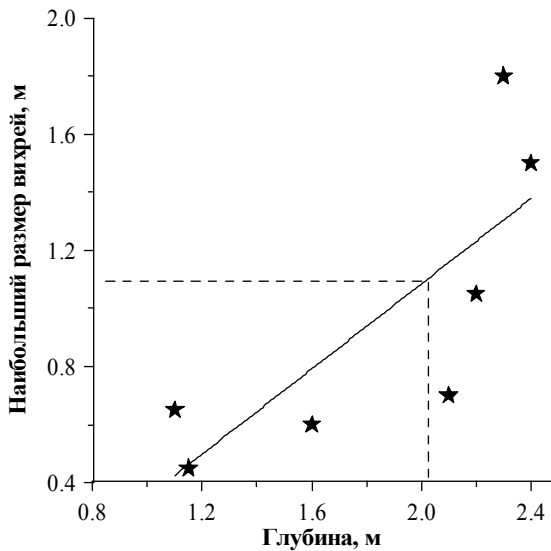


Рис. 1.1. Соотношение размеров вихрей и глубины.  
★ – данные измерений

Комплексная оценка данных российско-германского натурного эксперимента послужила толчком для разработки новой конструкции турбидиметров пригодных для исследований пространственно-временных характеристик вихревых образований.

**Структурная блок-схема турбидиметра.** Для наглядности структурная блок-схема турбидиметра разбита на две основные части (рис. 1.2): подводный блок и надводный блок. В состав подводного блока входят: источник эталонного напряжения, компаратор (дифференциальный усилитель сигнала ошибки), согласующий усилитель, модулятор, генератор, жестко стабилизированный усилитель тока с петлей отрицательной обратной связи, 2 источника света с

длиной излучаемой световой волны  $\lambda=0,67\mu\text{м}$ , канал оптической отрицательной обратной связи и измерительный канал, каждый из которых включает фотоприемник, усилитель фототока и демодулятор с фильтром. Измерительный канал отличается от канала оптической отрицательной обратной связи только наличием усилителя тока с петлей отрицательной обратной связи, необходимого для согласования с линией связи.

Формирование светового пучка происходит следующим образом. Напряжение, сформированное эталонным источником, поступает на модулятор через компаратор. Модулятор осуществляет модуляцию этого напряжения с частотой внутреннего генератора. Пульсирующее напряжение управляет двумя идентичными источниками света, роль которых выполняют сверхяркие светоизлучающие диоды со встроенным отражающим зеркалом и узкой диаграммой направленности. Введенная модуляция светового потока полностью устраняет влияние засветки при работах на малых глубинах и тем самым существенно уменьшает инструментальную ошибку прибора.

Пучок света от источника 1 проходит через исследуемый объем воды, ослабляется в соответствии с законом поглощения света и воспринимается фотоприемником 1. Сигнал с фотоприемника усиливается прецизионным усилителем фототока, демодулируется, фильтруется и в аналоговой форме (в виде тока) по линии связи поступает в надводный блок. Роль фотоприемника выполняет кремниевый фотодиод с небольшими размерами, высокой чувствительностью и температурной стабильностью, малой нелинейностью. Угол регистрации светового пучка приемника уменьшен с помощью диафрагмы. Постоянная времени измерительного канала не превышает 0,01 с. Канал оптической отрицательной обратной связи предназначен для жесткой стабилизации измерительных характеристик турбидиметра при воздействии различных возмущающих факторов и по структуре аналогичен измерительному каналу. Фотоприемник этого канала принимает свет от своего источника света не через исследуемый объем воды, а по специальному световому каналу. Выходной сигнал канала оптической отрицательной обратной связи подается на второй

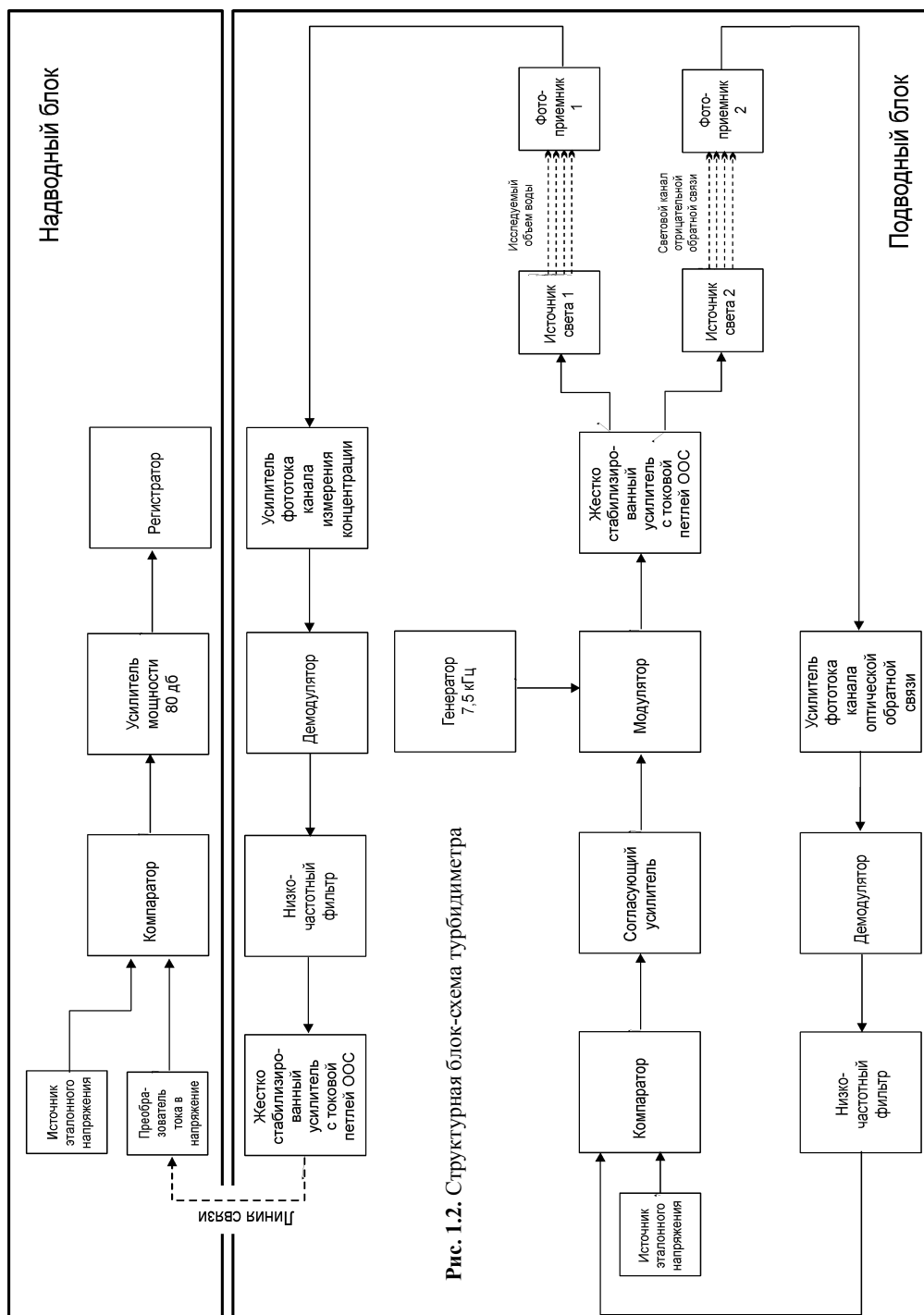


Рис. 1.2. Структурная блок-схема турбидиметра

вход компаратора (дифференциального усилителя сигнала ошибки), управляющего мощностью излучения. В результате мощность излучения устанавливается такой, что выходной ток фотоприемника канала обратной связи стабилизируется. Воздействие любого возмущающего фактора (температуры, старения и т.п.) вызывает изменение выходного сигнала канала обратной связи.

В свою очередь изменение этого сигнала приводит к изменению сигнала ошибки, фаза которого сдвинута на  $180^\circ$ . В результате узлы автоматической регулировки начального тока фотоприемников меняют мощность светового излучения. Начальное значение тока фотоприемника канала оптической отрицательной обратной связи восстанавливается в новых условиях. Поскольку каналы (измерительный и обратной связи) идентичны, закономерности стабилизации тока фотоприемников в них также совпадают. Фактором нестабильности здесь является возможный разброс параметров источников света и фотоприемников, что накладывает достаточно жесткие требования на подбор идентичных пар. Особенностью этой конструкции турбидиметра является специальный (дополнительный) источник света для канала обратной связи (Косьян и др., 1998).

Турбидиметр связан с надводным блоком с помощью 4-х жильного кабеля. По трем линиям кабеля передается питающее напряжение  $+15\text{В}$ . По отдельной линии передается информационный сигнал в виде тока, функционально связанного с концентрацией взвешенного материала. Электронный узел формирования тока выполнен в виде самонастраиваемой токовой петли с отрицательной обратной связью, параметры которой (в определенных пределах) не зависят от длины и сопротивления кабеля.

В надводном блоке токовый информационный сигнал преобразуется в напряжение. Далее с помощью компаратора и источника эталонного напряжения из информационного сигнала удаляется компонента постоянной составляющей. На выходе компаратора надводного блока существует информационный сигнал в виде напряжения, функционально связан с концентрацией взвеси. Компаратор построен таким образом, что в нем, помимо компенсации постоянной составляющей сигнала, присутствует возможность изменения крутизны преобразования информационной составляющей сигнала. Это в некоторой степени упрощает подгонку калибровочных функций различных экземпляров турбидиметров к одному виду. (При условии, что между концентрацией взвеси и показателем ослабления сохраняется линейная взаимозависимость, как говорилось ранее). И, наконец, информационный сигнал проходит через усилитель с коэффициентом передачи по напряжению равным единице, но имеющим коэффициент усиления по мощности 80 дБ. Такая развязка по мощности позволяет использовать регистраторы с различным входным сопротивлением без искажения передаточной функции турбидиметра. При этом диапазон входных сопротивлений может колебаться в очень широких пределах: от 10 Ом до 10 мОм.

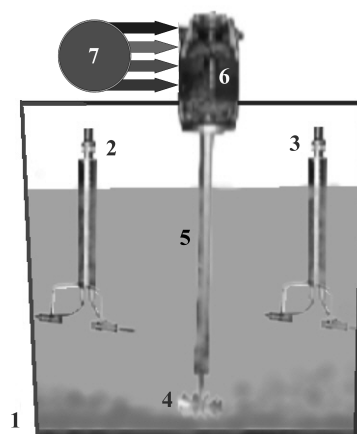
Внешний вид подводного блока турбидиметра показан на рис. 1.3.

**Лабораторная турбидиметрия.** Лабораторные исследования проводились с целью тарировки турбидиметров и оценки воздействия различных возмущающих факторов на точность показаний. Изучался также процесс оседания взвешенных частиц тестируемого материала.

*Установка для лабораторных исследований.* Исследования проводились в баке емкостью 50 литров. Схема установки для исследований приведена на рис. 1.4. В бак (1) были опущены одновременно два турбидиметра (2 и 3), пропеллер (4), соединенный приводом (5) с электродвигателем (6), трубка для отбора пробы. Электродвигатель подключался к источнику напряжения через регулятор числа оборотов (7). Сигнал с турбидиметров вво-



**Рис. 1.3.** Внешний вид погружаемого блока турбидиметра



**Рис. 1.4.** Схема установки для лабораторных исследований:  
1 – бак; 2 – турбидиметр 1; 3 – турбидиметр 2; 4 – пропеллер; 5 – привод; 6 – мотор; 7 – регулятор оборотов

дился в компьютер через многоканальный аналого-цифровой преобразователь. Песок засыпался на дно бака. Изменения концентрации взвешенных частиц достигались изменением оборотов вращения пропеллера и изменением количества засыпаемого песка. Расстояние от поверхности воды до датчиков турбидиметров составляло 21 см. Высота столба воды в баке равнялась 37 см.

Запись сигнала с турбидиметров производилась непрерывно в один файл на протяжении всего процесса измерения. Отбор пробы производился, примерно, в течение одной минуты. Противопоставляемые концентрациям коды усреднялись за период отбора пробы. Перед началом измерений фиксировались показания турбидиметра для чистой воды.

*Тарировка.* Для лабораторных исследований использовался песок, отобранный на полигоне “DELTA DE L’EBRE - 96”, график гранулометрического состава которого дан на рис. 1.5.

На рис. 1.6 приведена калибровочная характеристика турбидиметра для этого песка. Проблемы тарировки турбидиметров и возможные ошибки показаний, зависящие от фракционного и минералогического состава исследуемой взвеси, рассмотрены подробно в статье (Косьян и др., 1995). Все изложенные ранее выкладки имеют силу и для новой модели турбидиметра. Единственное отличие состоит в том, что для новой модели турбидиметра отпадает необходимость периодического контроля параметра  $J_0$ , поскольку один из каналов непрерывно фиксирует значение  $J_0$ . Это позволяет существенно снизить суммарную погрешность определения концентрации взвешенных наносов.

На рис. 1.7 представлен график изменения концентрации взвешенных частиц в процессе калибровки. Цифрами на график нанесены значения концентрации, полученные отбором проб с помощью сифона. Положение цифр на графике соответствует тем моментам времени, в течение которых производился отбор проб. Как видно из рисунка, значения концентрации, полученные отбором проб с помощью сифона, хорошо ложатся на

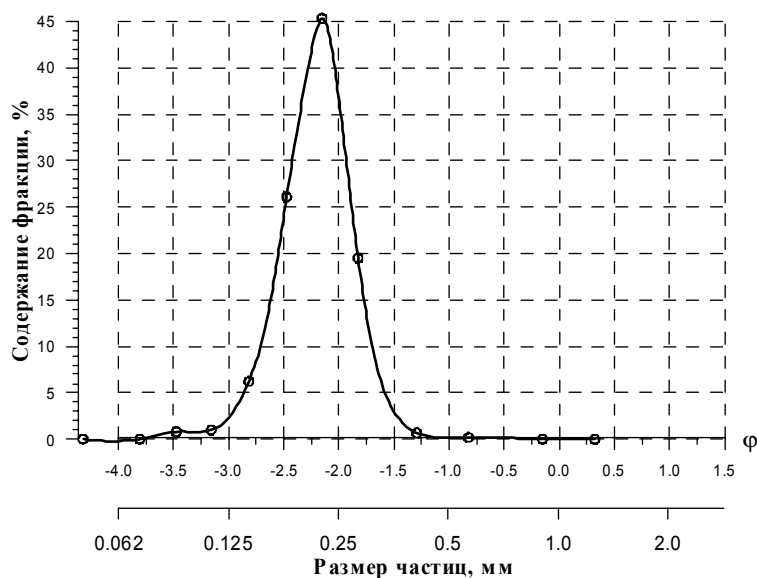


Рис. 1.5. Кривая гранулометрического состава песка, использованного для лабораторных исследований.  $d_{cp} = 0,219\text{мм}$ ;  $\varphi = \log_2 d$

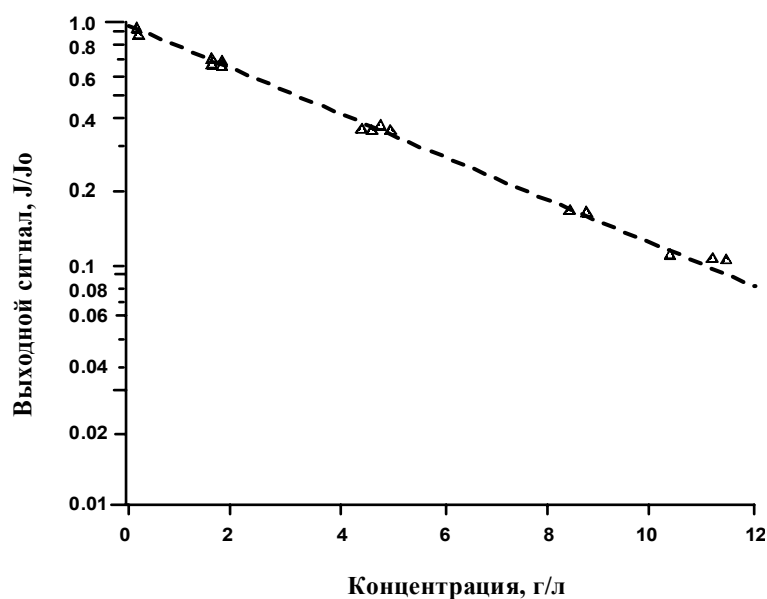


Рис. 1.6. Калибровочная характеристика турбидиметра

кривую тарировки. А максимальные отклонения значений концентрации, осредненных за 60 секунд отбора проб, не превышают 2%.

На рис. 1.8 показано изменение концентрации взвешенных частиц в разных зонах лабораторного бака. Измерения произведены синхронно двумя турбидиметрами. Эти гра-

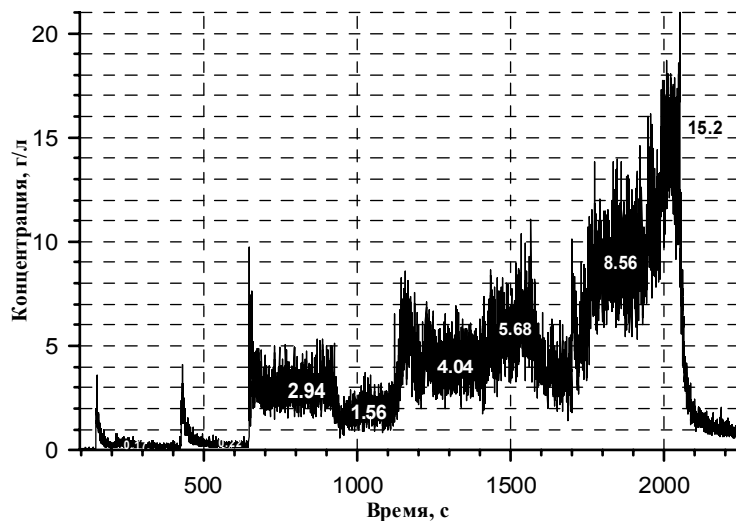


Рис. 1.7. График изменения концентрации взвешенных частиц в процессе калибровки

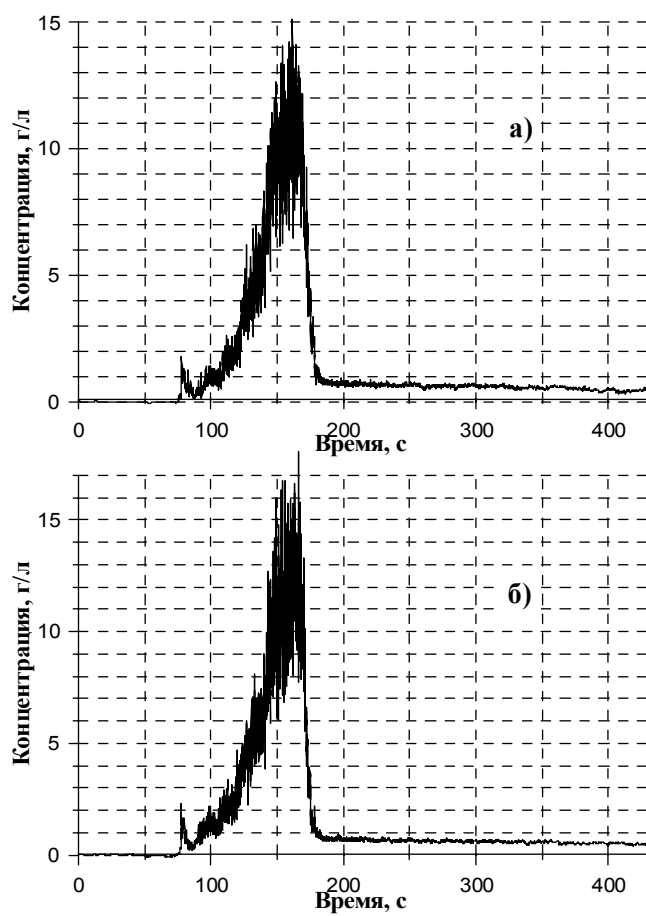


Рис. 1.8. Синхронное изменение концентрации взвешенных частиц в разных зонах лабораторного бака  
а) турбидиметр 2,  
б) турбидиметр 3



фики дают представление о равномерности распределения взвеси по всему объему в процессе исследований, а также позволяют судить о повторяемости передаточных характеристик различными экземплярами измерительных приборов. В конкретном случае для расчета концентрации использовано одно уравнение для двух турбидиметров. А коэффициенты передаточных функций для них сделаны равными с помощью аппаратных средств.

Проверка температурной стабильности работы турбидиметров показала, что при изменении температуры воды от 10 до 30°C погрешность показаний не превышает 0,2%. Проверка температурной стабильности проводилась в воде без взвеси.

*Изучение процесса оседания взвешенных частиц.* Методика измерений при изучении процесса оседания взвешенных частиц была следующей. Пропеллер раскручивался до такой скорости, чтобы показания турбидиметров дали максимальное затемнение для данного количества песка. При этом концентрация взвешенного материала была максимальной для конкретного количества песка в исследуемом объеме. В этот момент начиналась запись показаний турбидиметров. Далее мотор останавливался. Затем запись производилась в течение 2-х часов.

График изменения концентрации взвешенных частиц в процессе их естественного оседания показан на рис. 1.9. Из рисунка видно, что взвесь осаждалась более 2 часов.

На рис. 1.10а приведен гранулометрический состав песка в виде гистограммы. На рис. 1.10б приведен график оседания взвешенного песка за 30 сек. Этот график условно разбит на куски с выраженными вертикальными участками, соединяемыми между собой горизонтальными линиями. Каждый выделенный кусок характеризует процесс оседания конкретной фракции. Для наглядности каждый выделенный участок отмечен заштрихованным полем. Размер каждого поля по вертикали характеризует концентрацию взвеси в воде. В численном отношении на рис. 1.10в для каждого выделенного участка дано процентное содержание осевшей взвеси в общей концентрации.

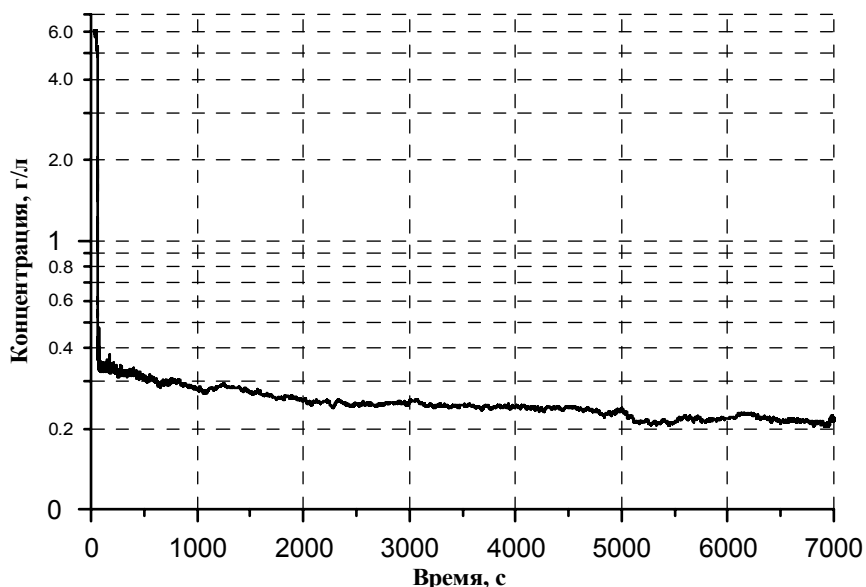
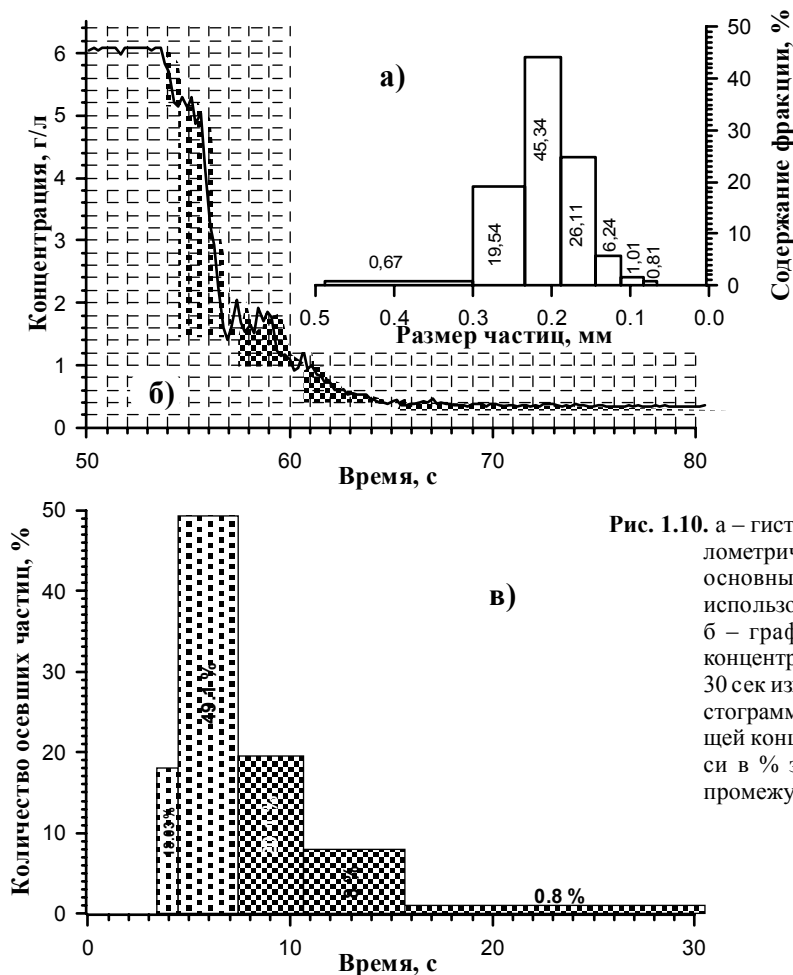


Рис. 1.9. График изменения концентрации взвешенных частиц в течение 2 часов



**Рис. 1.10.** а – гистограмма гранулометрического состава основных компонентов использованного песка; б – график изменения концентрации взвеси за 30 сек измерения; в – гистограмма снижения общей концентрации взвеси в % за выделенные промежутки времени

Т.е. в моменты времени, соответствующие концу каждой выделенной зоны, общая концентрация взвеси уменьшается на величину, приведенную на рис. 1.10в. Если сравнить эти значения с процентным содержанием различных фракций в используемом песке (рис. 1.10а), то можно увидеть, что уменьшение общей концентрации на 18% вызвано осаждением фракции с размером частиц 0,245 - 0,315мм. Дальнейшее уменьшение концентрации на 49% – это осевшая фракция 0,195 - 0,245мм. И так далее.

Из рисунка видно, что фракция с размером частиц  $< 0,1$ мм, которая составляет 0,8%, оседает намного дольше остальных. Это говорит о том, что в движущемся потоке взвесь с размером частиц менее 0,1мм почти не оседает и характеризует оптические свойства “чистой” воды, т.е. фон. Таким образом определяется размер ячеек фильтра, которым должна быть защищена измерительная зона одного из турбидиметров в ячейке для измерения фоновой концентрации частиц, взвешенных в подвижном водном потоке. Прибор, непрерывно фиксирующий значения фона, должен быть дополнительным к общему количеству измерителей. Вид измерительной головки турбидиметра с фильтром 100 мкм приведен на рис. 1.11.



Рис. 1.11. Внешний вид измерительной головки турбидиметра с фильтром

**Обобщенные результаты по использованию турбидиметров.** Благодаря использованию турбидиметров в натурных экспериментах удалось получить новые данные о физических механизмах взвешивания наносов над гладким и рифельным дном; оценить вклад различных волновых частот в формировании потока наносов; выявить природу отдельных составляющих в потоке взвешенных частиц. Кроме того, появилась возможность создания объемной решетки для исследований пространственных перемещений взвешенных частиц и фиксирования в реальном масштабе времени фоновой прозрачности исследуемой жидкости.

Лабораторные эксперименты показали, что температурная погрешность турбидиметров не превышает 0,2% в диапазоне температур 10 - 30°C. А максимальные расхождения в значениях концентрации взвешенных наносов, полученных методом отбора проб и по тарировочному уравнению турбидиметра, не превышают 2%.

Исследование процесса оседания частиц позволило определить максимальный размер частиц, характеризующих оптические свойства “чистой” воды, т.е. фон. Полученные максимальные размеры частиц фоновой прозрачности определили размер ячеек фильтра турбидиметра, отслеживающего параметры “чистой” воды.

Лабораторные исследования процесса оседания частиц позволяют также сделать вывод, что при дальнейшем совершенствовании лабораторного стенда и разработке методики и алгоритмов обработки возможно осуществлять экспресс-анализ гранулометрического состава исследуемого материала методом лабораторной турбидиметрии.

Все это делает турбидиметр уникальным прибором при исследованиях и моделировании транспорта наносов в береговой зоне моря.

## 1.2. Электромагнитный датчик скорости водного потока

Исследование транспорта осадочного материала в береговой зоне моря является актуальной океанологической задачей и непосредственно связано с экспериментальным измерением поля скоростей взвесенесущего водного потока (придонных гравитационных течений, орбитальных волновых скоростей). Эффективность выполнения этих работ зависит от качества проводимых инструментальных исследований.

Для измерения скоростей наиболее часто используются три класса приборов: датчики давления водного потока, акустические и электромагнитные датчики. Первые два класса приборов используются, в основном, для измерений на глубоководных участках и не могут эффективно работать в насыщенной воздушными пузырями и твердыми частицами мелководной зоне в силу имеющихся у них недостатков (наличие подвижных конструктивных элементов, большие размеры, чувствительность к воздушным пузырькам и т.д.) (Косьян, Пыхов, 1991).

Для измерения орбитальных скоростей в береговой зоне широко используются электромагнитные датчики. Примером такого датчика является измеритель “March-McBirney” (Model 512 OEM electromagnetic water current meter (March-McBirney inc.): U.S. patents 3,885,433; 3,898,881; 4,015,471.). К недостаткам приборов этого класса можно отнести чувствительность к близости дна или поверхности воды, а также к присутствию других предметов в непосредственной близости от них. Высокая чувствительность к окружающим датчик предметам связана, в основном, с наличием достаточно сильного электромагнитного поля в пространстве вокруг измерительной головки. Одним из возможных путей решения этой проблемы является создание поля, локализованного непосредственно в рабочей области датчика.

Ниже приведено теоретическое обоснование принципиальной возможности локализации электромагнитного поля и показаны некоторые результаты лабораторных экспериментов.

**Теоретические основы измерений.** Работа электромагнитных измерителей скорости водного потока основана на использовании такого физического явления, как возникновение поперечного электрического поля в проводнике при перемещении его перпендикулярно направлению силовых линий магнитного поля (Яворский, Детлаф, 1990). Это явление обусловлено влиянием силы Лоренца на движущиеся заряды, которая равна:

$$\mathbf{F} = q [\mathbf{v} \mathbf{B}],$$

и модуль которой

$$F = |q|vB \sin \alpha,$$

где  $q$  – электрический заряд носителя тока (положительный или отрицательный заряд ионов жидкости);

$v$  – скорость потока зарядов (ионов жидкости);

$B$  – магнитная индукция;

$\alpha$  – угол между векторами  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ .

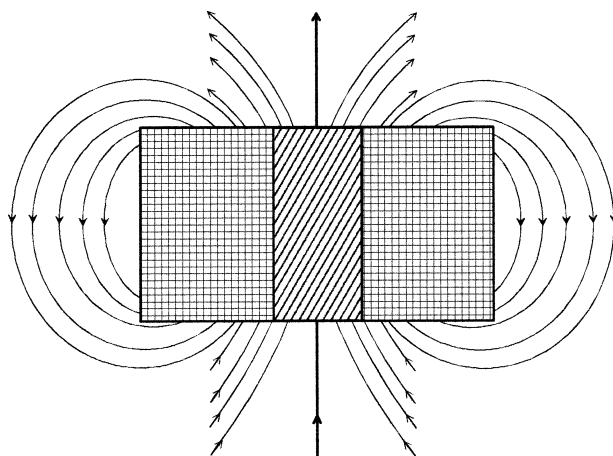
Сила Лоренца направлена всегда перпендикулярно к скорости заряженной частицы и вектору магнитной индукции, и определяется знаком заряда частицы. В результате, ее действие приводит к пространственному разделению разноименно заряженных движущихся частиц и появлению ЭДС, определяемой законом Фарадея. Наводимая ЭДС пропорциональна магнитной индукции, длине движущегося в магнитном поле проводника и скорости перемещения проводника. В случае электромагнитного датчика скорости потока, длина проводника – это расстояние между электродами датчика, а скорость перемещения – скорость потока жидкости.

Таким образом, при заданной величине магнитной индукции и фиксированном расстоянии между электродами разность потенциалов, наводимая на электродах, является функцией только скорости водного потока.

Разработка измерителей скорости водного потока, реализующих принцип перемещения проводника в магнитном поле, связана с преодолением ряда проблем (Guza, Clifton, Rezvani, 1988). Так, например, использование мощных постоянных магнитов для создания магнитного поля в водной среде приводит к поляризации жидкости и появлению на электродах нестабильных во времени потенциалов. Поэтому магнитное поле создается с помощью катушек индуктивности, работающих на переменном электрическом токе. При поступательном движении водной среды относительно знакопеременного магнитного поля, в ней наводится знакопеременная разность потенциалов, что исключает появление поля-

ризационных эффектов в жидкости. Однако, при приближении датчика ко дну или поверхности происходит изменение плотности магнитного поля вокруг электродов. Как следствие, на электродах появляется паразитная составляющая разности потенциалов. Уменьшить же возникающую при этом погрешность электромагнитного датчика можно путем локализации магнитного поля вокруг измерительной головки.

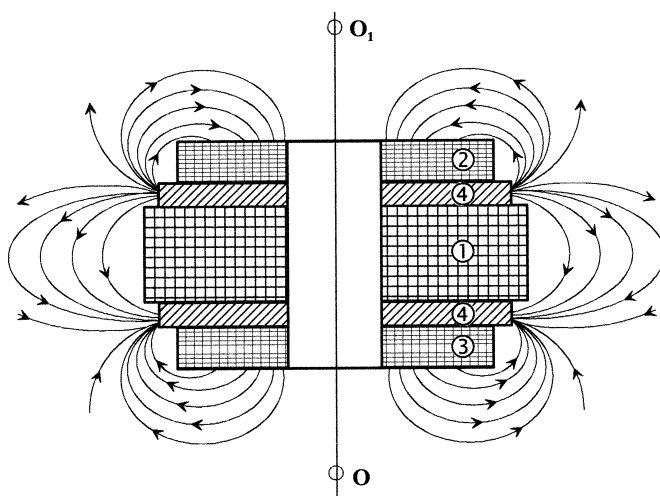
**Принцип локализации магнитного поля.** На рис. 1.12 показана качественная картина силовых линий магнитного поля катушки индуктивности (основного рабочего элемента измерительной головки) при прохождении через ее обмотку электрического тока.



**Рис. 1.12.** Силовые линии магнитного поля катушки индуктивности при прохождении через ее обмотку электрического тока

Из рисунка видно, что плотность силовых линий магнитного поля максимальна в области полюсов катушки и в сердечнике. В связи со значительной удаленностью полюсов друг от друга (5 см и более) и большим магнитным сопротивлением окружающей среды, магнитное поле на своем пути от истока к стоку занимает довольно большой объем.

Теперь рассмотрим поведение силовых магнитных линий в системе из трех катушек (рис. 1.13). Катушки собраны и подключены так, что осевое магнитное поле катушек L2 и L3 направлено навстречу магнитному полю катушки L1 и частично компенсирует его.



**Рис. 1.13.** Силовые магнитные линии системы из трех катушек:

1 – центральная катушка L1; 2 – экранирующая катушка L2; 3 – экранирующая катушка L3; 4 – магнитомягкий сплав (шайбы-прокладки)

В результате, в силу принципа суперпозиции, вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  системы катушек будет равен векторной сумме:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 + \mathbf{B}_3, \quad (1.13)$$

где  $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3$  – векторы магнитной индукции катушек L1, L2, L3, соответственно.

Катушки L2, L3 выполняют функцию активного экрана осевого магнитного поля катушки L1 (в проекции на ось  $OO_1$  выражение (1.13) примет скалярный вид:  $B = B_1 - B_2 - B_3$ ), а также обеспечивают частичное боковое экранирование. Шайбы-прокладки, изготовленные из магнитомягкого сплава, служат для усиления радиальной составляющей магнитного поля и выполняют функцию стока-истока последнего. Подбором значений индуктивности катушек L2 и L3 можно добиться значительного уменьшения величины индукции магнитного поля датчика вдоль оси  $OO_1$ . Результирующая структура силовых линий магнитного поля организованной таким образом системы катушек показана на рис. 1.14. Как видно из рис. 1.14, максимальные значения напряженности магнитного поля могут иметь место в зонах расположения электродов, а минимальные – вдоль оси катушек.

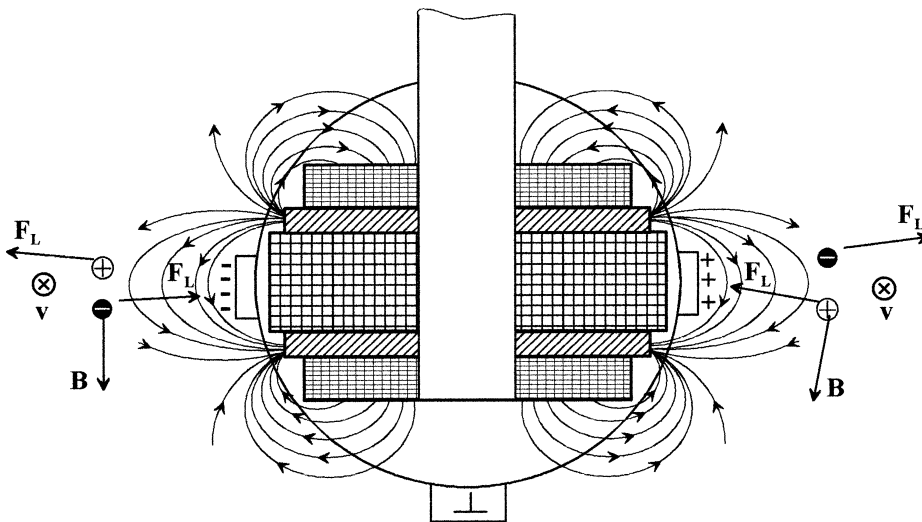


Рис. 1.14. Результирующая структура силовых линий магнитного поля системы катушек.

$\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\mathbf{V}$  – вектор скорости потока жидкости (направлен за лист);  $F_L$  – сила Лоренца;  $\oplus, \ominus$  – положительно и отрицательно заряженные частицы

**Баланс системы катушек индуктивности.** Рассмотрим поведение магнитного поля системы катушек индуктивности в системе координат  $XOY$  (рис. 1.15). Здесь ось  $OY$  совпадает с центральной осью симметрии, а ось  $OX$  проходит по верхнему краю центральной катушки.

Выражение (1.13) в проекции на ось  $OY$  примет вид:

$$B(y) = B_1(y) - B_2(y) - B_3(y). \quad (1.14)$$

Известно (Яворский, Детлаф, 1990), что величина магнитной индукции на оси, проходящей через центр плоского витка с током, находится по формуле

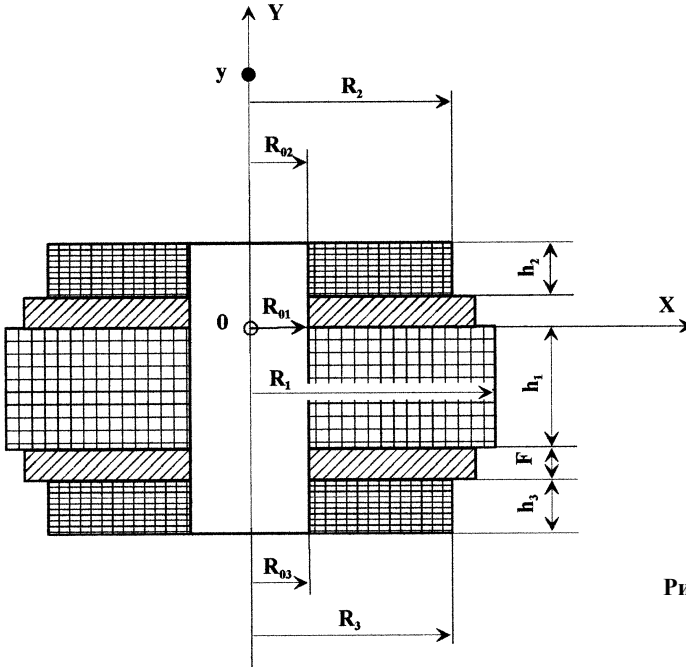


Рис. 1.15. Схема конструкции системы катушек индуктивности датчика течений

$$B_i = \frac{\mu\mu_0 IR_i^2}{2(R_i^2 + l_u^2)^{3/2}}, \quad (1.15)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $I$  – ток в витке;  $R_i$  – радиус витка;  $l_u$  – расстояние по осевой линии от плоскости витка до точки, в которой определяется индукция.

Результирующая магнитная индукция  $B$  катушки является суперпозицией индукции входящих в нее витков с током, поэтому

$$B = \sum_{i=1}^n B_i = \sum_{k=0}^{q-1} \sum_{m=0}^{p-1} B_{k,m}, \quad (1.16)$$

где  $q$  – число горизонтальных слоев витков;  $p$  – число вертикальных слоев витков в катушке;  $n = pq$  – число витков в катушке;  $B_i$  – индукция  $i$ -го витка.

Также необходимо учитывать, что материал обмоточных проводов обладает диамагнитными свойствами, уменьшающими значение индукции магнитного поля. Введенный коэффициент  $e_k$  учитывает уменьшение индукции магнитного поля, обусловленное диамагнитными свойствами материала обмоточных проводов.

Поскольку радиус и координата текущего витка изменяются дискретно ( $R_i = R_0 + md_p$ ;  $l_u = y + kd_p$  (рис. 1.16)), можно записать выражение для индукции всей катушки в виде суммы:

$$B(y) = \frac{\mu\mu_0 I}{2} \sum_{k=0}^{q-1} \sum_{m=0}^{p-1} \frac{e_k (R_0 + md_p)^2}{((R_0 + md_p)^2 + (y \pm kd_p)^2)^{3/2}}, \quad (1.17)$$

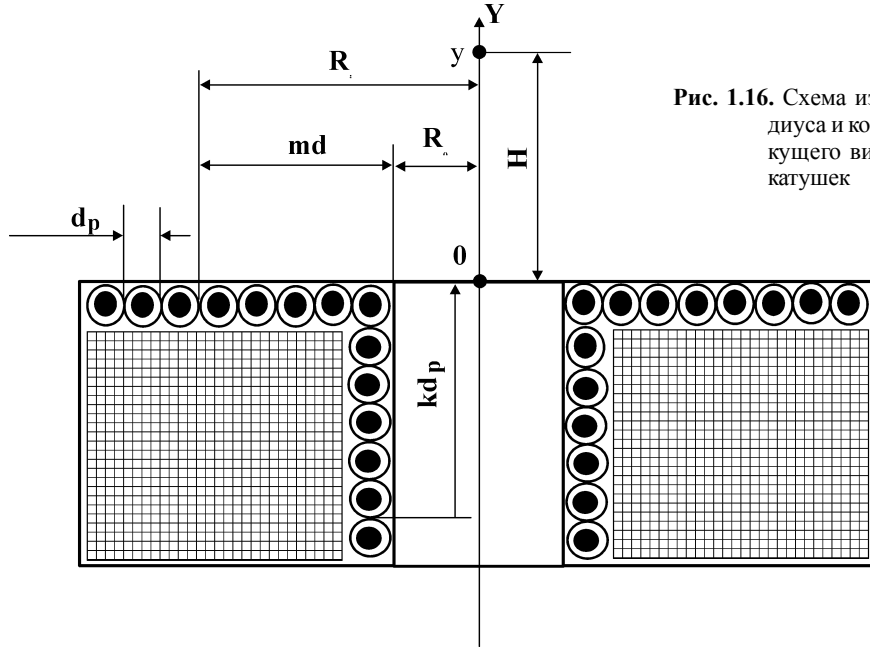


Рис. 1.16. Схема изменения радиуса и координаты текущего витка системы катушек

где  $q = h_k / d_p$  – число шагов суммирования по вертикали ('+' в случае увеличения расстояния от точки  $y$ , '-' в случае уменьшения);  $d_p$  – диаметр проволоки;  $h_k$  – высота катушки;  $R_0$  – радиус начала обмотки;  $R$  – радиус окончания обмотки;  $m$  – номер вертикального слоя;  $k$  – номер горизонтального слоя;  $y$  – точка на оси ОУ, для которой рассчитывается значение индукции магнитного поля;  $p = (R - R_0) / d_p$  – число шагов суммирования по горизонтали;  $I$  – ток в катушке;  $e_k$  – коэффициент ослабления поля  $k$ -го слоя витков вышерасположенными  $q-k$  слоями;

$$e_k = \frac{K_u \pi (R^2 - R_0^2)}{(q - k)d},$$

где  $K_u$  – масштабный коэффициент, подбирающийся эмпирически (порядка 0,003).  
Дополнительное граничное условие:  $0 \leq k < q$ . Для слоя  $k=q$ :  $e_k=1$ .

Уравнение **баланса** системы катушек имеет вид:

$$B(y) = 0;$$

и, с учетом (1.14):

$$B_1(y) - B_2(y) - B_3(y) = 0. \quad (1.18)$$

Его физический смысл заключается в отсутствии индукции магнитного поля в точке  $y$ . Согласно уравнения (1.17), а также принимая во внимание то, что катушки соединены последовательно и токи в них равны, можно записать:

$$B_1(y) = \frac{\mu \mu_0 I}{2} \sum_{k=0}^{q_1-1} \sum_{m=0}^{p_1-1} \frac{e_{k1} (R_{01} + m d_p)^2}{((R_{01} + m d_p)^2 + (y + k d_p)^2)^{3/2}}; \quad (1.19)$$



$$B_2(y) = \frac{\mu\mu_0 I}{2} \sum_{k=0}^{q_2-1} \sum_{m=0}^{p_2-1} \frac{e_{k2} (R_{02} + md_p)^2}{((R_{02} + md_p)^2 + (y - F - kd_p)^2)^{3/2}} \quad (1.20)$$

И далее, поскольку система катушек симметрична, запишем:

$$n_2 = n_3, R_{02} = R_{03}, R_2 = R_3, h_2 = h_3.$$

Поэтому

$$B_3(y) = \frac{\mu\mu_0 I}{2} \sum_{k=0}^{q_2-1} \sum_{m=0}^{p_2-1} \frac{e_{k3} (R_{02} + md_p)^2}{((R_{02} + md_p)^2 + (y + h_1 + F + kd_p)^2)^{3/2}}; \quad (1.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = \frac{h_{k1}}{d_p}; \\ p_1 = \frac{R_1 - R_{01}}{d_p}; \\ q_2 = \frac{h_{k2}}{d_p}; \\ p_2 = \frac{R_2 - R_{02}}{d_p}; \\ e_{k1} = \frac{K_u \pi (R_1^2 - R_{01}^2)}{(q_2 + k)d_p}; 0 \leq k < q_1; \\ e_{k2} = \frac{K_u \pi (R_2^2 - R_{02}^2)}{(q_2 - k)d_p}; 0 \leq k < q_2; \\ e_{k2} = 1; k = q_2; \\ e_{k3} = \frac{K_u \pi (R_2^2 - R_{02}^2)}{(q_1 + 2k)d_p}; \end{array} \right. \quad (1.22)$$

где  $I$  – ток в системе катушек;  $y$  – расстояние по оси ОУ от начала координат до точки, в которой определяется индукция магнитного поля;  $F$  – толщина магнитомягкого слоя;  $R_{01}, R_{02}$  – начальные радиусы обмоток катушек L1 и L2;  $R_1, R_2$  – конечные радиусы обмоток катушек L1 и L2 соответственно;  $h_{k1}, h_{k2}$  – высоты обмоток катушек L1 и L2;  $d_p$  – диаметр проволоки обмотки катушек;  $p_1, p_2$  – максимальные числа шагов суммирования по горизонтали;  $q_1, q_2$  – максимальные числа шагов суммирования по вертикали;  $n_1 = p_1 q_1$  – число витков в центральной катушке L1;  $n_2 = n_3 = p_2 q_2$  – число витков в экранирующей катушке L2 (L3).

Теперь, задав параметры катушек  $h_{k1}, R_{01}, R_1, R_{02}, R_2$ , диаметр проволоки  $d_p$ , а также параметры  $y, F, K_u$  и используя уравнения (1.19), (1.20), (1.21), (1.22) и, в качестве граничного условия, уравнение (1.18), можно получить высоты обмоток экранирующих катушек  $h_{k2}$  и  $h_{k3}$ , количество витков в катушках L1, L2 и L3, а также отношение  $c = n_1/n_2$ .

Теоретические выкладки и предложенная методика расчета параметров системы катушек позволяют определить оптимальный набор конструктивных характеристик измерительной головки электромагнитного датчика течений.

**Лабораторный эксперимент.** В лаборатории литодинамики береговой зоны моря Южного отделения Института океанологии был изготовлен опытный образец датчика. Фотография измерительной головки датчика приведена на рис. 1.17.

Эксперименты с датчиком проводились в пластмассовом баке емкостью 30 литров. Цель лабораторных исследований заключалась в сравнении показаний датчика с локализованным магнитным полем, с показаниями электромагнитного датчика скорости потока,



**Рис. 1.17.** Внешний вид экспериментального образца измерительной головки электромагнитного датчика течений

произведенного Центральным конструкторским бюро Морского гидрофизического института. Эксперимент показал, что при касании новым датчиком дна выходной сигнал не изменялся, а при приближении к стенке бака на расстояние 1 см выходной сигнал датчика изменялся на 10-15 мВ (максимальная амплитуда выходного сигнала датчика имеет величину 10 В.), т. е., дополнительная погрешность показаний датчика составила около 0,1%. У другого датчика сигнал ошибки составил 5В (50%) при расстоянии от датчика до стенки бака 5 см. При этом чувствительность обоих датчиков к скорости потока имеет примерно одинаковую величину.

**Обобщенные результаты по использованию электромагнитного датчика течений с локализованным магнитным полем.** Полученные результаты могут найти практическое применение при создании чувствительного элемента электромагнитного датчика скорости водного потока, предназначенного для измерений на мелководных участках.

Предложенная методика расчета параметров системы катушек позволяет определить оптимальный набор конструктивных характеристик измерительной головки электромагнитного датчика течений.

Использование измерителей течений с предложенной системой локализации магнитного поля дает возможность производить качественные исследования в непосредственной близости от дна, а также позволяет использовать измерители в сложных приборных комплексах при изучении пространственных характеристик перемещения взвешенных наносов.

### 1.3. Датчик уровня донных отложений

Датчик уровня донных отложений – электронно-механический прибор для определения мгновенных значений толщины донных отложений в фиксированной точке.

Он предназначен для измерения скорости образования и перемещения донных аккумулятивных форм при изучении динамики морских наносов на шельфе, при инженерных изысканиях под строительство гидротехнических сооружений и т.п. В приборе реализован метод фиксации давления грунта, находящегося над датчиком. Сам датчик помещается в грунт на некоторую глубину.

Датчик защищен патентом на изобретение России (Косьян, Подымов, 1997).

**Технические характеристики:**

диаметр воспринимательной чувствительной мембраны	0,1 м;
максимальный допустимый измеряемый вес	5 кг;
диапазон измерения толщины песчаного грунта	0,0 - 0,4 м;
чувствительность	0,0002 м;
изменение начального значения выходного сигнала при изменении температуры в рабочем диапазоне температур	< + 0,1 %/10°C;

нелинейность выходного сигнала по абсолютной величине	< 0,7 %;
постоянная времени датчика	< 0,1 сек;
максимальная толщина грунта над датчиком в процессе измерения (связана с “арочным” эффектом)	0,25 м;
максимальное допустимое перемещение мембраны	0,0003 м;
напряжение питания	+15 В;
потребляемый ток (без токовой нагрузки)	< 0,005 А;
потребляемый ток (при максимальном выходном сигнале)	< 0,025 А;
выходной сигнал	0 - 0,02 А;
диапазон рабочей температуры	+1°С - +80°С.

*Дополнительные преимущества*

- электронно-параметрическая компенсация старения элементов и воздействия изменений температуры;
- измерение толщины донных отложений методом погружения в грунт в исследуемой зоне;
- полная компенсация гидростатического давления столба жидкости;
- простота обслуживания;
- высокая надежность;
- высокая стабильность показаний.

**Краткое описание структурной схемы и конструкции.** Структурная схема датчика дана на рис.1.18. Датчик содержит тензометрический мост, электронный модуль формирования сигнала и электронный модуль формирования тока.

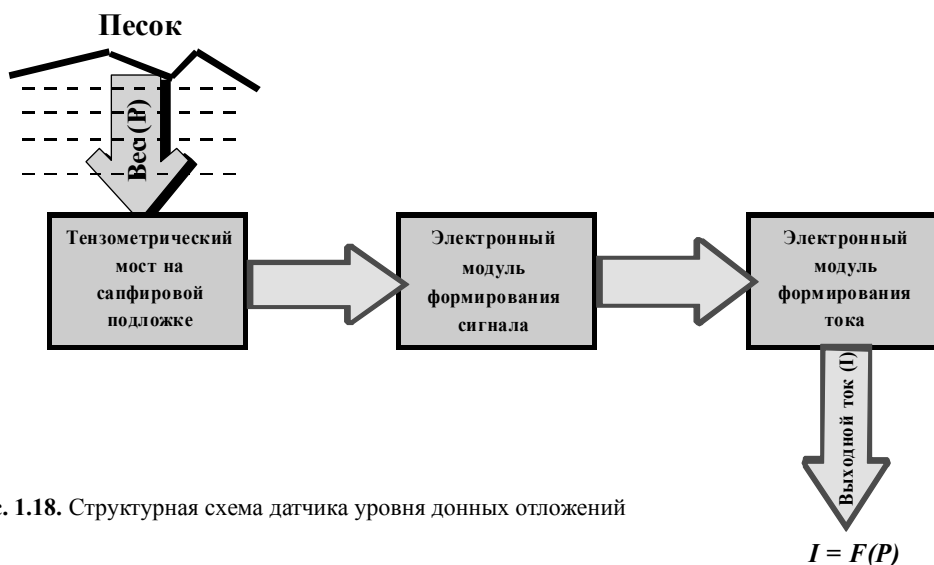


Рис. 1.18. Структурная схема датчика уровня донных отложений

Тензометрический мост представляет собой четыре миниатюрных полупроводниковых тензорезистора, которые собраны на единой подложке из сапфира. Тензомост конструктивно выполнен так, что изменение температуры окружающей среды одинаково передается на все тензорезисторы. В дополнение, компьютерная выборка резисторов по идентичности параметров позволяет минимизировать погрешность, связанную с разбалансом

моста по причине изменения температуры окружающей среды. Электронный модуль формирования сигнала осуществляет стабилизацию напряжений, питающих тензометрический мост, и выделяет сигнал разбаланса моста с помощью схем дифференциального усиления. Электронный модуль формирования тока осуществляет передачу сигнала разбаланса на измерительную систему.

Конструктивно датчик выполнен в виде цилиндрического корпуса, в полости которого размещены кинематически соединенные манометрический узел и динамометр, а также компенсационный силовой элемент, воздействующий на манометр.

На рис. 1.19 и рис. 1.20 схематично изображены варианты конструкции датчика в разрезе. Датчик содержит цилиндрический корпус (1) с прижимными резьбовыми крышками (2, 3). В крышке (2) выполнено входное отверстие (4) (см. рис. 1.19), а в крышке (3) – система отверстий (5) или компенсационный канал (6) с фильтром (7) (см. рис. 1.20). Крышка (2) фиксирует в корпусе (1) упругую мембрану (8), снабженную толкателем (9), которые образуют манометрический узел. Герметичная рабочая камера (10), образованная мембраной (8) и эластичной водонепроницаемой мембраной (11), заполнена непроводящей и неагрессивной по отношению к резине жидкостью (например, касторовым маслом).

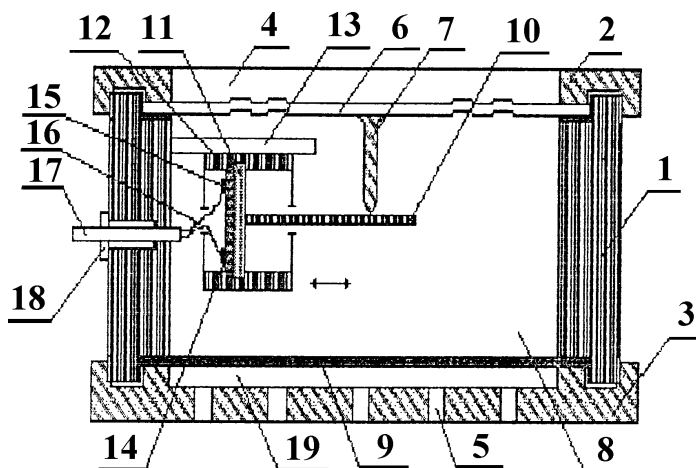


Рис. 1.19. Схематичная конструкция датчика в разрезе

Толкатель (9) (рис. 1.19) взаимодействует с Т-образным штоком (12), концы упругой перекладины (13) которого закреплены в каретке (14), установленной в направляющей кронштейна (15) с возможностью перемещения в направлении, указанном стрелками. К перекладине (13) жестко крепится упругая диэлектрическая пластина (16), выполненная из сапфира, с размещенными на ней тензорезисторами (17), которые проводниками (18), образующими кабель (19), соединены с электронным блоком (не показан). Кабель (19) установлен во втулке (20). Электронный блок может быть размещен как во внутренней полости датчика, так и в отдельном боксе.

Толкатель (9) (рис. 1.20) контактирует с рычагом (21), выполненным с прорезью (22), в которой расположена ось (23), установленная на конце Г-образного кронштейна (24), выполненного с возможностью перемещения вдоль направляющей кронштейна (25). Второй конец рычага (21) упирается в пластину (16), установленную в опорах (каретке) (26) (в этом варианте возможно также выполнить с направляющей только кронштейн 15 или

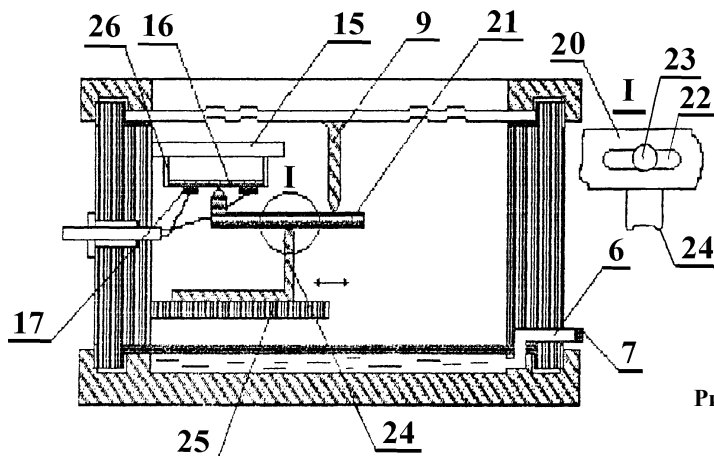


Рис. 1.20. Второй вариант конструкции датчика в разрезе

оба кронштейна 15, 25). Крышка (3) и диафрагма (11) образуют компенсационный отсек (27) корпуса (1) (см. рис. 1.19).

Датчик используют следующим образом. Один датчик или группу датчиков заглубляют в грунт морского дна на глубину 20 – 40 см на выбранном участке морского шельфа. Давление толщи донных отложений, регистрируемое в момент установки, принимается за исходное.

Периодические изменения массы наносов связаны с перемещением донных аккумулятивных форм (рифелей, гряд, дюн) через выбранную для измерения точку дна. При прохождении гребня формы давление на мембрану (8) увеличивается, изменяя распределение напряжений в пластине (16) и вызывая разбаланс мостовой схемы, образованной тензорезисторами (17). При прохождении ложбины происходят те же явления, но меняется знак разбаланса.

Диапазон измерения (крутизна преобразования) регулируется путем перемещения каретки (14) или кронштейна (24). При этом периодические изменения статического давления воды, связанные с волнением или циклами прилива-отлива, не отражаются на показаниях датчика, поскольку полностью компенсируются изменением давления в отсеке (27) корпуса (1).

В результате датчик обеспечивает проведение непрерывных измерений толщины донных отложений в широком диапазоне изменяющихся статических давлений, что позволяет получить количественную информацию о движении различных донных аккумулятивных форм с последующим расчетом скорости их движения в любых гидродинамических условиях. Немаловажной особенностью датчика является и развязка динамометрического узла (в частности, тензорезисторов (17)) с мембраной (8), облегчающая параметрическую компенсацию температурной погрешности датчика.

Внешний вид датчика уровня донных отложений дан на рис.1.21.

**Линии связи и считывание информации.** Датчик уровня донных отложений связан с пунктом накопления и обработки информации с помощью 4-х жильного кабеля. По трем линиям кабеля передается питающее напряжение + 15В. По отдельной линии передается информационный сигнал в виде тока, функционально связанного с толщиной донных отложений. Электронный модуль формирования тока выполнен в виде самонастраиваю-



Рис. 1.21. Внешний вид датчика

шейся токовой петли с отрицательной обратной связью, параметры которой не зависят от длины и сопротивления кабеля в определенных пределах.

Аналоговый информационный сигнал преобразуется в двоичный код с помощью двенадцатирядного аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения. Преобразованный в двоичный код выходной сигнал датчика уровня донных отложений с требуемой дискретностью записывается на магнитный носитель компьютера.

**Лабораторный эксперимент.** Основная задача лабораторного эксперимента заключалась

в том, чтобы экспериментально определить зависимость давления насыпаемого под водой на датчик песка от толщины этой насыпки, а также оценить степень влияния различного состава песков на проявление “арочного” эффекта. (Об “арочном” эффекте будет сказано в следующем разделе).

Для того, чтобы исключить влияние электронных узлов на передаточные характеристики датчика, они не использовались. Стабильное напряжение питания подавалось непосредственно на тензометрический мост и регистрировалось цифровым вольтметром.

В эксперименте были использованы два вида натуральных песков. Один имел средний размер частиц 0,415 мм, другой – 0,189 мм. Согласно минералогическому анализу первый вид песка на 90% был представлен кварцем и полевыми шпатами с плотностью  $\rho_s$  равной примерно 2,65 г/см<sup>3</sup>. Второй вид песка минералогическому анализу не подвергался, но он содержал больше фракций размером менее 0,2 мм. Оценка формы частиц не проводилась. Кривые распределения частиц по размерам ( $\varphi = 10 \lg d$ ,  $d$  – диаметр частиц) для обоих песков приведены на рис. 1.22.

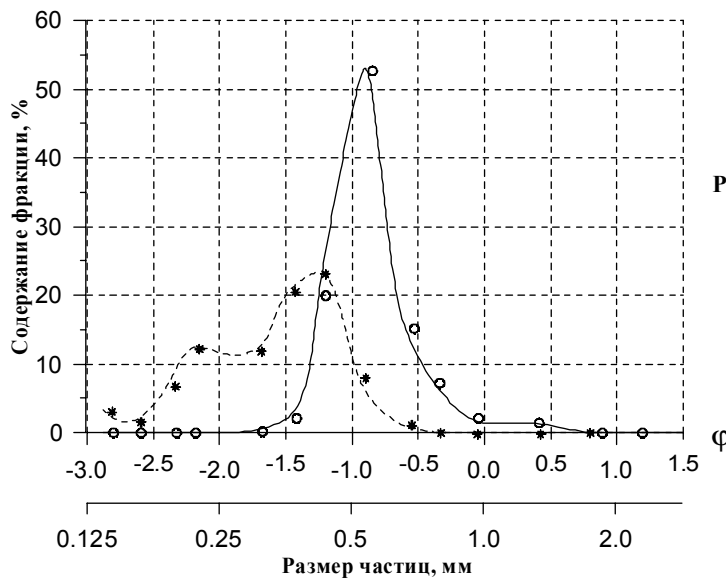


Рис. 1.22. Распределение частиц по размеру для песка с  $D_{50} = 0,415$  мм – сплошная линия, и для песка с  $D_{50} = 0,189$  мм – пунктирная линия

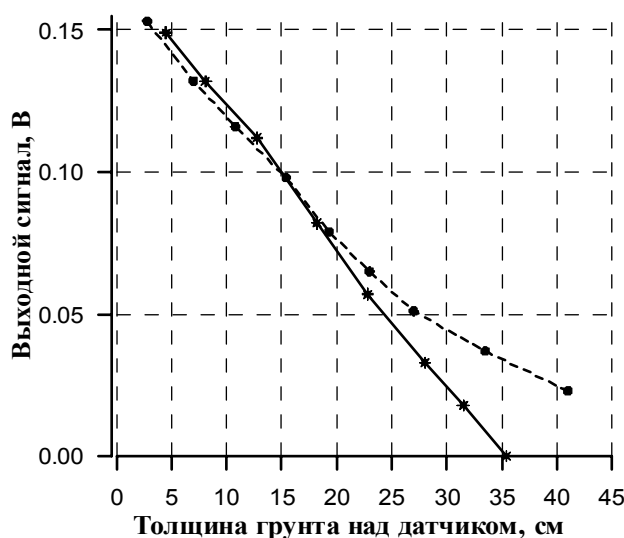
Тарировка датчика выполнялась в баке объемом 100 литров и высотой 470 мм в следующей последовательности. Датчик находился на дне бака. В бак было залито небольшое количество воды и добавлена порция песка до такого уровня, чтобы первоначально он покрыл мембрану датчика слоем 20 мм. Толщина слоя песка над поверхностью датчика постоянно фиксировалась. Сигнал разбаланса тензомоста фиксировался по цифровому вольтметру для толщины каждой насыпки. После добавления очередной порции песка, по мере увеличения толщины насыпки, бак приводился в состояние вибрации. Затем вибрация прекращалась и после 5-ти минутной выдержки делался отсчет показаний толщины слоя песка над поверхностью датчика и соответствующего ей аналогового сигнала разбаланса тензомоста. В процессе тарировки в бак, одновременно с песком, добавлялась вода в необходимом количестве. Процедура тарировки была проделана вначале для одного вида песка, затем – для другого. Измерения прекращались, когда количество насыпанного песка в баке достигало его краев.

В этом же эксперименте была выполнена проверка температурной стабильности работы датчика. Измерения в воде без песка показали, что при изменении температуры воды от 10°C до 30°C выходной сигнал датчика остается стабильным с погрешностью 0,1%.

В отдельном эксперименте была выполнена проверка влияния статического давления воды на величину сигнала разбаланса. Для этого датчик медленно опускался с эстакады на глубину 5 метров. При этом изменений показаний сигнала разбаланса тензомоста не происходило.

**Обсуждение результатов.** Результаты тарировки датчика приведены на рис. 1.23.

Как видно из графиков, хорошее совпадение для разных песков и высокая линейность зависимостей сигнала разбаланса  $U$  от толщины слоя песка  $D$  над датчиком наблюдается



**Рис. 1.23.** Тарировочные кривые датчика для различных песков. Сплошная линия – крупный песок ( $D_{cp} = 0,415$  мм), пунктирная – мелкий ( $D_{cp} = 0,189$  мм)

до толщины слоя 220 мм. При дальнейшем увеличении толщины насыпки линейность зависимости сохраняется только для крупного песка. График зависимости  $U(D)$  для мелкого песка искривляется и, изменив наклон, уходит в сторону. При этом характер изменения крутизны кривой говорит об уменьшении влияния толщины насыпки на передаваемое на датчик давление. Вероятно, это связано с тем, что присутствующие в песке тонкие

фракции связывают частицы песка, создавая промежуточные слои повышенной прочности. Эти слои препятствуют передаче давления от верхних слоев. **Эффект искажения закономерности передачи давления от верхних слоев к нижним мы назвали “арочным”**. Очевидно, что “арочным” эффектом обладают любые рыхлые грунты. Но толщина слоя, начиная с которой он проявляется, является характерной особенностью конкретного грунта.

Анализ результатов лабораторных экспериментов показал, что если для обработки результатов измерений в натуральных условиях используются данные лабораторной тарировки, глубина погружения датчика в грунт не должна превышать 220 мм. Однако, это не исключает возможности использования датчика в условиях, отличных от лабораторных, но при этом необходима тарировка *in situ* для каждого конкретного грунта и конкретных условий.

**Натурные испытания.** Впервые датчики уровня донных отложений использовались в натуральных условиях в Германии осенью 1994 года при проведении комплексных литодинамических исследований на побережье острова Нордерней. Специально для этих исследований были подготовлены два датчика: № 2 и № 3. Датчики, оборудованные электронными модулями в соответствии со структурной схемой (см. рис. 1.18), были откалиброваны в лаборатории по описанной выше методике. Для калибровки использовался только крупный песок с приведенными ранее параметрами. Графики лабораторной калибровки датчиков представлены на рис. 1.24 и рис. 1.25.

На этих же графиках нанесены точки, полученные при калибровке *in situ* методом замера толщины слоя песка над датчиками в естественных условиях. Толщина слоя песка над датчиками замерялась в процессе проводимых исследований косвенным способом: замером длины металлического штыря, закопанного на некотором расстоянии от датчика.

Тарировочное уравнение для датчиков выглядит следующим образом:

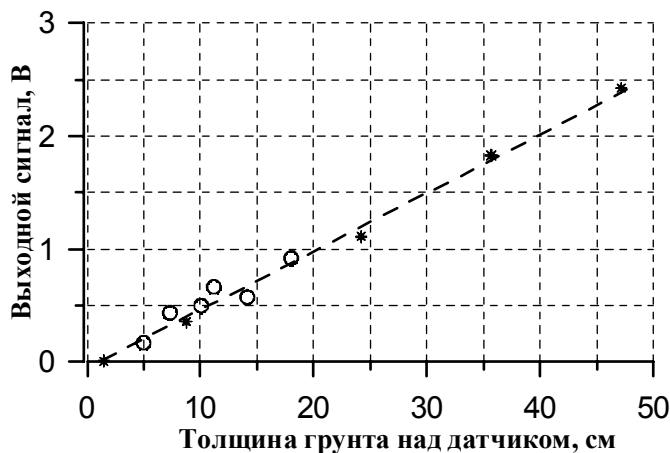
$$D = 2,44 \cdot 10^{-3} \cdot (N - N_0) / k_d, \quad (1.23)$$

где  $D$  – толщина слоя песка, м;

$N$  – текущий код;

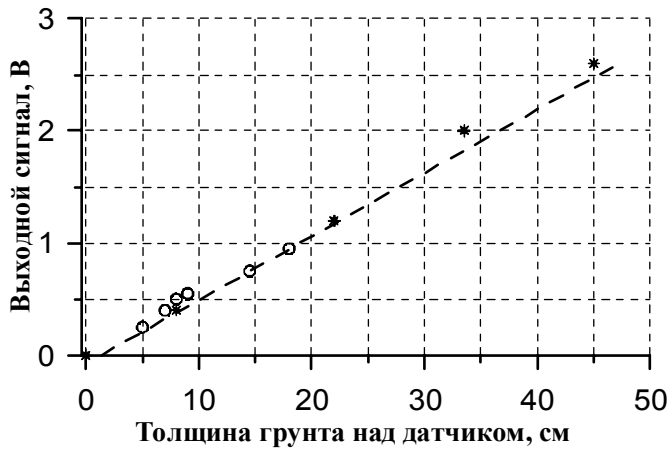
$k_d$  – тарировочный коэффициент датчика (для датчика № 2  $k_d = 5,1$ ; для датчика № 3  $k_d = 5,7$ );

$2,44 \cdot 10^{-3}$  – конструктивный коэффициент аналого-цифрового преобразователя.



**Рис. 1.24.** График лабораторной калибровки датчика № 2  
\* – данные лабораторной калибровки (песок с  $D_{cp} = 0,415$  мм);  $\circ$  – данные калибровки *in situ* (песок с  $D_{cp} = 0,21$  мм)

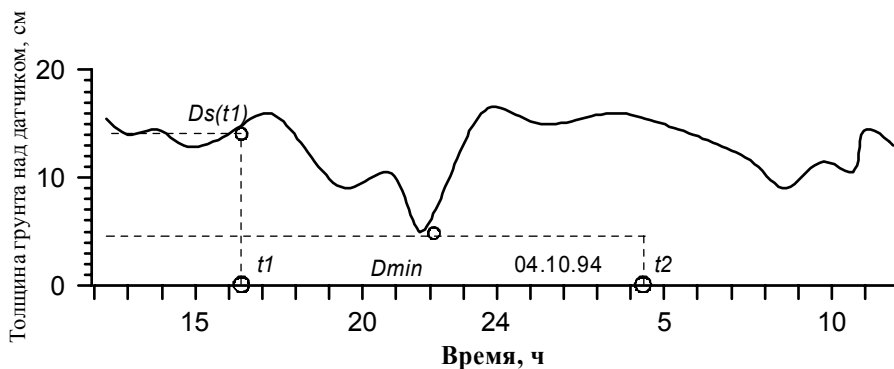




**Рис. 1.25.** График лабораторной калибровки датчика № 3  
 \* – данные лабораторной калибровки (песок с  $D_{cp} = 0,415$  мм); O – данные калибровки in situ (песок с  $D_{cp} = 0,21$  мм)

Число  $U = 2,44 \cdot 10^{-3} \cdot (N - 2046)$  представляет собой напряжение в Вольтах на входе аналого-цифрового преобразователя, функционально связанное с толщиной слоя грунта над датчиком.

В процессе литодинамических исследований производилось сопоставление результатов измерения деформации донной поверхности, получаемых с помощью датчика и классическим методом: методом измерения толщины активного слоя с помощью металлических штырей и металлических шайб. Результаты одного такого сравнения за период 12-часового измерения представлены на рис. 1.26. Методика получения результатов сравнения заключалась в следующем. Во время отлива, когда осушалось место установки датчика, на расстоянии 1 м от датчика в песок вбивался металлический штырь. На этот штырь надевалась тяжелая плоская стальная шайба с отверстием посередине. Шайба опускалась по штырю вниз и своей плоскостью укладывалась на поверхность песка. После цикла прилива-отлива, когда место установки осушалось вновь, производились необходимые замеры. Предполагалось, что если за время измерения в этой точке произойдет процесс деформации донного профиля, то с помощью “провалившейся” в грунт шайбы можно определить толщину активного слоя в этой точке. Если же с момента начала измерения первой фазой процесса деформации был процесс накопления донных отложений, а затем



**Рис. 1.26.** График сравнения результатов измерения толщины активного слоя, полученных с помощью датчика и с помощью металлических шайб

разрушения и опять накопления, количественная информация о размере первоначального накопления терялась. На рис. 1.26 сплошной линией дан профиль дна в точке измерения, полученный с помощью датчика. Здесь же  $t_1$  – время установки стальной шайбы на песок,  $t_2$  – время замера глубины “провала” шайбы.

Введенные обозначения имеют следующий смысл:

$\Delta D_s = D_s(t_1) - D_{\min}$  – толщина активного слоя за период времени  $t_1-t_2$  по данным датчика. Начальный процесс накопления не принят во внимание, поскольку он не фиксируется шайбой. Из рисунка видно, что  $\Delta D_s = 8,5$  см.

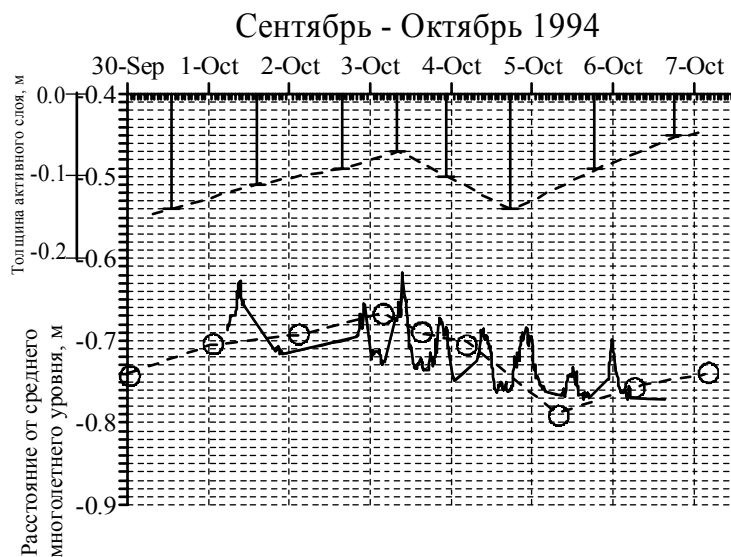
Толщина активного слоя, полученная с помощью шайбы, составила 8,0 см.

Как видно из сравнения, разница между результатами измерений этими методами составляет 0,5 см.

При проведении измерений для абсолютной привязки уровня поверхности песка к окружающей обстановке использовался реперный штырь. Положение датчика фиксировалось не по глубине его расположения под поверхностью песка, а по расстоянию от вершины реперного штыря. Таким образом осуществлялась фиксация уровня поверхности песка относительно вершины реперного штыря.

В качестве типичного примера на рис. 1.27 прерывистой линией показан фрагмент семидневной записи уровня поверхности песка в точке измерения относительно вершины реперного штыря, полученный с помощью датчика.

Кружочками на этом рисунке показаны уровни поверхности песка, замеренные линейкой от вершины реперного штыря во время полной осушки при отливе места его установки. Вертикальными линиями обозначена толщина активного слоя за промежуток времени между замерами уровня песка линейкой, полученная с помощью шайб.



**Рис. 1.27.** Типичный пример записи временного изменения уровня поверхности песка и толщины активного слоя

- |           |   |   |   |
|-----------|---|---|---|
| —         | — | — | — |
| ○ ○ ○ ○ ○ | — | — | — |
| .....     | — | — | — |
| ┆┆┆┆┆     | — | — | — |

— уровень песка, измеренный с помощью датчика;

— уровень песка, измеренный линейкой;

— кривая средних значений уровня песка;

— толщина активного слоя, полученная с помощью шайб

Результаты лабораторных тарировок и натурных испытаний свидетельствуют о пригодности датчика уровня донных отложений для измерения скорости образования и перемещения донных аккумулятивных форм при изучении динамики морских наносов на шельфе.

Кроме того, достаточно корректные мгновенные значения толщины донных отложений в фиксированной точке позволяют использовать данные датчика для постоянного контроля за расстоянием между измерительной головкой турбидиметра, установленного в этой точке, и дном.

#### 1.4. Волновой буй

В рамках программы изучения волнового климата Черного моря в открытом море в районе г. Геленджика в 1996 году был установлен волноизмерительный буй “Directional Waverider Buoy” нидерландской фирмы ATAWELL. Буй предназначен для непосредственного измерения параметров волнения, первичной обработки данных и передачи накопленного материала по радиоканалу на береговое приемное устройство. Связанный с ним персональный компьютер управляет обработкой полученной информации и ее хранением.



Координаты точки установки:  $44^{\circ}30'40''$  N,  $37^{\circ}58'70''$  E, глубина места – 85 м, что для всех наблюдавшихся волн соответствует условиям глубокой воды. Измерительный буй удерживается якорной системой.

Буй представляет собой сферу (рис. 1.28) диаметром 0,9 м, весом 212 кг и содержит датчики вертикальных колебаний, крена и тангажа, магнитный компас, акселерометр, температурный датчик, микропроцессор.

Буй может измерять параметры индивидуальных волн высотой до 40,0 м (с разрешением 1 см) и периодом в диапазоне 1,6 – 30 сек. Погрешность измерительной шкалы +3%. Диапазон измерения направления перемещения волн  $0 - 360^{\circ}$  с разрешающей способностью

**Рис. 1.28.** Фрагмент постановки буя с научно-исследовательского судна. На заднем плане – береговая линия

измерения направления  $1,5^\circ$ . При вычислении энергетического спектра, разрешение  $0,005$  Гц на частотах, меньших  $0,1$  Гц и  $0,01$  Гц на частотах, превышающих  $0,1$  Гц. Температурный датчик обеспечивает измерение температуры в пределах от  $0,5$  °C до  $45,0$  °C с точностью  $0,2$  °C.

В отличие от предыдущих моделей буйковых систем, измерявших направление распространения волнения по характеристикам уклонов волн, Waverider определяет направление на основании анализа горизонтальных перемещений буя. Небольшие размеры делают его менее чувствительным к воздействию морских течений; корректная работа прибора гарантируется при скоростях течений, не превышающих  $2,5$  м/с.

При измерении волновых параметров волна трактуется как явление между двумя пересечениями волнового профиля с нулевой линией, соответствующей уровню моря. За интервал времени между указанными пересечениями гребень волны соотносится с максимумом профиля, ложбина – с минимумом. Разность между высотами гребня и ложбины принимается за высоту волны, величина временного интервала прохождения гребней волны через точку измерений определяет период.

Передача данных с буя на приемное береговое устройство осуществляется по радиоканалу каждые 3 часа, при превышении высоты волны  $H_{1/3}$  уровня в  $1,5$  м – каждый час. Объем и состав получаемой информации являются программно- управляемыми. На время эксперимента материалы, передаваемые волнографом, включали 4 блока данных:

1. Файл вычисленных статистических параметров волнения для серии из 256 волн.
2. Файлы спектральных характеристик волнения, вычисленных непосредственно на буе за 30-мин. интервал времени.
3. Накопленный файл спектральных характеристик. Каждая новая реализация дописывается в конец существующей записи.
4. Файлы данных для последующей обработки общей продолжительности 20 мин, содержащие 1536 измерений движений буя в трехмерной системе координат (вертикаль-север-запад); значения в проекциях на оси координат представлены в сантиметрах.

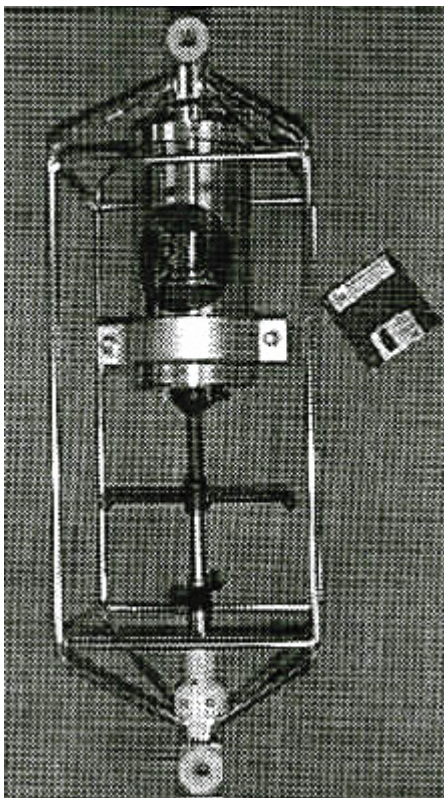
Полученные данные пересчитываются в реальные высоты и периоды волн, при этом определяется число волн, зарегистрированные для каждого 20-минутного интервала времени.

В ходе эксперимента удалось накопить многомесячный непрерывный ряд наблюдений за параметрами морского ветрового волнения.

Полученный уникальный материал наблюдений дал возможность провести исследования статистических и спектральных характеристик волн на этапе квазистационарности. В 3-й главе анализируются и обсуждаются закономерности штормовой активности, а также некоторые климатические обобщения в рамках синоптической и сезонной изменчивости.

### **1.5. Методы и средства исследования циркуляции вод и течений**

Исследование циркуляции вод и течений в море является сложной технической задачей. Кроме этого, требуются большие материальные затраты. Лаборатория экспериментальной гидрологии Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова более 40 лет занимается изучением течений в Черном море. В процессе этих исследований разрабатывалась методика исследований и создавалось оборудование для измерений течений в открытом море от поверхности моря до дна.



**Рис. 1.29.** Акустический измеритель течений 3D-АСМ

гидрофизических характеристик до горизонта 500 м на разрезе “берег – открытое море”. Данные разреза позволяют расчетным методом определять вертикальную структуру Кольцевого Циклонического течения Черного моря и вихревые образования на его прибрежной периферии. Календарное время выполнения работ на разрезах определялось по спутниковой информации об инфракрасном излучении поверхности моря, по которой четко отслеживается местоположение Кольцевого Циклонического течения и вихревых структур.

Для измерения скорости и направления течений, а также температуры воды использовались измерители “ПОТОК” и 3Д-АСМ (рис. 1.29).

1. Измеритель течения и температуры воды “ПОТОК” Опытно-конструкторского бюро океанологической техники РАН:

- датчик скорости – пропеллерный, реверсивный,
- датчик направления – магнитный компас,
- диапазон измерения скорости – от 3 до 150 см/с,
- погрешность измерения скорости – (1)% от измеряемой скорости,
- диапазон измерения направления – 360°,
- погрешность измерения направления – не более 5°,
- диапазон измерения температуры – от (-2) до (+32)°С,
- погрешность измерения температуры – (0,05)°С,

Первоначально измерения течений выполнялись с борта судна, стоящего на якоре. В этом случае измерения проводились только на шельфе до глубины 50-60 м (постановка на якорь). Затем, с появлением измерителей течений с автономными регистраторами измерения стали проводить с автономных буйковых станций (АБС), которые устанавливались на якорях. Для измерения придонных течений использовались специальные треноги, на которых устанавливался измеритель.

АБС широко используется и сейчас. Ее комплект состоит из пенопластового цилиндрического буйа; мачты с отражателем; буйрепа (трос), к которому на специальных зажимах крепятся треугольные кронштейны для подвески измерителей; якорной системы, состоящей из двух грузов и якорных цепей. АБС имеют различную грузоподъемность. Для измерения течений на черноморском шельфе используются буйи грузоподъемностью 175 и 300 кг, чтобы АБС после ее установки была устойчива во время волнения.

Последние 2 года в районе Южной Озеревки, расположенной в 18 км западнее г. Новороссийска, регулярно проводятся измерения течений на шельфе. Одновременно, по мере необходимости, выполнялись измерения

датчик времени – кварцевые часы,  
погрешность измерения времени –  $(210^{-4})$ ,  
цикл измерений – от одной до 255 минут.

2. Измеритель течения и температуры воды 3Д-АСМ (Three-Dimensional Acoustic Current Meter) фирмы Falmouth Scientific, Inc. (рис. 1.29):

датчик скорости – акустический,  
датчик направления – магнитный компас,  
диапазон измерения скорости – от 0 до 300 см/с,  
погрешность измерения скорости –  $(0,1 \text{ см/с})$ ,  
диапазон измерения направления –  $360^\circ$ ,  
погрешность измерения направления –  $(1,0)^\circ$ ,  
диапазон измерения температуры – от  $(-2)^\circ\text{C}$  до  $(+35)^\circ\text{C}$ ,  
погрешность измерения температуры –  $(0,05)^\circ\text{C}$ ,  
цикл измерений – 10 минут.

3. Для измерения гидрофизических характеристик использовался зондирующий комплекс “Sea Bird” фирмы “Sea Bird Electronics, Inc”.

погрешность измерения температуры –  $\pm 0,003^\circ\text{C}$ ,  
погрешность измерения электропроводимости –  $\pm 0,003 \text{ мСим/см}$ ,  
погрешность измерения давления – менее 0,01% от полной шкалы.

---