

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ КУЛЬТУР ФИТОПЛАНКТОНА

Г.А. Толкаченко, О.В. Мартынов,
Е.Б. Шибанов
Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, Капитанская, 2
E-mail: lee@alpha.mhi.iuf.net

Современные знания о глобальном распределении растительной биомассы и первичной продукции в океане получены на основе установленной зависимости этих характеристик от содержания в морской воде хлорофилла. С учетом способности хлорофилла и других пигментов микроводорослей поглощать световую энергию в определенных, характерных для каждого пигмента участках спектра, разработаны спектофотометрические методы определения содержания пигментов фитопланктона. При высоких концентрациях клеток водорослей в единице объема измерения спектров поглощения позволяют с достаточной высокой точностью оценивать качественный и количественный состав основных пигментов в растительных клетках.

Основной проблемой использования методов фотометрии в условиях натуральных измерений является невысокая плотность клеток в природных водах и, как следствие, технические и методические трудности измерений чрезвычайно малых значений показателя поглощения. Поэтому прямые измерения спектров поглощения культур микроводорослей проводят, как правило, в условиях хорошо оснащенных лабораторий после предварительного повышения концентрации клеток в исследуемых объемах (осаждение фитопланктона на фильтрах, центрифугирование и др. [1]).

Повышение точности измерений показателя поглощения в натуральных условиях может быть достигнуто применением косвенного метода определения поглощения - по яркости выходящего из

моря излучения. В последние десятилетия этот метод широко используется для оценки концентраций хлорофилла по данным дистанционных измерений яркости океана в отдельных участках спектра.

В практике судовых наблюдений определения спектров поглощения по измерениям спектральной яркости водной поверхности проводятся довольно редко по ряду причин. Основными из них являются большие погрешности измерений, обусловленные техническими и методическими трудностями измерения абсолютных значений яркости. Существенны также проблемы учета света, отраженного от водной поверхности, оценки влияния обратного рассеяния, коррекции эффекта упаковки пигментов в клетках и др. [2].

Методы измерений спектров яркости в относительных величинах - спектральных значений коэффициента яркости природных вод - предложены в работе [3]. Основной их идеей является отказ от измерений абсолютных значений яркости, связанной со многими проблемами калибровок по эталонам яркости, и замена их значениями спектральной яркости, нормированными на облученность из верхней полусферы. В результате, искомую характеристику - спектральный коэффициент яркости водной среды - получают путем непосредственных измерений прибором, градуировка которого сводится к измерению коэффициента яркости диффузно рассеивающего экрана со стабильными спектральными и угловыми характеристиками отражения.

Измерения спектральной яркости обычно выполняют в открытом море с большой глубиной и при таких углах освещения, когда отражения от дна и тень корабля не искажают подводное световое поле в районе наблюдений. Во многих практически важных случаях (измерения на мелководье, в образцах лабораторных или промышленных культур) этот метод не используется,

несмотря на его существенные преимущества по сравнению с прямыми фотометрическими измерениями. Измерения коэффициентов яркости образцов воды в отдельных пробах не проводят из-за возможных искажений подводного светового поля затенениями от деталей прибора и отражений от стен кюветы.

В прибрежных участках и в открытом море часто создаются условия, при которых концентрация клеток фитопланктона повышается в десятки раз, их биомасса исчисляется сотнями $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$, а во время «цветения» водорослей – даже в $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ [4]. Такие концентрации клеток характерны и для условий промышленного культивирования микроводорослей. При столь значительных концентрациях, как правило, доминирует определенный вид микроводорослей с характерной для него структурой пигментов. Спектры поглощения пигментированных клеток, при этом, несут информацию о степени адаптации клеток к условиям окружающей среды и о наличии в среде тех или иных лимитирующих факторов. В таких ситуациях определение спектрального поглощения по измерениям спектрального коэффициента яркости не представляет особых трудностей и может быть легко выполнено с высокой точностью.

В данной работе рассматриваются некоторые вопросы измерений спектров коэффициента яркости на пробах суспензий фитопланктона и обсуждаются результаты определения спектрального поглощения культур микроводорослей по измеренным данным.

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

Исследуемые культуры

Измерения коэффициентов яркости проводились на образцах культур микроводорослей, относящихся к трем группам: сине-зеленые (*Spirulina platensis*), зеленые (монокультура - *Chlorella sp.* и поликультура - *Dunaliella maritima* + *Dunaliella viridis* + *Platymonas viridis* +

Stichococcus bacilla) и красные (*Porphyridium cristum* + *P. cruentum*).

Видовой состав культур выбирался из следующих соображений. Спектры поглощения пигментов этих водорослей достаточно хорошо известны и расположены примерно равномерно в видимой области спектра. Поэтому с их помощью можно оценить правильность идентификации пигментов в видимом диапазоне спектра и оценить возможность их отдельного определения по спектрам поглощения суспензий водорослей.

Важным моментом определения спектров поглощения по спектрам яркости является учет зависимости рассеяния света от формы и размеров клеток. Выбор в качестве объекта исследований *Spirulina platensis* был обусловлен, наряду с прочими соображениями, также и намерением выяснить, как скажется своеобразная форма клеток этих нитчатых водорослей на результатах коррекции восстанавливаемых спектров поглощения. Остальные виды исследуемых культур имеют овальную форму и, как известно из литературных источников, могут быть успешно аппроксимированы однородными сферами.

Культуры микроводорослей были получены из коллекции фитопланктона ИнБЮМ НАН Украины. Для повышения в суспензиях концентраций клеток, и адаптации их к условиям высокой освещенности, культуры освещались естественным светом в следующем режиме: прямые солнечные лучи – 5 час, рассеянный дневной свет 9 час, темнота – 10 часов. В дневное время культуры перемешивались с помощью барботирования суспензий сжатым воздухом.

Питательные среды для зеленых и красных водорослей готовились на основе стерилизованной морской воды. Для вида *Spirulina platensis* использовалась среда, оптимизированная для культивирования этих водорослей в промышленных условиях.

Размеры клеток и их численность определялись прямым микроскопическим

подсчетом. Результаты этих определений сведены в табл. 1.

Таблица 1.

Номер образца	Вид микроводорослей	Численность, млрд. кл. м ⁻³	Средний диаметр, мкм	Ср. квадр. отклонен., мкм	
				Измерено	Принято
1	<i>Chlorella sp.</i>	0,63	2,5	0,47 – 0,52	0,50
2	<i>Dunaliella maritima</i> + <i>Dunaliella viridis</i> + <i>Platymonas viridis</i> + <i>Stichococcus bacilla</i>	0,87	7,2	1,39 – 1,49	1,44
3	<i>Spirulina platensis</i>	1,8	1,1	0,15 – 0,17	0,17
4	<i>Porphyridium cristum</i> + <i>P. cruentum</i>	0,27	4,7	0,93 – 0,95	0,94

Отметим, что средний диаметр сфер, аппроксимирующих цилиндрические клетки водоросли *Spirulina platensis* определялся по диаметру клеток, т.к. вклад малых частиц в обратное рассеяние наиболее существенен. Аналогичный подход при анализе спектров удельного поглощения клеток цилиндрической формы был использован в работе [9].

Методика измерений.

Измерения выполнялись в период с 25.09.00 по 3.10.00 с помощью дифференциального спектрофотометра, предназначенного для измерений коэффициентов яркости морской поверхности в экспедиционных условиях [3]. В данном эксперименте прибор имел следующие характеристики.

Технические характеристики спектрофотометра

Спектральный диапазон, нм	320 – 730;
Спектральное разрешение прибора, нм	10;
Среднеквадратичная погрешность измерения коэффициента яркости, %	3;
Погрешность определения длины волны, нм	2;
Время регистрации спектра, с	15 – 30;
Угол поля зрения прибора, град.	2;
Диаметр пятна визирования на поверхности суспензии, мм	18.

Схема измерений спектральных коэффициентов яркости образцов микроводорослей приведена на рис. 1.

Градуировка оптических каналов прибора производилась по белому экрану из фторопласта-4 с известными и стабильными характеристиками отражения [5] с помощью нейтральных ослабителей. Калибровка канала длин волн выполнялась с помощью интерференционных фильтров. Методика градуировки приведена в [3].

Пробы микроводорослей объемом 500 мл заливались в измерительную кювету, две противоположные стенки которой, как показано на рис.1, откло-

нены от вертикали на 45°. С внутренней стороны стенки и дно кюветы оклеены поглощающими пластинами из нейтральных стекол с высокой оптической плотностью.

Измерения выполнялись в направлениях, близких к надиру. Для учета отражений и затенений от корпуса прибора, а также яркости участка небосвода, отраженного поверхностью суспензии в сторону объектива спектрофотометра, после измерений спектрального коэффициента яркости в кювету заливалась чистая вода, и измерялись спектральные характеристики суммарного отклика на отражения небосвода и другие мешаю-

щие факторы, в том числе и темновые токи спектрофотометра.

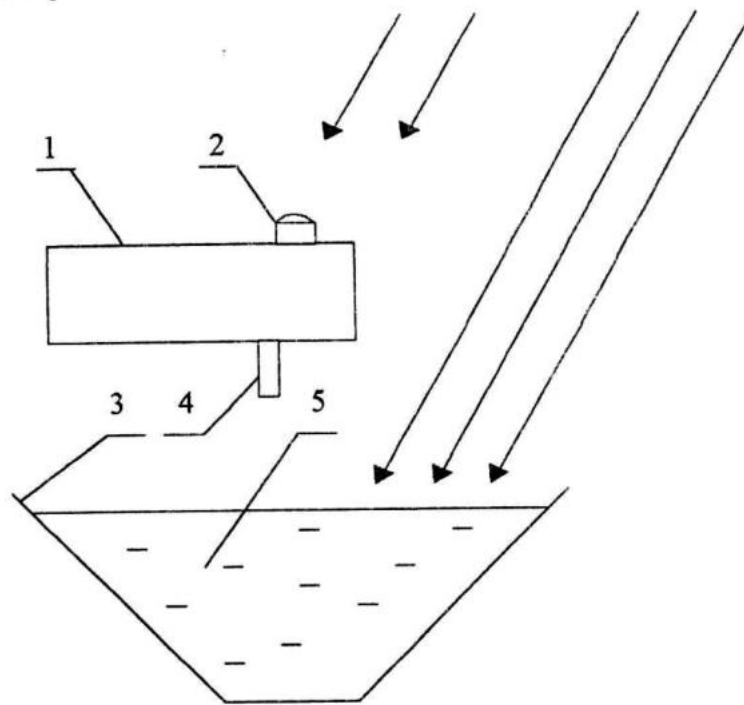


Рис.1. Схема измерений коэффициента яркости концентрированных суспензий микроводорослей: 1 – спектрофотометр; 2 – датчик облученности сверху; 3 – кювета объемом 500 мл с зачерненными стенками и дном; 4 – объектив; 5 – суспензия клеток фитопланктона. Освещение кюветы осуществлялось прямыми солнечными лучами и рассеянным светом небосвода.

Измеренные сигналы в цифровой форме подавались на вход ПК, где с помощью пакета программ обработки формировались стандартизованные массивы исходных данных, включающие наряду с результатами измерений и дополнительную информацию об условиях наблюдений (время и место измерений, состояние облачности и др.).

Результаты измерений спектральных значений коэффициента яркости приведены на рис.2. Из рисунка видно, что значения коэффициентов яркости находятся в диапазоне 0 – 8%, что хорошо согласуется с теоретическими оценками и результатами измерений коэффициентов яркости в открытом море. В то же время представленные на рис. 2 спектры имеют некоторые особенности. В природных водах максимальные значения $\rho(\lambda)$ характерны для очень чистых вод океана с минимальными концентрациями растворенных и взвешенных в воде

веществ и находятся в синей области спектра. При измерениях спектров суспензий в кювете максимальные значения коэффициентов яркости обнаруживаются в красной области и увеличиваются с ростом концентрации клеток. Отмеченные особенности вызваны различными механизмами обратного рассеяния и поглощения света в сравниваемых средах.

Алгоритм оценки спектральных показателей поглощения света

Из результатов экспериментальных исследований и численного моделирования подводного светового поля следует, что коэффициент яркости верхнего слоя моря $\rho(\lambda)$ может быть выражен через отношение обратного рассеяния $\beta(\lambda)$ к поглощению $\alpha(\lambda)$ [1,2],

$$\rho(\lambda) = f[\beta(\lambda)/\alpha(\lambda)], \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, а функциональная зависимость f определяется, в частности, объемной функцией рассеяния, геометрией наблюдения и угловым распределением падающего светового потока. Поскольку достоверными

сведениями об индикатрисах рассеяния исследуемых культур мы не располагали, вместо выражения (1) использовалась упрощенная формула [6]

$$\rho(\lambda) = 0,17 [\beta(\lambda) / \alpha(\lambda)]. \quad (2)$$

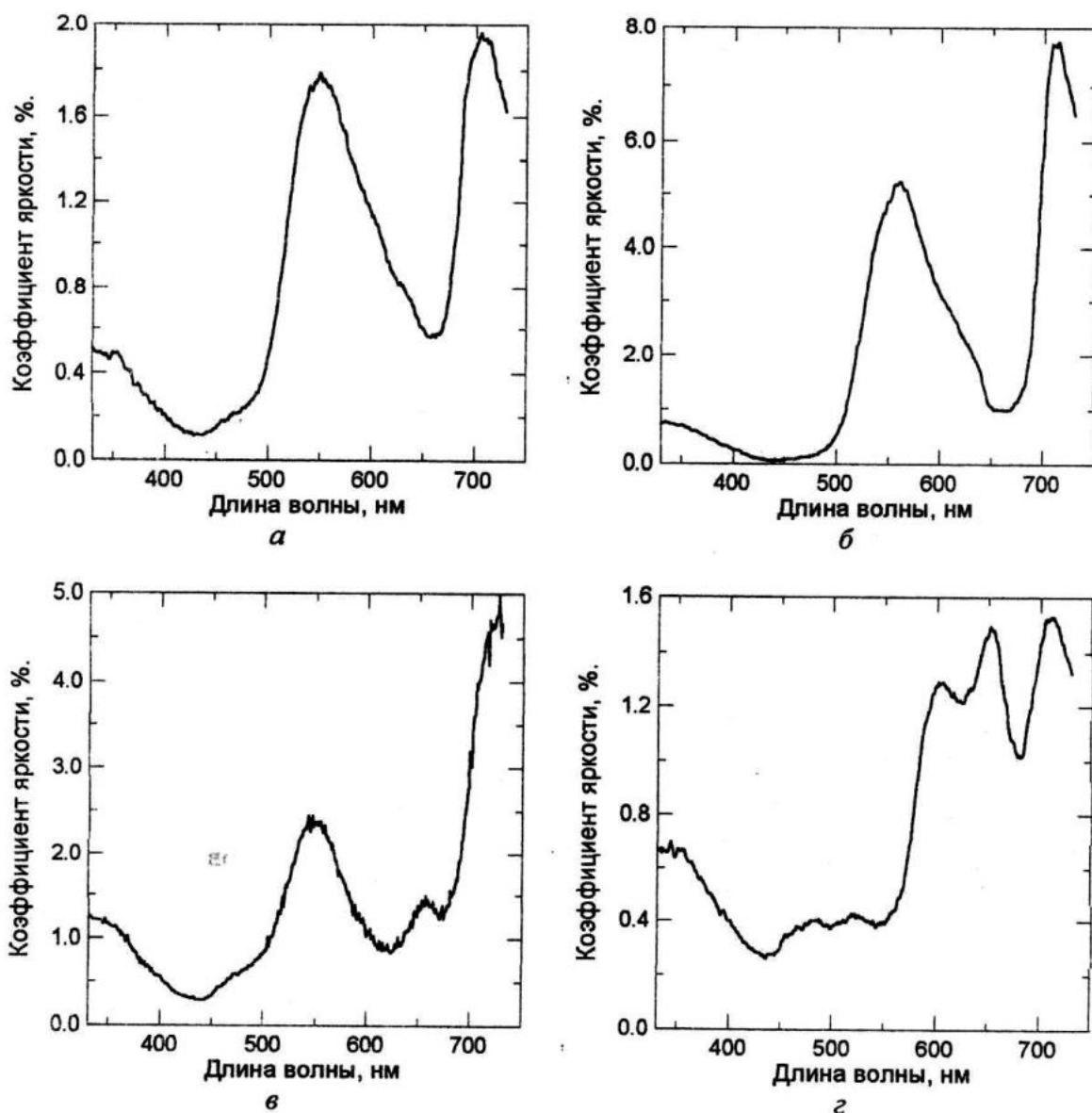


Рис.2. Спектры коэффициента яркости культур микроводорослей: а - *Chlorella sp.*; б - *Dunaliella maritima* + *Dunaliella viridis* + *Platymonas viridis* + *Stichococcus bacilla*; в - *Spirulina platensis*; г - *Porphyridium cristum* + *Porphyridium cruentum*.

При высоких концентрациях клеток водорослей в суспензии можно предположить, что первичные оптические характеристики взвесей фитопланктона полностью определяются оптическими свойствами микроводорослей. Поскольку клетки фитопланктона относятся к

крупной взвеси с размерами клеток 1 – 10мкм, спектральный ход показателя обратного рассеяния можно определить как

$$\beta(\lambda) \sim 1/\lambda \quad (3)$$

Дополнительная информация о спектральных особенностях обратного рассеяния может быть получена на основе теории Ми. Согласно теории обратное рассеяние среды, состоящей из однородных по показателю преломления поглощающих сфер радиусом r , зависит от показателя преломления m и от безразмерного параметра дифракции $x=2\pi r/\lambda$. Клетки фитопланктона характеризуются комплексным показателем преломления $m = n - ik$. Мнимая часть показателя преломления $k(\lambda)$ вычислялась из соотношения

$$\alpha(\lambda) = 4\pi k(\lambda) / \lambda, \quad (4)$$

где спектр поглощения $\alpha(\lambda)$ определялся по данным измерений $\rho(\lambda)$ из выражения (2).

Расчет действительной части показателя преломления проводился численно на основе соотношений Крамерса-Кронига [7, стр. 41]. При этом опорное значение относительного показателя преломления принималось равным 1,0588 [2].

Для определения параметра дифракции задавалась нормальное распределение частиц по размерам с параметрами распределения, приведенными в табл. 1.

Восстановление спектра поглощения проводилось с использованием итерационной процедуры по следующей вычислительной схеме:

- из формулы (2) находились спектральные значения поглощения, причем на первом шаге итерации обратное рассеяние считалось заданным выражением (3);
- рассчитывались таблицы зависимости показателя поглощения частиц от величины мнимой части показателя преломления. По этим таблицам на основе полученной оценки спектра поглощения находился спектр мнимой части показателя преломления;
- рассчитывалась действительная часть показателя преломления;
- на основе теории Ми для заданного распределения частиц по размерам

и для вычисленного спектра показателя преломления рассчитывались спектры обратного рассеяния и поглощения.

Следующую итерацию проводили с учетом уточненной функции обратного рассеяния. Новое значение обратного рассеяния искалось в виде суммы теоретического спектра обратного рассеяния и некоторого спектра $C \cdot 1/\lambda$, где константа C подбиралась так, чтобы обеспечить наилучшее совпадение теоретического спектра коэффициента яркости с экспериментально измеренным значениями $\rho(\lambda)$.

Для получения относительной ошибки аппроксимации экспериментального спектра теоретическим менее 0,01 было достаточно 5 - 7 итераций.

Примеры оценок спектральных характеристик показателя поглощения для исследованных культур водорослей приведены на рис. 3.

Обсуждение результатов.

Измеренные спектры коэффициентов яркости культур микроводорослей существенно отличаются от спектров $\rho(\lambda)$, измеренных в открытом море. На морских спектрах: а) никогда не обнаруживаются полосы поглощения в зеленой и красной областях спектра и 2) крайне редко проявляется поглощение в синей области. Это обусловлено тем, что в морской воде наряду с клетками фитопланктона во взвешенном и растворенном состоянии находится большое количество других оптически активных веществ. Да и чистая вода с известными характеристиками рассеяния и поглощения также является оптически активной средой. Эффективный путь света в море составляет многие десятки метров и спектр яркости моря определяется суммарным воздействием различных компонентов взвеси вдоль этого пути. Их влияние зачастую намного превышает вклад поглощения и рассеяния клетками микроводорослей в формирование подводного светового поля.

При измерениях $\rho(\lambda)$ в кювете толщина слоя суспензии не превышает 50

мм. Эффективный путь света при используемых концентрациях клеток составлял единицы и десятки миллиметров. На таких коротких расстояниях оптические свойства воды не влияют на коэффициент яркости суспензии. Побочные частицы в суспензии отсутствовали. Поэтому обратное рассеяние

$\beta(\lambda)$ и поглощение $\alpha(\lambda)$ суспензии в кювете определялись лишь оптическими характеристиками клеток микроводорослей с присущими каждому виду водорослей размерами, формой и распределением пигментов.

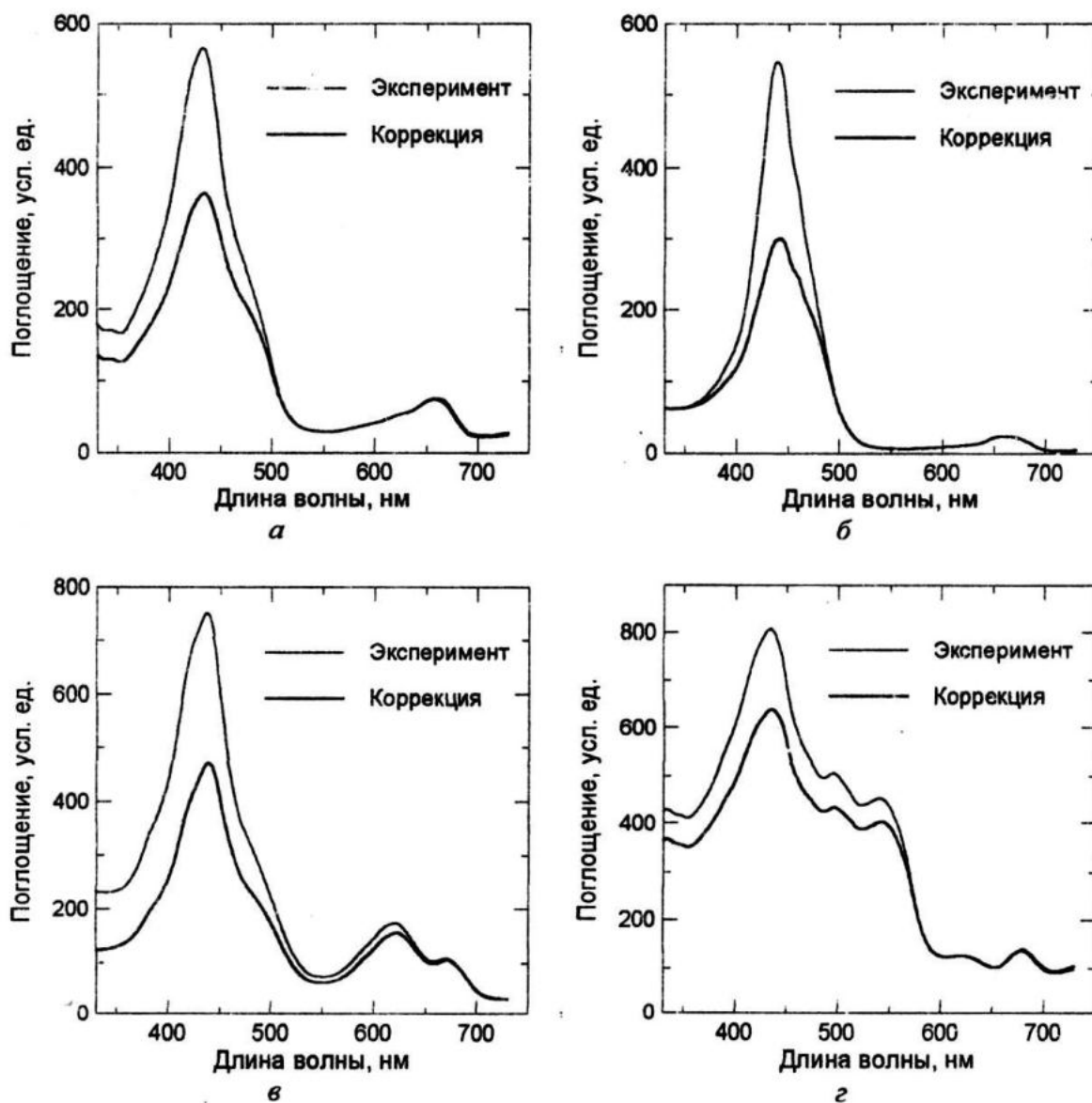


Рис.3. Оценки спектров показателя поглощения клеток фитопланктона по измеренным спектрам яркости образцов культур микроводорослей. Обозначения видов водорослей те же, что на рис. 2. Спектры поглощения, обозначенные как «Эксперимент», вычислялись по формуле (2). Обозначение «Коррекция» относится к восстановленным спектрам поглощения с учетом спектральных значений обратного рассеяния, рассчитанных по теории Ми.

Рассмотрим спектральные зависимости коэффициента яркости, приведенные на рис.2. Из рисунка видно, что

формы спектров различных видов микроводорослей имеют некоторые общие черты -- наличие мощных полос погло-

щения в синей (440 нм) и в красной (675 нм) областях спектра. Для зеленых (рис. 2 а, б) эти две основные полосы поглощения разделены полосой пропускания в зеленой области. Максимумы полос пропускания и ширина полос поглощения у зеленых не совпадают.

Общими чертами сине-зеленых (рис. 2 в) и красных (рис. 2 г) являются наличие двух локальных минимумов в красной области спектра (600 – 700 нм). Индивидуальной особенностью красных является наличие сильного поглощения в зеленой области спектра (500 – 570 нм).

Формы спектров поглощения, рассчитанных по кривым спектральных значений коэффициента яркости (рис. 3), отражают особенности размещения полос поглощения пигментов в видимой области спектра. Существенным преимуществом анализа спектров поглощения $\alpha(\lambda)$ по сравнению со спектрами яркости является возможность идентификации основных полос поглощения и установления их связей с известными спектрами поглощения пигментов микроводорослей.

Для каждого вида микроводорослей на рис. 3 приведены по два спектра поглощения. Различия между ними следующие. Спектры, обозначенные как «Эксперимент», рассчитывались по формуле (2) на первом шаге итерационного процесса. Фактически это спектры, построенные без учета влияния обратного рассеяния на коэффициент яркости. После введения коррекции на величину обратного рассеяния (окончание итераций) получены спектры, обозначенные как «Коррекция». Если все наши предположения верны, то спектры, полученные в результате такой коррекции должны полностью соответствовать спектрам поглощения, измеренным прямыми методами спектрофотометрии на суспензиях живых клеток фитопланктона. Подчеркнем, что никакие иные поправки, в том числе и учет эффектов упаковки, на данном этапе работ

не вводились. Это важно отметить, потому что спектры поглощения живых водорослей, полученные обоими методами, должны быть более близки, чем спектры поглощения экстрагированных пигментов, поскольку в обоих случаях измеряются характеристики не чистых пигментов, а белково-пигментных комплексов, максимально приспособленных для процессов фотосинтеза.

С учетом последнего замечания рассмотрим особенности полученных спектров, причем не будем акцентировать внимание на спектрах «Эксперимент» или «Коррекция», так как нас сейчас интересует не столько точные соотношения концентраций пигментов, сколько возможность привязки отдельных полос поглощения к определенным пигментам.

У зеленых (рис. 3 а, б) хорошо видны красная и синяя полосы поглощения хлорофилла *a*. На длинноволновом склоне синей полосы поглощения в области 455 – 490 нм наблюдается уменьшение производной по спектру, что может быть вызвано влиянием поглощения хлорофилла *b* или каротиноидов. Характерная для *Dunaliella* ступенька на правом крыле синей полосы поглощения, обусловленная поглощением каротиноидами, на приведенных спектрах четко не выделяется. Возможными причинами этого могут быть:

- низкая разрешающая способность прибора по спектру (при фотометрировании пигментов фитопланктона используется спектральное разрешение порядка 0,5 – 1 нм, а в нашем случае было установлено спектральное разрешение 10 нм);

- относительная концентрация клеток *Dunaliella* в поликультуре могла оказаться недостаточно высокой для проявления характерного признака.

В красной области спектра у зеленых также наблюдаются определенные особенности. Во-первых, отношение величины максимума в синей полосе поглощения к максимуму в красной очень ве-

лико, что, возможно, вызвано адаптацией клеток к высоким уровням освещенности. Во вторых, форма красной полосы поглощения не симметрична - коротковолновое крыло красной полосы поглощения имеет значительно меньшую крутизну и захватывает область спектра вплоть до 600 нм. Этот эффект также может быть обусловлен суммарным действием низкого спектрального разрешения и присутствием в спектре зеленых характерной полосы поглощения хлорофилла *b*. Косвенным подтверждением этого может служить симметрия красной полосы поглощения у сине-зеленых и красных, в число пигментов которых хлорофилл *b* не входит.

Характерными особенностями спектров поглощения сине-зеленых (рис. 3в) и красных (рис. 3г) является наличие сильных полос поглощения дополнительных пигментов - фикоцианина (полоса поглощения в области 580 - 650 нм) и фикоэритрина (480 - 580 нм). Межвидовые соотношения поглощения в указанных участках спектра исследованных проб хорошо согласуются с имеющимися представлениями о присутствии этих пигментов у видов *Spirulina* и *Porphyridium*. Так, для *Spirulina platensis* характерно высокое содержание фикоцианина (до 5 - 7% абсолютно сухого веса) и эта особенность четко проявляется в спектре поглощения - полоса поглощения фикоцианина намного мощнее красной полосы поглощения хлорофилла *a*. Для красных водорослей вида *Porphyridium* характерно высокое содержание оранжевого пигмента фикоэритрина и значительно меньшее по сравнению со *Spirulina platensis* содержание фикоцианина. Упомянутые особенности пигментной структуры хорошо проявлены в приведенных на рис. 3 спектрах. Сопоставление скорректированного спектра поглощения исследованной популяции *Porphyridium* (рис. 3г) со спектром поглощения *in vivo* водоросли вида *Porphyridium purpureum*, приведенных в [8,

(рис.3.1 на стр. 88)] также показало полное соответствие полос поглощения и пропускания по всему видимому диапазону спектра.

Таким образом, представленный метод косвенного определения спектрального поглощения клеток фитопланктона обеспечивает простой и быстрый метод качественного анализа пигментного состава микроводорослей и может быть рекомендован для использования как при изучении природных популяций водорослей в процессе экологических исследований, так и для контроля состояния микроводорослей в лабораторных или в производственных условиях. В частности, предложенный метод может эффективно использоваться для управления технологическими процессами и контроля качества продукции при промышленном культивировании микроводорослей.

ЛИТЕРАТУРА

1. B.G. Mitchell and D.A. Kieffer. Chlorophyll *a* specific absorption and fluorescence excitation spectra for light-limited phytoplankton. // *Deep-Sea Research* 1988, Vol 35. No. 5. pp. 639-663.
2. D. Stramski, A. Morel, A. Bricaud. Modeling the light attenuation and scattering by spherical phytoplankton cells: a retrieval of the bulk refractive index. // *Applied Optics*, 1988, vol. 27. No 19. pp 3954 - 3956.
3. М.Е. Ли, О.В. Мартынов. Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод. // «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа». Севастополь: МГИ НАН Украины. 2000. - С. 163 - 173.
4. Л.В. Георгиева, Л.Г. Сеничкина. Фитопланктон Черного моря: современное состояние и перспективы исследований. // *Экология моря*. - 1996 - вып. 45, с. 6 - 12.

5. В.С. Хазанов, Т.Я. Крайман. Светоизмерительная белая пластина из фторопласта. // «Оптико-механическая промышленность», 1975, № 4, с. 50-52.

6. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color.- *Limnology and Oceanography.*, 1977, Vol.22, No.4, pp. 709-722.

7. К.Ф. Борен, Д.Р. Хафман. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – Москва, “Мир”. 1986. 660 с.

8. Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods/ ed. by S.W.Jeffery, R.F.C. Mantoura and S.W. Wright. UNESCO Publishing, 1997. 661p.

9. J.T.O. Kirk. A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters: III Cylindrical and spheroidal cells. // *New Phytol.* 1976. V.77. pp. 341 – 358.

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ
ВОЛНОГРАФ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЯ
МОРСКИХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН**

В.Е. Смоллов, А.С. Запевалов
Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: ocean@alpha.mhi.iuf.net

В настоящее время для измерения уклонов коротких поверхностных волн используются приборы двух типов: лазерные уклонометры [1,2] и дифференциальные волнографы (или разностные уклонометры) [3]. К достоинствам лазерных уклонометров относятся высокое быстродействие, высокая чувствительность и возможность оценивать уклоны малых (диаметром 2-3 мм) площадок. В тоже время в силу своих конструктивных особенностей лазерные уклонометры не могут работать при высоте доминантных волн более 1-1.5 м, что создает известные трудности при проведении измерений в морских условиях. Они также не могут быть использованы для исследования мелкомасштабной пространственно-временной структуры, при которых необходимо проводить измерения в нескольких достаточно близко расположенных точках волнового поля [4]. В целом же, характеризуя лазерные уклонометры, можно отметить, что по своим эксплуатационным характеристикам они ближе к лабораторным приборам, чем к морским.

В то же время существует необходимость в надежных измерителях уклонов, для изучения мелкомасштабной структуры поверхности морской поверхности. Уклонометры должны быть пригодны как для проведения сеансов измерений со свободно дрейфующих буе, так и для долговременных измерений со ста-

ционарных оснований. Подобный уклонометр был разработан и изготовлен в отделе прикладной гидрофизики МГИ НАНУ.

Прототип дифференциального волнографа. В практике морских исследований широкое применение получили струнные резистивные волнографы, позволяющие измерять волны в широком диапазоне масштабов: от основных энергонесущих волн с длинами порядка 100 м, до волн ряби с длиной несколько сантиметров [5]. Чувствительным элементом волнографов этого типа является отрезок вертикально натянутой неизолированной проволоки, пересекающий границу раздела вода-воздух. Разработанный в отделе прикладной гидрофизики МГИ НАНУ широкополосный струнный волнограф имеет следующие характеристики:

- частотный диапазон - 0.05 - 40 Гц.
- диапазон амплитуд - 0.5 - 6 м - в зависимости от применяемого типа резистивных первичных преобразователей.
- разрешающая способность - 0.5 - 2.5 мм - в зависимости от диаметра и применяемого типа резистивных первичных преобразователей.
- динамический диапазон - 75 - 80 дБ - в зависимости от уровня помех в точке измерения. Максимальный динамический диапазон достигается при измерении одним прибором, при одновременном использовании нескольких приборов с близко расположенными датчиками динамический диапазон соответственно снижается вследствие взаимных наводок.

На базе широкополосного струнного волнографа был создан дифференциальный волнограф, предназначенный для измерения уклонов морской поверхности. Он позволяет определять уклоны морской поверхности как разность уровней в двух точках волнового поля, отнесенную к расстоянию между этими точками.

Конструкция дифференциального волнографа. Прибор состоит из выносного и бортового блоков, связанных между собой кабельной линией или радиоканалом. В

свою очередь выносной блок включает электронную схему и датчики.

Чувствительным элементом (датчиком) являются две параллельных проволочных струны, пересекающие морскую поверхность в вертикальном направлении. Минимальное расстояние между струнами 1 см, в зависимости от решаемых задач это расстояние может увеличиваться. Как правило используются датчики диаметром 0,25 мм, изготовленные из хромоникелевого сплава и имеющие погонное сопротивление 34 Ом/м.

Струны включены в плечи резистивного моста, питаемого переменным током гармонической формы звуковой частоты. Сигнал разбаланса моста после усиления поступает на вход генератора гармонических колебаний с фазовым управлением частотой, с выхода которого и питается измерительный мост. В целом такой измеритель представляет собой узкополосный фильтр с полосой пропускания порядка единиц герц, практически не реагирующий на помехи, частота которых отличается от его собственной, что позволяет размещать пары струн двух и более уклономеров в непосредственной близости друг от друга при условии различия частот генераторов.

Устройство выносного измерительного блока и бортового приёмного блока одного измерительного канала приведены на рис.1. Здесь R1 и R3 - верхние плечи измерительного резистивного моста, R4 и R5 - резистивные эквиваленты струнных датчиков, а R6 - резистор, задающий калиброванный разбаланс измерительного моста в процессе калибровки измерительного канала. Резистор R2 предназначен для балансировки измерительного моста. Блок K1 представляет собой дифференциальный усилитель, который выделяет сиг-

нал разбаланса измерительного моста и усиливает его до получения требуемой чувствительности преобразователя. Усилитель K2 с резисторами R9, R10 является фазоинвертором сигнала разбаланса и введён в схему для расширения диапазона частот, устойчиво генерируемых схемой и для повышения общей чувствительности схемы. Усилитель K3 с резисторами R7, R8 и конденсаторами C1, C2 образует RC генератор с мостом Вина а блок АРУ предназначен для стабилизации амплитуды генерируемых колебаний. Трансляционный усилитель ТУ необходим для согласования выхода генератора с кабельной линией связи, а блок дистанционного управления калибратором ДУК позволяет включать режим калибровки измерительного тракта по команде оператора.

Бортовой блок. Выходные сигналы измерителей имеют гармоническую форму, с эффективным напряжением около 4.5 В, и рассчитаны на передачу по проводным линиям связи с волновыми сопротивлениями 50 - 300 ом, длиной до 1.5 км или по радиоканалу с полосой пропускания 2,5 - 18 кГц, в которой можно разместить до пяти сигналов выносных измерительных блоков. Для преобразования частотно-модулированных сигналов выносного измерительного блока в сигналы постоянного тока, пригодные для регистрации стандартными средствами, разработан бортовой приёмный блок, состоящий из соответствующего количества каналов обработки ЧМ сигналов. Каждый из каналов блока состоит из активного полосового фильтра, выделяющего сигнал соответствующего измерителя, формирователя, устраняющего паразитную амплитудную модуляцию и преобразователя частоты-напряжение, выходной сигнал которого через буферный усилитель поступает на выход блока в виде напряжения амплитудой ± 5 вольт в полосе частот 0 - 25 Гц. Выходное сопротивление канала преобразования составляет 50 ом.

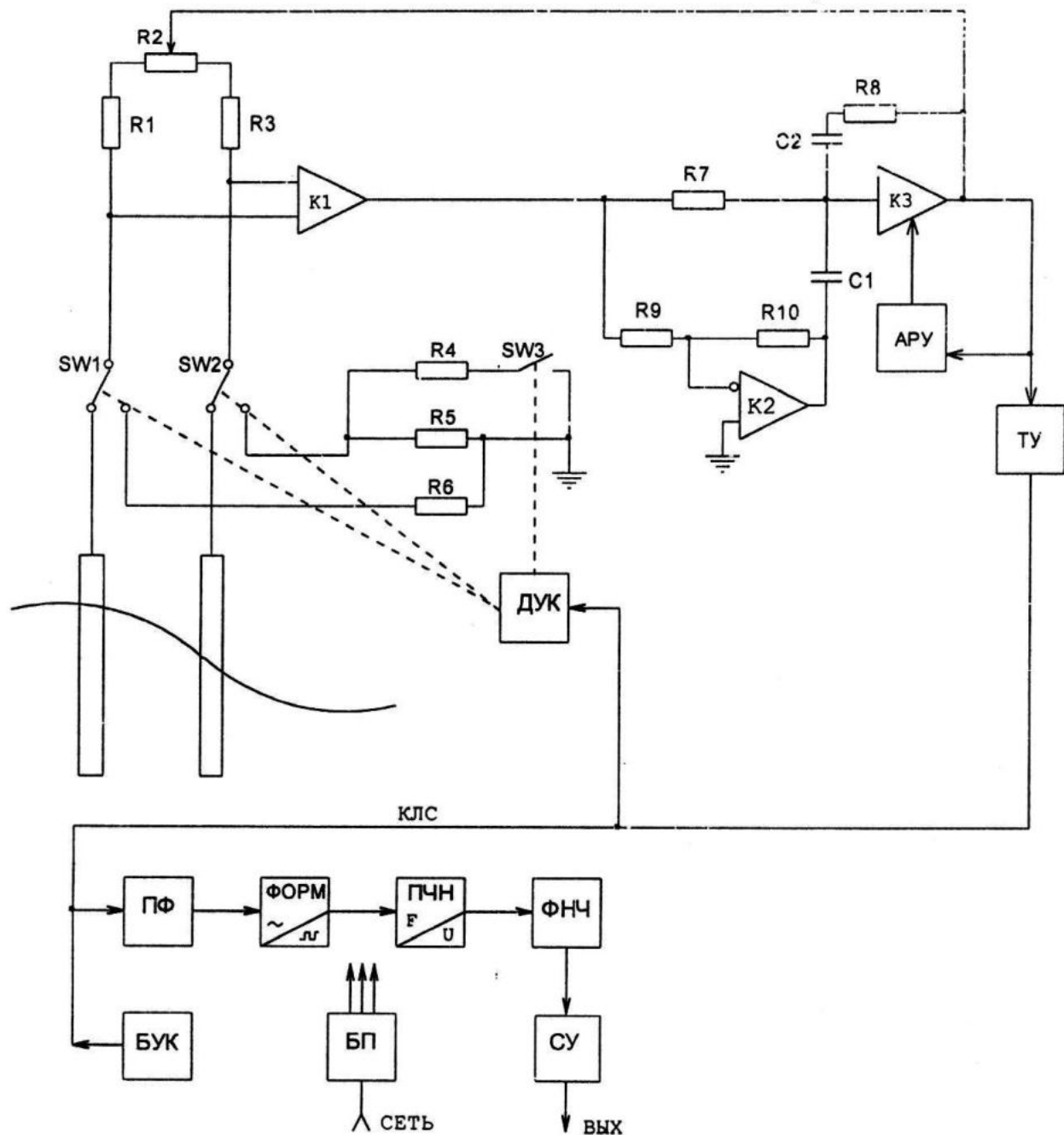


Рис. 1. Структурная схема дифференциального волнографа.

На входе бортового приёмного блока включён полосовой фильтр ПФ, который выделяет сигнал выносного измерительного блока и подавляет помехи, возникающие в кабельной линии связи КЛС из-за наличия паразитных ёмкостей между проводниками кабеля. Далее гармонический сигнал поступает на вход формирователя, построенного по схеме триггера Шмидта, преобразующий его в сигнал типа "ме-

андр" с крутыми фронтами, который запускает преобразователь частота - напряжение. Этот блок построен по схеме ждущего мультивибратора, со схемой фиксации уровней выходных импульсов. В целом такая схема позволяет получить сигнал, постоянная составляющая которого пропорциональна частоте входного сигнала. Выделение этой постоянной составляющей происходит в фильтре низкой час-

тоты ФНЧ, а согласующий усилитель СУ необходим для исключения влияния сопротивления нагрузки.

Блок управления калибратором БУК по команде оператора вырабатывает сигнал управления блоком ДУК. Блок питания БП обеспечивает необходимыми напряжениями все блоки, входящие в состав устройства.

Размещение струнных датчиков и особенности их применения. Для установки струнных датчиков дифференциального волнографа используется штанга, вертикально пересекающая морскую поверхность. На штанге крепятся два кронштейна, один из которых находится постоянно в воздухе, другой – под водой. Струна крепится таким образом, что она проходит через блок, размещенный на нижнем кронштейне, и два ее конца фиксируются в зажимах верхнего кронштейна. Задается натяжение струны ~ 600 г, что обеспечивается пружинным креплением блока на нижнем кронштейне. Это позволяет добиться равного натяжения струн, необходимого для сохранения параллельности последних при обтекании их водой. Максимальная длина струн не превышает 2 метров, что определяется допустимыми изгибами их потоком воды.

Основным фактором, ограничивающим разрешающую способность прибора, являются капиллярные эффекты смачивания струн, которые способны сместить точку электрического замыкания датчиков примерно на 2,5 мм от фактического положения поверхности воды. Однако близкое расположение струн позволяет компенсировать эти погрешности измерений до величины порядка 0,5 мм, что на базе 10 мм составляет угол уклона поверхности ~3°. На больших базах измерений погрешность соответственно уменьшается.

Калибровка. Для калибровки дифференциальных волнографов был разработан стенд. Он представляющий собой цилиндрическую кювету, заполняемую морской водой, глубиной 1.8 м, в которую погружался калибруемый измеритель. Критериями калибровки служили: подавление

синфазной составляющей сигнала (от вертикального перемещения) минимум на 65-68 дБ, и получение требуемой чувствительности при наклонах измерителя относительно поверхности воды.

При проведении измерений в морских условиях калибровка электрической части волнографа осуществлялась с помощью дистанционно включаемого калибратора, встроенного в выносной измерительный блок уклономера. При включении режима калибровки вместо чувствительных элементов к входам измерительного моста подключались резистивные эквиваленты струн, которым с периодом порядка 1 секунды задавался калиброванный разбаланс путём параллельного присоединения образцового резистора. На выходе бортового приёмного блока при этом появлялся сигнал прямоугольной формы, размах которого и являлся эталоном для сравнения с текущими значениями измеряемых уклонов.

Волнографический комплекс и его применение. Для исследований изменчивости тонкой структуры морской поверхности были созданы волнографические комплексы, включающие в свой состав один широкополосный и два дифференциальных волнографа. Три прибора размещались в одном контейнере, сигналы с которого по кабельной линии поступали в бортовой блок. Суммарная потребляемая мощность такого комплекса 5 Вт. Контейнеры выполнены в форме цилиндров диаметром 80 мм и длиной 600 мм, и имеют массу бкг. Полная герметичность контейнеров позволяет размещать их вблизи границы раздела вода-воздух, что, в свою очередь, позволяет использовать короткие линии связи между струнными датчиками и электронными преобразователями.

Одним из основных достоинств разработанного волнографического комплекса является возможность его применения в экспериментах, проводимых в открытом море, с помощью специальных буев, не вносящих заметных искажений в поле короткопериодных поверхностных волн. Волнографические комплексы использовались при измерениях с притоленной гра-

диентной станции, выполненной по типу вехи Фруда и с отслеживающего доминантные волны буя "Дельта" [6]. Буй "Дельта" состоит из трех размещённых по углам равностороннего треугольника и жёстко скрепленных между собой поплавков. В центре треугольника находится штанга для установки датчиков, шарнирно связанная с рамой буя и стабилизированная в вертикальном положении.

С помощью струнных волнографов был также проведен цикл экспериментов с медленно движущегося судна [7]. Датчики крепились на вертикально ориентированной штанге, вынесенной вперед перед форштевнем судна. Измерения проводились при скоростях судна 1-2 м/с. Этот диапазон скоростей является оптимальным. При больших скоростях возрастают динамические нагрузки на нижний, погруженный в воду конец штанги, и начинает сильно вибрировать оснастка. Кроме того, при больших скоростях за струнными датчиками возникает кавитация, существенно искажающая измерения уклонов. При меньших скоростях возмущения, генерируемые корпусом судна, достигают датчиков.

Авторы благодарят Г.Н. Христофорова, под руководством которого проводились разработки контактной волноизмерительной аппаратуры для исследования тонкой топографической структуры морской поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Palm C.S., Anderson R.S., Reese A.M. Laser probe for measuring 2-D wave slope spectra of ocean capillary waves // J. Appl. Optics.—1977.—V.46.—№ 4.—P.1074-1081.
2. Tober G., Anderson R.S., Shemdin O.H. Laser instrument for detecting water ripple slopes // J. Appl. Optics.—1973.—№ 4.—P.788-794.
3. Запевалов А.С., Христофоров Г.Н. Передаточная функция дифференциального волнографа // Морской гидрофизический журнал.—1991.—№2.—С.14-21.
4. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Смоллов В.Е. Измерения продольной когерентности в короткопериодных ветровых морских волнах // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1989.—Т.25.—№6.—С. 636-643.
5. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Шутов А.П., Смоллов В.Е. Опыт измерения широкополосного спектра ветровых волн в открытом океане // Морской гидрофизический журнал. 1986.—№ 6.—С. 28-32.
6. Мищенко Ю.А., Запевалов А.С., Христофоров Г.Н., Смоллов В.Е. Устройство для измерения характеристик морских ветровых волн // А.с. N1305874.—Бюл. №15.—23.04.87
7. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Смоллов В.Е., Мищенко Ю.А. Методика инструментального определения с движущегося судна эффектов, создаваемых внутренними волнами в приповерхностном слое моря // В кн: "Внутренние волны и турбулентность".—Севастополь.—МГИ АН УССР.—1984.—С. 166-177.

РЕГИСТРАТОР НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ

А.К.Куклин, Н.Я.Куклина,
О.А.Шабалина

Экспериментальное отделение
Морского гидрофизического инсти-
тута НАН Украины
Крым, пгт Кацивели

E-mail : ebmgi@yalita.yalta.iuf.net

Для измерения низкочастотных колебаний уровня водной поверхности в прибрежной зоне водоемов используются самописцы уровня с датчиками поплавкового типа с успокоительными колодцами. В ЭО МГИ НАН Украины регулярные измерения и запись колебаний уровня с помощью мареографа подобного типа осуществляются с 1949 г.

Успокоительные колодцы предназначены для сглаживания колебаний уровня воды, возникающие под воздействием морских волн и зыби. Колодцы представляют собой довольно сложные и дорогостоящие устройства. Сооружение таких колодцев в удалении от берега практически не производится. Применяются также регистраторы уровня моря гидростатического давления [1], показания которых зависят от изменения атмосферного давления. Такие приборы устанавливались в колодце мареографа сотрудниками МГИ НАН Украины в 1999 г. для сравнительных измерений. Разработаны системы уровня моря с применением контактных датчиков, на основе принципа Уолша, которые выдают информацию непосредственно на вход ЭВМ [2]. Здесь также имеется немало сложностей с использованием таких систем.

Установлено, что средний уровень взволнованной поверхности моря

может быть определен по длительности стояния волновых уровней на фиксированных высотах [3]. В этом случае элементарный объем, находящийся на среднем уровне взволнованной поверхности моря или любого водоема, имеет равную вероятность быть заполненным водой и воздухом. Для измерения длительности стояния волновых уровней на разных высотах использовались устройства со счетчиками, установленными стационарно в водоеме [4]. Однако в этих устройствах точность измерений зависела от расстояния между электродами датчика. При штилевой погоде такие датчики практически не работали. Кроме этого, в данном методе отсутствует наглядная запись уровня с целью оперативной оценки изменения уровня моря.

Рассматриваемое в данной работе устройство практически представляет собой высокоточный волнограф с регулируемой инерционностью. В данном устройстве регистрация низкочастотных колебаний уровня моря производится непрерывно, характеризуется наглядностью для оперативной оценки ситуации об изменении уровня моря, имеется возможность регулирования частотных характеристик прибора в широких пределах.

Устройство содержит (рис.1) контактный датчик, реверсивный двигатель, регулятор скорости вращения двигателя, блок реверсирования двигателя, преобразователь "вал-аналог", регистратор аналогового напряжения, источник питания, источник стабилизированного напряжения, электрод датчика для непосредственного контакта с водной поверхностью. С момента времени t_1 (рис.1) при прохождении гребня волны через электрод Э, электрод под

воздействием реверсивного двигателя перемещается вверх до момента t_2 , когда прекращается контакт электрода с водной средой. В это время

через блок реверсирования подается команда на изменение направления вращения двигателя (например, переключением

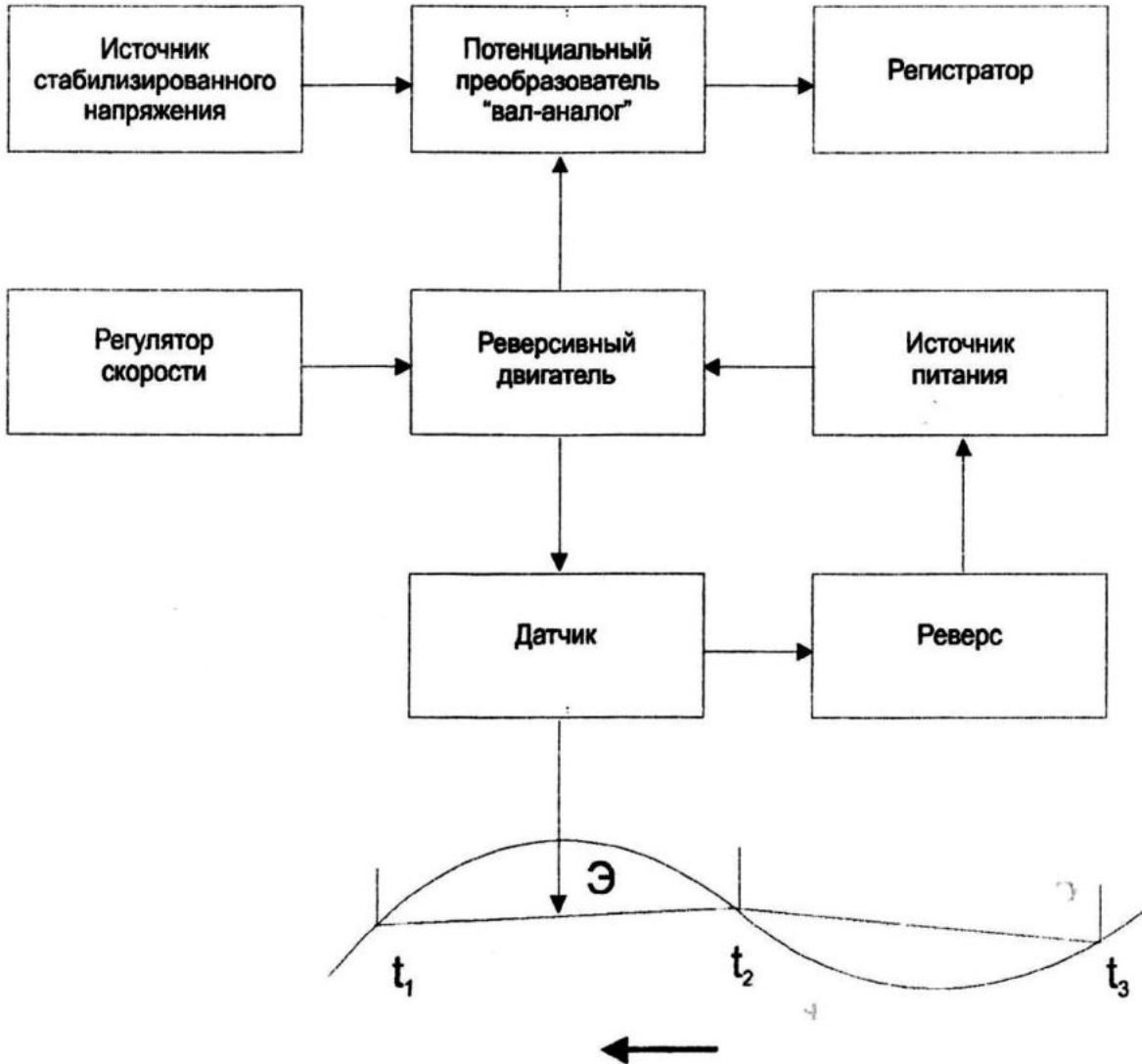


Рис. 1 Функциональная схема

полярности источника питания). Электрод датчика начинает опускаться вниз, пока вновь он не коснется гребня волны в момент времени t_3 . При этом необходимо, чтобы ско-

рость движения электрода датчика вверх (v_1) и вниз (v_2) были равны, т.е. $v_1 = v_2$.

Перемещение датчика через преобразователь "вал-аналог" фиксиру-

ется регистратором. Если возвышение среднего уровня (СУ) в период измерений остается неизменным, то выполняется следующее условие

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_1 = \sum_{i=1}^n \Delta t_2$$

где Δt_1 – время прохождения гребней волн через датчик,

Δt_2 – время прохождения впадин волн через датчик.

Вследствии этого сумма движений датчика вверх будет равна сумме движений его вниз.

$$\sum_{i=1}^n \Delta z_1 = \sum_{i=1}^n \Delta z_2$$

где Δz_1 - перемещение датчика вверх при прохождении гребня,

Δz_2 - перемещение датчика вниз при прохождении впадины.

Если средний уровень изменит свое положение, то эти суммы не будут равны между собой.

$$\sum_{i=1}^n \Delta z_1 - \sum_{i=1}^n \Delta z_2 = \pm \Delta h$$

где Δh - приращение среднего уровня.

Скорость перемещения (v) датчика с электродом Э устанавливается значительно меньше, чем вертикальная составляющая орбитальной скорости ветровых волн (u). В то же время она должна быть выше, чем скорость изменения среднего уровня (c), т.е. $u \gg v > c$.

Регулировка скорости перемещения датчика с электродом Э осуществляется через блок управления изменением напряжения питания электродвигателя или изменением частоты генератора при использовании шагового двигателя. В состав датчика может быть введен фильтр верхних

частот для уменьшения числа реверсирований двигателя при прохождении через датчик мелких волн. Эту же задачу он выполняет в случае измерения уровня при штиле.

Конструктивно регистратор низкочасотных колебаний уровня моря может быть оформлен в таком виде, как это показано на рис.2а,б. В первом случае на тросе 1 подвешивается груз для обеспечения вертикального перемещения электрода 3 датчика при морском волнении. Электрод 3 датчика закреплен на втором грузе 4 меньшей массы со сквозным отверстием, пропущенным через трос 1. При контакте электрода 3 с водной средой под действием реверсивного двигателя 5 с редуктором электрод 3 поднимается вверх, а при прохождении впадины волны опускается вниз, что фиксируется регистратором через потенциометрический преобразователь. Электрод 3 соединен с блоком реверсирования гибким проводом или через тонкий кабель-трос соединен с изолированным барабаном редуктора, а затем с блоком реверсирования. Во втором случае (рис.2б) вместо груза 4 устанавливается блок 2, только груз 4 с электродом 3 неподвижно зафиксирован с тросом перемещения груза.

На рис.3 представлены образцы записей уровня моря, которые были получены в районе океанографической платформы (ОП), в прибрежной зоне с приборной скалы и в успокоительном колодце с использованием поплавковой системы измерения (самописец уровня моря – СУМ). Синхронность в измерении уровня с периодом более 10 мин прослеживается на всех трех записях. По данным таких записей в течение нескольких часов получены спектральные характеристики колеба-

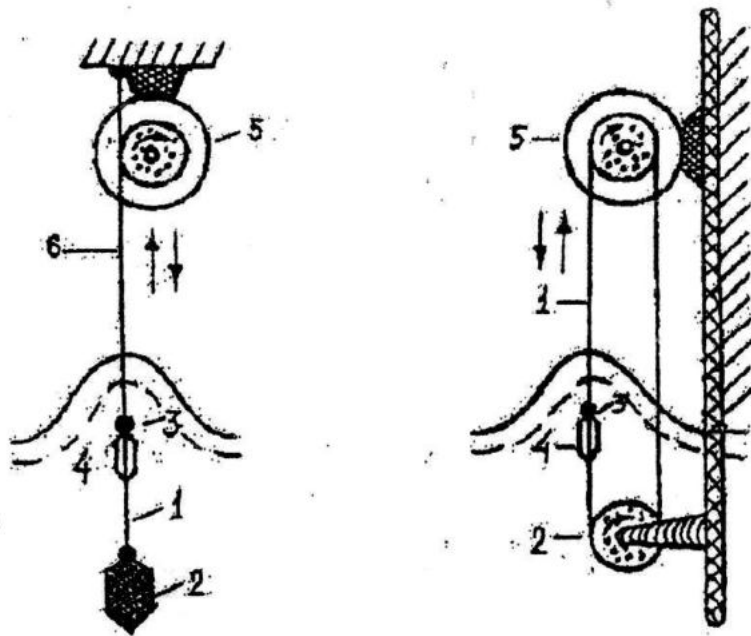


Рис.2. Схема двух вариантов системы слежения за уровнем моря

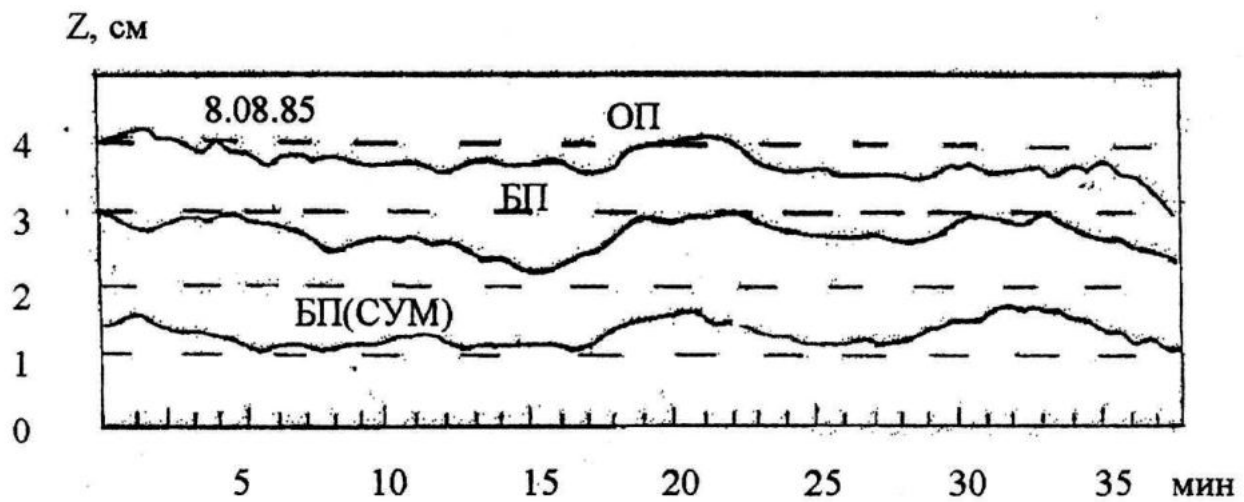


Рис. 3. Примеры записей уровня моря на океанографической платформе (ОП) и на береговом водомерном посту (БП)

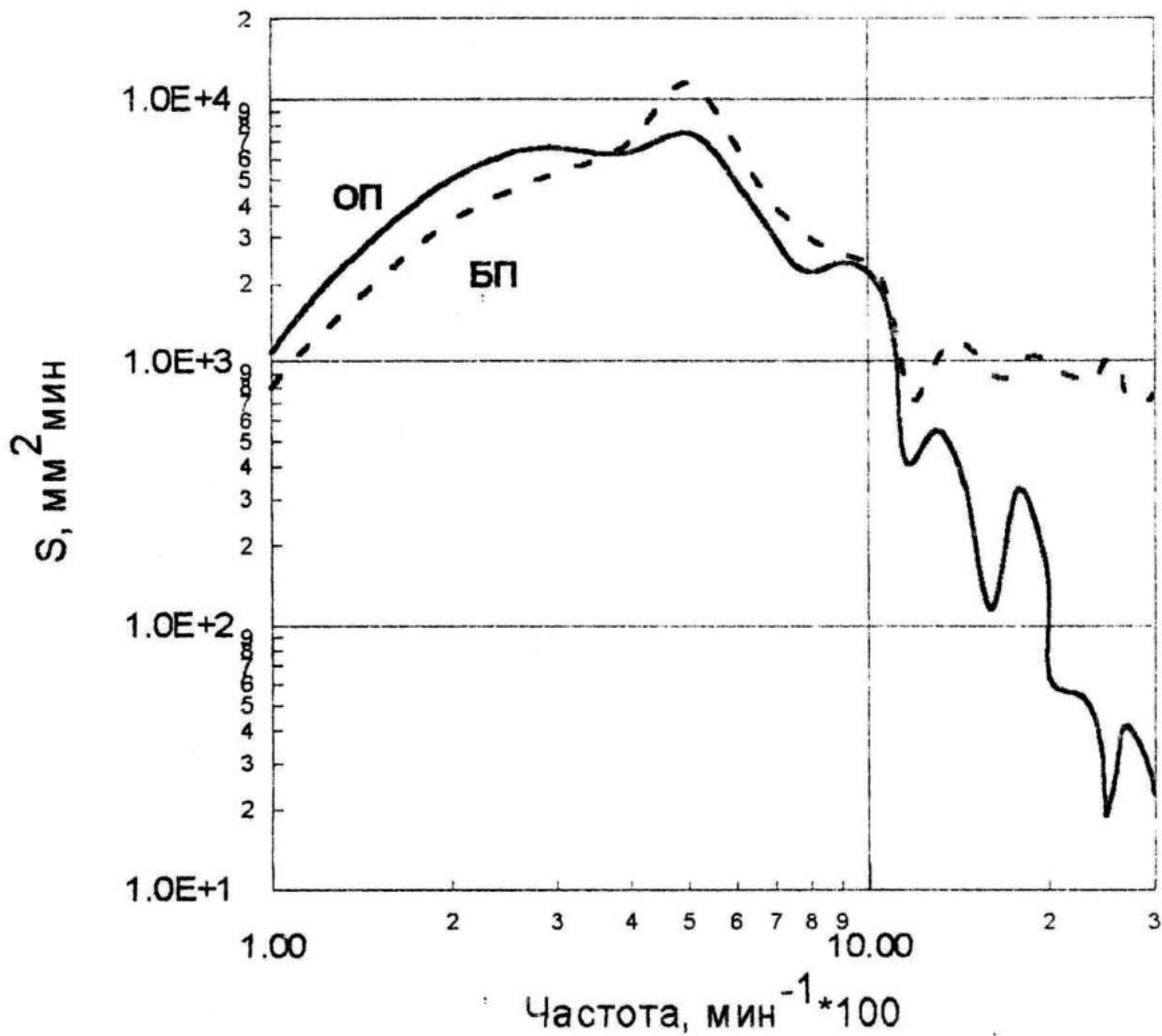


Рис. 4. Спектральные характеристики колебаний уровня моря в районе платформы (ОП) и на береговом пункте (БП)

ний уровня моря для района океанографической платформы и прибрежной зоны (рис.4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Снежинский В.А. Практическая океанография. Гидрометеоздат. Ленинград, 1954.
2. Гайский В.А., Куклин А.К. Дискретный уровнемер. Авт.свид. СССР N 1125474, 23 июля 1984.
3. Куклин А.К. О среднем уровне волновой поверхности. Сб.работ Иркутской ГМО, вып.1, Иркутск, 1966.
4. Корнева Л.А., Куклин А.К. О развитии методики определения среднего уровня при нерегулярной волне в море. Вопросы физики моря. Севастополь, 1972.

ИЗМЕРИТЕЛЬ УРОВНЯ МОРЯ

**В.А.Гайский, Н.А.Греков,
П.В.Гайский, В.И.Забурдаев,
В.Ж.Мишуров, М.Н.Пеньков,
А.Н.Клидзио, В.А.Трофименко**

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул.Капитанская, 2

E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Прибор предназначен для измерения уровня моря в колодце и может использоваться для измерения уровня воды в водоемах, реках и озерах при установке на сваях.

Принцип определения уровня основан на измерении разности атмосферного давления и гидростатического давления на фиксированном горизонте под водной поверхностью. Для учета изменения плотности воды в условиях Азово-Черноморского бассейна дополнительно измеряются температура и электропроводимость воды. В состав прибора входят измерительные каналы разностного гидростатического давления, температуры и электропроводимости воды, погружной и надповерхностный блоки модуля электроники. Внешняя ПЭВМ подключается к приемному блоку кабелем через стандартный интерфейс RS-232 (или USB).

Конструктивно прибор выполнен в виде погружаемого цилиндрического контейнера с датчиками на нижней крышке, соединенного жесткой трубкой и гибким шлангом с надповерхностным блоком (рис.1).

Блок-схема электронной аппаратуры прибора показана на рис.2. В погружном блоке на нижней крышке раз-

мещены датчики разностного давления, температуры (на корпусе), электропроводимости (контактный четырехэлектродный), вторичные измерительные преобразователи (ВИП) на базе инструментальных усилителей, коммутатор (К) напряжений (на 8 каналов), аналого-цифровой преобразователь напряжения (АЦП) типа ADS7808, микропроцессор типа AT89c52, дополнительная флэш-память (1 Мбит), блок питания (БП).

В приемном блоке расположены рiс-контроллер типа Pci16c84F, дисплей на четыре знакоместа, съемный накопитель с флэш-картой емкостью 1 Мбит, модуль интерфейса RS-232C, разъем для модуля интерфейса USB, панель управления рiс-контроллером с функциями :

- установка времени;
- ввод глубины;
- ввод констант (время цикла).

В типовом режиме автономной работы прибора измерения осуществляются циклами. Режим дежурного таймера реализуется рiс-контроллером, который ведет календарь и с заданной дискретностью (стандартно - 1 мин.) запускает микропроцессор. Микропроцессор через АЦП производит опрос измерительных каналов, формирует кадр первичных данных, заносит его во флэш-память и транслирует по интерфейсу RS-232C для записи в съемную флэш-карту и передачи во вне. На этом цикл измерений заканчивается.

Первичные данные накапливаются во внутренней флэш-памяти (обновляются последние 1 Мбит) и на съемной флэш-карте (номинальный объем 1 Мбит).

Пользователь имеет возможность в любое время изъять флэш-карту с массивом первичных данных или просмотреть последовательно по каналам на цифровом дисплее последний

(текущий) кадр первичных данных, содержащий : код времени (день, час, мин.), код давления (уровня), код температуры, код электропроводимости.

Приемный блок (с рс-контроллером, ФЛЭШ-картой, блоком питания)

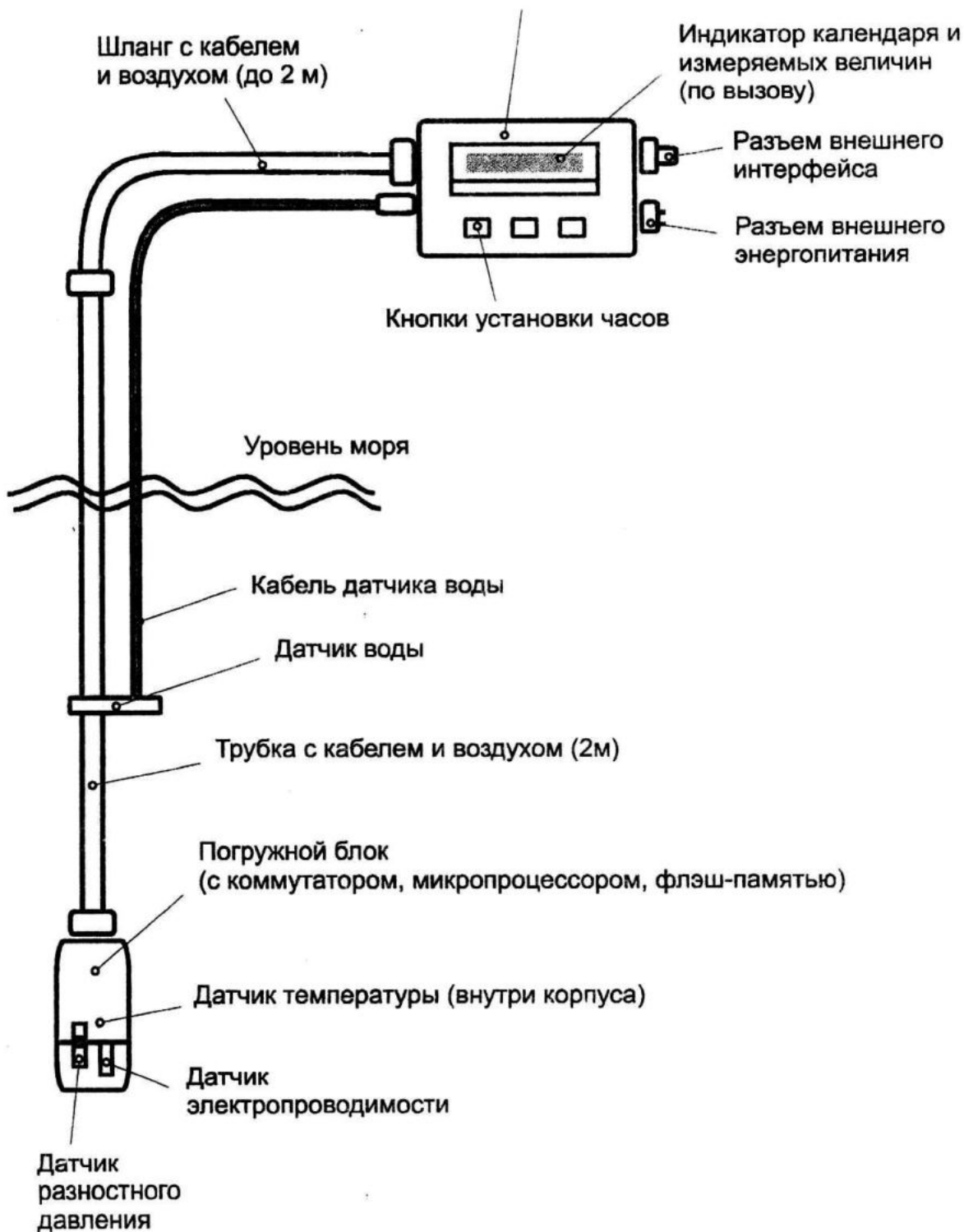


Рис.1 Конструктивная схема измерителя уровня моря

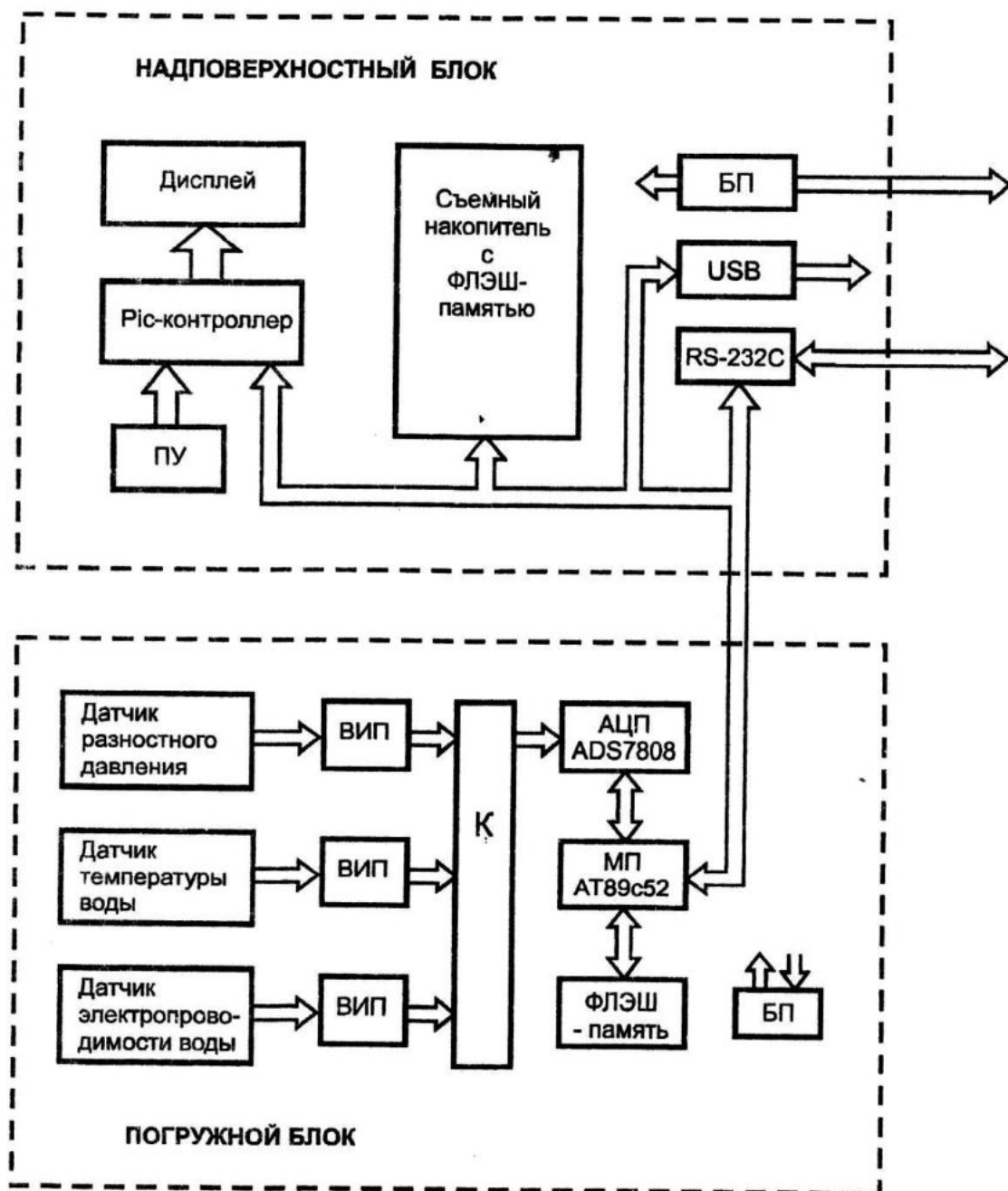


Рис.2 Блок-схема электронной аппаратуры измерителя уровня моря

При управлении от ПЭВМ режим работы и обмена данными задается программно или оператором по интерфейсу RS-232C или USB.

Для привязки собственного нуля измерителя уровня служит датчик воды, установленный примерно в середине диапазона измерения реального уровня моря. Датчик воды выдает сигнал при замыкании/размыкании водой контак-

ной пары. Этот сигнал инициирует внеочередной запуск цикла измерений для априори известного уровня моря.

Длительность автономной работы ограничивается энергоемкостью источника питания или объемом накопителя данных при заданной дискретности измерений.

Характеристики измерительных каналов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Измеряемый параметр	Диапазон	Разрешение	Погрешность
Гидростатическое разностное давление	0÷20 кПа	0,03%	0,15%
Температура	0÷35 °С	0,01	0,1
Электропроводимость	0,01÷0,9 отн.ед.	0,003	0,01

Программное обеспечение для ПЭВМ предусматривает коррекцию первичных данных, вычисление уровня, обработку данных по уровню, представление данных в стандартной форме.

Вычисление уровня (высоты столба жидкости) производится по формуле :

$$H = \frac{P}{\rho(p, \theta, \chi) \cdot g},$$

где p - давление, θ - температура, χ - электропроводимость, ρ - плотность, $g = 9.80665$.

Для иллюстрации на рис.3 показаны граничные значения H для заданных диапазонов температуры и электропроводимости при давлении 10 кПа.

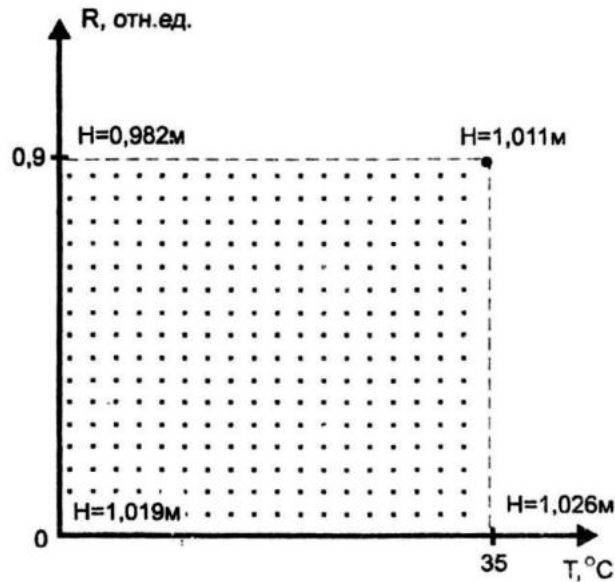


Рис.3 График граничных значений H для заданных диапазонов температуры и электропроводимости при давлении 10 кПа

Прибор обеспечивает определение уровня H воды в диапазоне 0÷2 м с погрешностью $0,002H$ с вероятностью

0,95 при изменении температуры воды в диапазоне 0÷30 °С и солёности 0÷25‰.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ С ДВИЖУЩЕГОСЯ СУДНА

Н.А.Греков, Н.В.Салтанов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Институт Гидромеханики

НАН Украины

г. Киев, ул. Желябова, 8/4

E-mail: saltanov@ukrpost.net

Разнообразные гидрофизические явления (от мелкомасштабной до межгодичной изменчивости), имеющие пространственные масштабы от десятков сантиметров до размеров океана, могут изучаться с помощью измерительных комплексов, работающих на ходу судна. К настоящему времени разработано много комплексов, позволяющих измерять профили элементов водной среды с судов, работающих как на пониженных, так и на крейсерских скоростях. Исследуем известные методы измерения и выделим диапазоны их эффективного использования, а также рассмотрим динамику системы зондирования с движущегося судна для первого метода.

Первый метод. Он заключается в том, что гидрозонд буксируют за судном в поверхностном слое океана и периодически заглубляют его на определенную глубину путем сматывания кабель-троса, троса или фала. Циклические изменения глубины погружения гидрозонда можно делать на полном ходу судна и на разрезе любой длины,

значит, отсутствует ограничение на исследование больших пространственных масштабов. Однако, как и в предыдущем способе, зонд необходимо поднимать вверх, чтобы начать новый цикл измерения. Поэтому остается ограничение на минимальный интервал между зондированиями. Гидрозонд имеет механическую связь с судном, это дает возможность сделать его сложным, точным, приспособленным для комплексных измерений. К этой группе измерителей относятся гидрофизический буксируемо-зондирующий комплекс МГИ 4204 (Минизонд) [1] и гидрозонд с твердотельной памятью [2].

Рассмотрим более подробно динамику зондирования с движущегося судна для этого метода и проанализируем ее. Исследуем процесс погружения системы "трос-гидрозонд" с движущегося судна.

При исследовании процесса погружения системы "трос-гидрозонд" с движущегося судна будем предполагать, что скорость разматывания троса с лебедки равна сумме абсолютных значений скоростей носителя и зонда, так что натяжение троса у лебедки близко к нулю и трос кинематически приближенно отслеживает траекторию зонда.

Использование того обстоятельства, что кинематически трос приближенно отслеживает траекторию зонда, сводит задачу к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений [3]. При этом, если масса троса сравнима или превосходит массу зонда, то такая система в динамическом отношении является системой переменной массы. При сделанных допущениях в пренеб-

режении силой инерции элементов системы для безмерного времени τ погружения зонда на текущую безразмерную глубину ξ в одномерном случае получается следующая задача

$$\frac{d\tau}{d\xi} = \frac{\sqrt{\gamma_k + \gamma_\kappa (\xi + \bar{U}_0 \tau)}}{\sqrt{1 + \gamma_\omega \cdot \xi}},$$

$$\xi = 0, \quad \tau = 0; \quad (0 \leq \xi \leq 1)$$

$$\tau = \frac{U_* t}{H}; \quad \xi = \frac{Z}{H}; \quad \bar{U}_0 = \frac{U_0}{U_*}; \quad \gamma_\omega = \frac{\omega H}{W_*};$$

$$\gamma_k = \frac{K_* \rho \Sigma_* U_*^2}{2W_*};$$

$$\gamma_\kappa = \frac{\pi K_f \rho d H U_*^2}{2W_*}, \quad (1)$$

где t - время, Z - текущее заглубление зонда, U_0 - скорость судна, U_* - характерное значение скорости, H - глубина погружения зонда, W_* и ω - вес в воде зонда и единицы длины троса, ρ - плотность воды, K_* и Σ_* - коэффициент сопротивления и миделева площадь зонда, K_f и d - коэффициент сопротивления трения и диаметр троса. Если величина $\tau(\xi)$ найдена, то соответствующая вытравленная длина S троса определится выражением

$$\sigma = \xi + \bar{U}_0 \cdot \tau, \quad \sigma = \frac{S}{H}. \quad (2)$$

Пусть τ_n есть значение времени τ в момент достижения зондом глубины $\xi = 1$ ($Z = H$). Тогда из (2) и (1)

для соответствующих этой глубине вытравленной длины σ_n и скорости \bar{U}_c^H сматывания троса получаем следующие выражения

$$\sigma_n = 1 + \bar{U}_0 \cdot \tau_n, \quad (3)$$

$$\bar{U}_c^H = \frac{d\sigma}{d\tau} = \bar{U}_0 + \sqrt{\frac{1 + \gamma_\omega}{\gamma_k + \gamma_\kappa (1 + \bar{U}_0 \tau_n)}}, \quad (4)$$

при $\tau = \tau_n$.

На основе выражений (1), (3) и (4) были выполнены расчеты величин τ_n , σ_n и \bar{U}_c^H для следующего набора размерных параметров системы:

$$H = 500; 1000; 1500 \text{ (м)};$$

$$d = 0,004; 0,005; \text{ (м)};$$

$$U_* = 1 \text{ (м/с)}; \quad U_0 = 5 \div 10 \text{ (м/с)};$$

$$K_f = 0,003;$$

$$\omega = \frac{\pi (\rho_T - \rho) d^2}{4} \cdot g; \quad \rho_T = \rho; \quad 2\rho;$$

$$\rho = 10^3 \text{ (кг/м}^3\text{)};$$

$$g = 9,8 \text{ (м/с}^2\text{)}; \quad K_* = 0,4; \quad \Sigma_* = \frac{\pi D_*^2}{4};$$

$$D_* = 0,12 \text{ (м)};$$

$$W_* = 200 \text{ (н)}, \quad (5)$$

где ρ_T - плотность материала троса, g - ускорение силы тяжести, D_* - диаметр миделева сечения зонда. Остальные обозначения имеют тот же смысл, что и в соотношениях (1). Набору размерных параметров (5) соответствуют следующие значения безразмерных параметров γ_k , γ_κ и γ_ω , входящих в соотношения (1) - (4):

$$\gamma_k = 0,0113; \quad \bar{U}_0 = 5 \div 10; \quad (6)$$

Результаты расчетов представлены на рисунках 1-3.

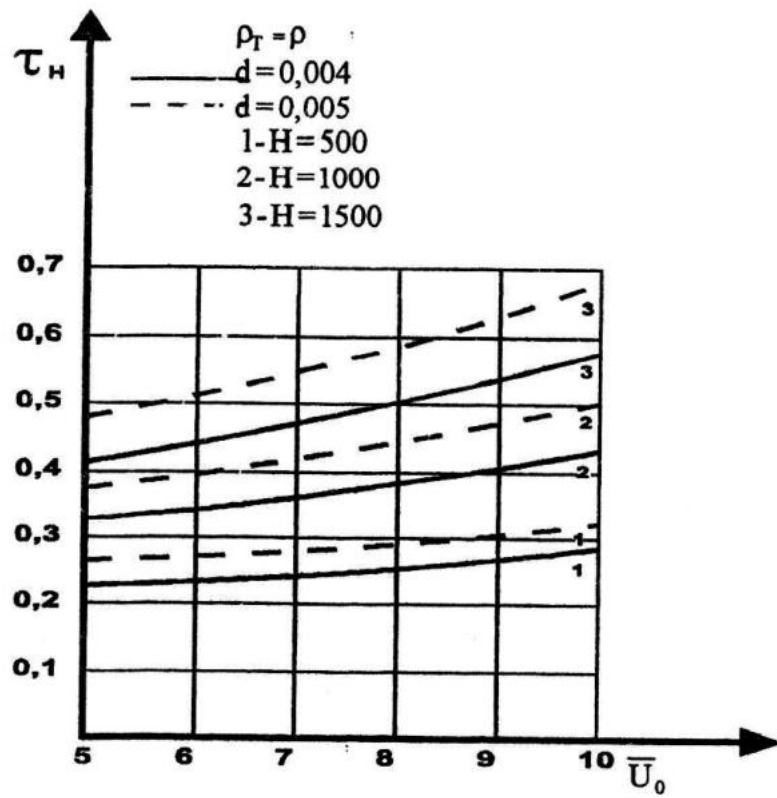


Рисунок 1

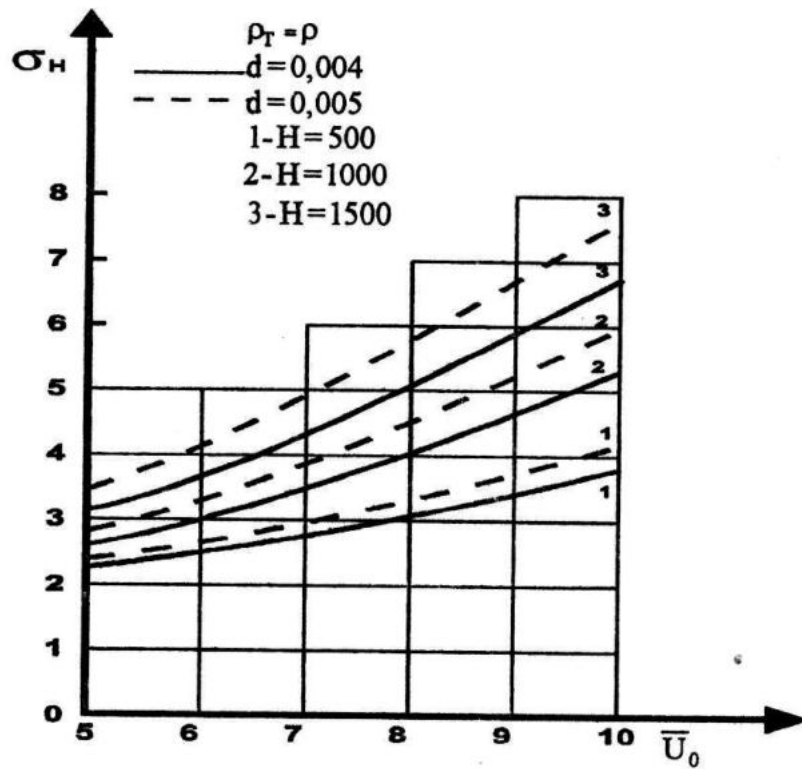


Рисунок 2

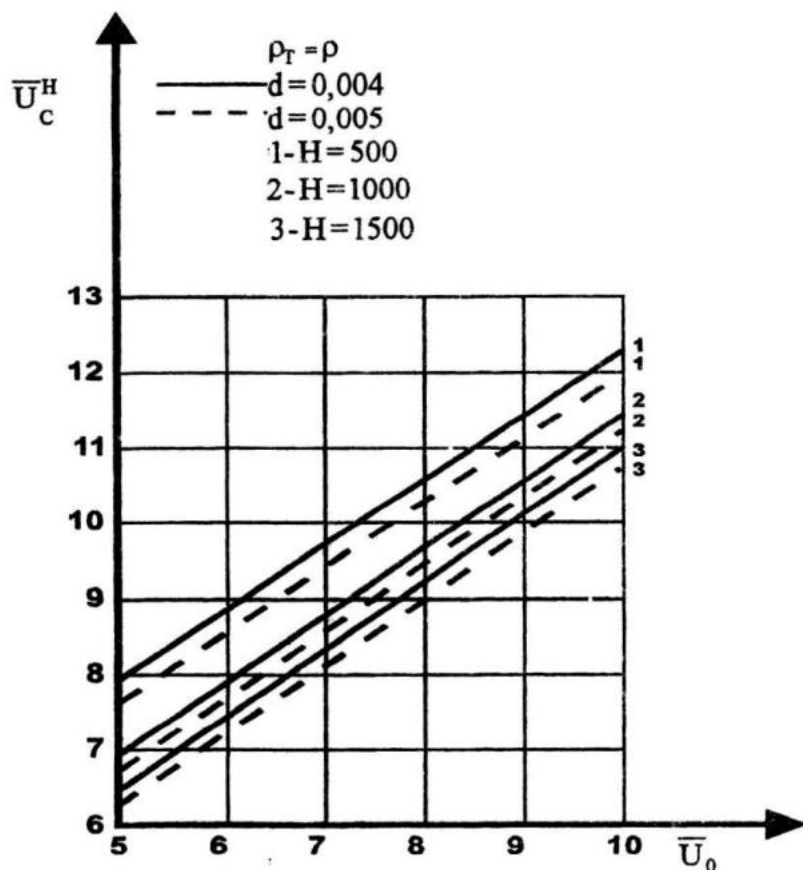


Рисунок 3

Можно видеть, что все три величины τ_H , σ_H и \bar{U}_C^H являются нарастающими функциями скорости \bar{U}_0 . При этом в рассматриваемом диапазоне изменения скорости зависимости величин τ_H и \bar{U}_C^H близки к линейным. В зависимостях же величины σ_H нелинейности проявляются заметнее. Большим глубинам H и диаметрам троса d соответствуют большие значения относительных времен τ_H и длин σ_H и, наоборот, меньшие значения скоростей \bar{U}_C^H . При $\gamma_\omega = 0$ эти особенности с очевидностью следуют непосредственно из выражений (1), (3) и (4), поскольку величина γ_k пропорциональна про-

изведению (dH). При $\rho_T = 2\rho$ с ростом глубины H кривые $\bar{U}_C^H(\bar{U}_0)$, соответствующие различным значениям диаметра d , сближаются более существенно, чем при $\rho_T = \rho$. При этом для $H = 1500$ м они практически сливаются. Как представляется, эта особенность обусловлена влиянием плавучести троса.

Оценим время приближения системы "трос-гидрозонд" к равновесному положению после стопорения лебедки.

В принятых выше предположениях после достижения зондом заданной глубины H вытравленная длина троса равна $L_H = H + U_0 t_H$, где, как отмечалось ранее, величина t_H есть время

достижения зондом глубины H . При этом одна часть троса длиной $U_0 t_H$ расположена близко к горизонту, а другая его часть длиной H расположена вертикально. После стопорения лебедки вертикально развитая часть троса начнет приближаться к его равновесному положению. Для оценки времени приближения вертикально развитой части троса к равновесному положению смоделируем ее жесткой системой "стержень-тело" с параметрами, соответствующими параметрам указанной части троса и зонда. Полагая, что в своей верхней части стержень закреплен шарнирно и выбирая в качестве обобщенной координаты угол β стержня с вертикалью, составим уравнение движения этой системы в форме уравнения Лагранжа второго рода [4]. В результате в пренебрежении инерционными слагаемыми будем иметь:

$$\begin{aligned}
 & - \left(1 + \frac{\gamma_n}{2} \right) \sin \beta + \frac{\gamma_n}{2} \left[\left(\bar{U}_0 \cos \beta - \frac{1}{2} \frac{d\beta}{d\tau} \right) + \right. \\
 & \left. + \mu_f^n \sqrt{\bar{U}_0^2 \sin^2 \beta + \left(\bar{U}_0 \cos \beta - \frac{1}{2} \frac{d\beta}{d\tau} \right)^2} \right] \times \\
 & \times \left(\bar{U}_0 \cos \beta - \frac{2}{3} \frac{d\beta}{d\tau} \right) + \\
 & + \gamma_k^n \left(\bar{U}_0 \cos \beta - \frac{d\beta}{d\tau} \right)^2 = 0, \\
 & \gamma_n = \frac{1}{\mu_f^n} \cdot \gamma_k; \quad \mu_f^n = \frac{\pi K_f}{K_n}; \\
 & \gamma_k^n = \frac{K_n^* \rho D \cdot l \cdot U_*^2}{2W_*}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Здесь K_n - коэффициент сопротивления троса, K_n^* - коэффициент сопро-

тивления зонда при боковом обтекании. l - длина зонда. Остальные обозначения имеют тот же смысл, что и в (1). Заметим, что при интегрировании по длине стержня, которое проводилось при получении уравнения Лагранжа второго рода, подкоренные выражения, содержащие текущую длину стержня, для упрощения выкладок были заменены их средними по длине стержня значениями. Пусть

$$K_n = 1,2; \quad K_n^* = 1,2; \quad l_* = 0,7(m). \quad (8)$$

Тогда для набора параметров (5) и (8) имеем

$$\mu_f^n = 0,0785; \quad \gamma_k^n = 0,252. \quad (9)$$

Пренебрегая множителями μ_f^n и γ_k^n , и опуская из-за громоздкости часть промежуточных выражений, окончательно определим момент времени, когда система "трос-гидрозонд" оказывается близкой к равновесному положению.

Как оказалось, например, для заданных выше параметров угол β отличается от равновесного на величину, составляющую 10 % его равновесного значения, в момент времени

$$\tau = \tau_* \cong \frac{1,5}{\bar{U}_0 \sqrt{1 - \delta_\beta^2}} \cong \frac{1,5}{\bar{U}_0}. \quad (10)$$

Угол β отличается от равновесного значения на величину, составляющую 1 % его равновесного значения, в момент времени

$$\tau = \tau_* \approx \frac{2,8}{\bar{U}_0 \sqrt{1 - \delta_\beta^2}} \approx \frac{2,8}{\bar{U}_c} \quad (11)$$

Как следует из (10) и (11), для того, чтобы система “стержень-тело” развернулась к равновесному положению от угла, составляющего 99 % его равновесного значения, необходимо почти столько же времени, сколько надо, чтобы указанная система развернулась от нулевого угла (т. е. от вертикали) до угла, составляющего 90 % его равновесного значения.

Конечно, представляют интерес задачи динамики выборки системы “трос-гидрозонд” на ходу судна с различными условиями, например: постоянном натяжении троса у лебедки; постоянной угловой скорости вращения барабана лебедки; постоянной намотки троса на барабан лебедки, разделы которых по возможности будут включаться в последующие сборники.

Второй метод. Измерения с помощью гидрозондов свободного падения разового действия выполняются на полном ходу судна, что снимает ограничения на изучения явлений больших пространственных масштабов. Электрическая связь между погружаемым устройством (ПУ) и бортовым устройством (БУ) осуществляется с помощью тонкого двужильного медного провода, изолированного от воздействия воды. После сбрасывания ПУ, которое по форме напоминает каплю, провод свободно сматывается с катушек пускового патрона, закрепленного на борту судна, и погружаемого устройства. При полном сматывании провода с одной из

катушек провод натягивается, рвется и ПУ тонет. Так как ПУ теряется безвозвратно, оно должно быть недорогим. При таком исполнении гидрозондов трудно получить высокую точность измерения распределенных параметров водной среды, так как в ПУ отсутствует датчик глубины, и глубина отсчитывается пропорционально времени погружения прибора. Из-за возможного запутывания и обрыва проводов эти измерители могут работать на судне последовательно, т.е. только после окончания работ одного ПУ запускается другой зонд. Это ограничивает возможность изучения малых пространственных масштабов. К числу этих измерителей относятся батитермографы разового действия Т-4, Т-6, Т-7 фирмы Sippican (США) и др. [5, 6, 7].

Третий метод. Измерения проводятся с помощью гидрозондов свободного падения и всплытия многократного действия на полном ходу судна. Гидрозонды этой группы имеют положительную плавучесть и заглубляются с помощью специального груза, который автоматически отсоединяется при достижении заданной глубины. Измеряемые элементы регистрируются на внутреннем регистраторе, размещенном в контейнере. Здесь нет ограничений на исследование малых пространственных масштабов, так как гидрозонды можно выбрасывать за борт через весьма короткие промежутки времени. Но в целом на выполнение разреза затрачивается много времени. Выпустив партию гидрозондов, судно возвращается в точки измерения, чтобы найти и выловить всплывшие на поверхность гидро-

зонды. В лучшем случае на проведение разреза затрачивается в три раза больше времени, чем прохождение его полным ходом. Так как зонды не имеют механической связи с судном, их легко потерять по разным причинам: не отделился своевременно балластный груз и гидрозонд не всплыл, не удалось найти всплывший гидрозонд в штормовом море и т.п. По опубликованным данным потери этих гидрозондов могут достигать до 50 % от числа выпущенных гидрозондов. Гидрозонды этого типа предназначены для комплексных измерений и стоят дорого. По изложенным выше причинам исследователи не рискуют делать данным методом разрезы большой протяженности, а это ограничивает возможности способа в изучении больших пространственных неоднородностей. Примером таких измерителей является система 7065 фирмы Bissett - Bergman [8].

Четвертый метод. Гидрозонд с подвижным крылом совершает челночные перемещения вверх-вниз по тросу между упорами-ограничителями, где и происходит механическое переключение угла наклона крыла. Работает прибор при пониженных скоростях судна, что ограничивает возможность исследования больших пространственных масштабов. Ограничены возможности этого метода также снизу со стороны малых масштабов, так как зонд должен вернуться наверх, чтобы начать новый цикл измерения. Траектория движения гидрозонда в слое воды имеет пилообразный вид. Для получения профиля океанических элементов необходимо усреднить данные измерений, получен-

ные при погружении и всплытии гидрозонда. Гидрозонды этого типа могут быть укомплектованы несколькими датчиками и выполнять комплексные измерения. Описанный метод отражен в патентах [9, 10].

Пятый метод. Он реализуется в комплексах с автоматически управляемыми по глубине ПУ. Эти комплексы сложнее ранее рассмотренных, так как содержат в ПУ кроме измерителей элементов водной среды еще и исполнительные механизмы системы управления рулями глубины. ПУ таких комплексов могут работать в нескольких режимах: буксироваться на заданной глубине, периодически погружаться и всплывать по заданной траектории, следовать по заданной изотерме. Для получения профилей океанографических элементов используется второй режим. В этом случае данные измерений, полученные при погружении и всплытии ПУ на одних и тех же горизонтах, усредняются. Метод имеет ограничение на исследование малых пространственных неоднородностей. Обладая инерционностью, система, состоящая из ПУ и кабель-троса, может совершать колебания в исследуемом слое с ограниченной частотой. Из-за больших динамических нагрузок работа автоматически управляемых систем происходит на пониженных скоростях судна, что ограничивает исследование больших пространственных неоднородностей. Увеличить скорость буксировки возможно, но при этом необходим спецкабель с обтекателями и, соответственно, спецлебедка больших размеров, что требует использования только

специализированных судов. В этой группе измерителей наиболее известны комплексы "Нырок", "Галс" и Batfish [11, 12, 13, 14].

Шестой метод. Метод заключается в следующем: на определенных горизонтах буксируют однотипные точечные измерители, затем по результатам измерений восстанавливают вертикальное распределение элементов. На этом принципе построены гирлянды зондов. На буксируемой кабеле или кабель-тросе через определенные отрезки длины укреплены датчики или многоканальные измерители. Связь с бортовым устройством осуществляется гальванически по многожильному кабелю или используется индуктивная связь с одножильным кабель-тросом. К недостаткам этого метода измерения следует отнести: большую дискретность измерения элементов по вертикали и сложность исполнения таких систем. Первый недостаток ограничивает возможности метода на изучение гидрофизических явлений малых пространственных масштабов. Так, например, инверсии температуры, имеющие значительную горизонтальную протяженность, могут остаться незамеченными исследователем. Метод очень сложен в постановке. Скорость буксировки гирлянды зондов не превышает $6 \div 8$ узлов. К числу таких измерителей относятся термисторные цепи [15].

Седьмой метод. Метод базируется на измерении средних характеристик слоя морской воды и их мгновенных значений на верхней и нижней границе слоя. Средние значения определяются с помощью распределенных первичных

преобразователей, мгновенные значения измеряются точечными датчиками. Профили элементов морской воды восстанавливаются по всей совокупности измерений с использованием наиболее подходящих теоретических моделей вертикальных распределений. Измерительные комплексы, основанные на этом принципе, привлекают простотой и надежностью в работе. С их помощью можно исследовать большие пространственные неоднородности элементов. Как и в предыдущем методе измерения с помощью точечных и распределенных датчиков могут быть выполнены как угодно часто. Но по этим измерениям нельзя получить тонкую вертикальную структуру поля. Следовательно, у этого метода имеются ограничения на исследование малых пространственных неоднородностей. Ограничены возможности этого метода для комплексных измерений. Если точечными датчиками измеряют большинство элементов водной среды, то распределенными преобразователями всего два параметра (среднюю температуру и средневзвешенную скорость звука в слое воды). К числу таких измерителей относится термохалинный буксируемый измерительный комплекс МГИ 4206 с распределенными датчиками температуры [16] и обратные эхолоты.

Восьмой метод. Метод измерения осуществляется следующим образом [17]. С движущегося судна спускают кабель-трос (трос) отрицательной плавучести, имеющий ограничитель на конце. По нему последовательно опускают гидрозонды, которые конструктивно выполнены в виде крыла. Число

гидрозондов в партии и периодичность их запуска определяются предварительно в зависимости от требуемой дискретности измерений. Горизонтальная составляющая скорости их перемещения по кабель - тросу соизмерима со скоростью движения судна. Следовательно, гидрозонд при движении в воде остается в одной географической точке и погружается вертикально. Данные измерений с движущихся гидрозондов передаются на борт судна по индуктивному или акустическому каналу связи и регистрируются в аналоговом или цифровом виде. Когда вся партия гидрозондов достигает конца кабель - троса, ее поднимают совместно с кабель - тросом на борт судна. Затем всю последовательность операций повторяют. Описанный метод позволяет проводить измерения профилей элементов водной

среды на разрезах в широком диапазоне расстояний между ними. Минимальное расстояние между соседними профилями лимитируется только пространственными размерами гидрозондов. Не существует ограничений у этого метода на исследование больших пространственных неоднородностей. Измерительные комплексы, построенные по этому принципу, работают на полном ходу судна. Однако при скорости судна < 6 узлов величина заглубления не превышает 150 метров.

Результаты проведенного анализа методов измерения вертикальных распределений параметров водной среды на ходу судна сведены в табл. 1. Здесь цифрами обозначены методы измерения в том порядке, как они перечислены: "1" - наличие признака, "0" - его отсутствие.

Таблица 1

№ п/п	Характеристика метода	Методы измерения вертикальных распределений параметров водной среды на ходу судна							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Отсутствие ограничений на исследование больших пространственных неоднородностей	1	1	0	0	0	0	1	1
2	Отсутствие ограничений на исследование малых пространственных неоднородностей	0	0	1	0	0	0	0	1
3	Работа на полном ходу судна (16 узлов до глубины 1000 м)	1	1	1	0	0	0	0	0
4	Вертикальное погружение	1	1	1	0	0	-	-	1
5	Сохранность погружаемого устройства (гидрозонда)	1	0	1	1	1	1	1	1
6	Комплексность измерений	1	0	1	1	1	1	0	1
7	Попутные измерения	1	1	0	1	1	1	1	1

Проведенный анализ контактных методов измерения вертикальных распределений элементов водной среды на ходу судна, несомненно, будет полезен для разработчиков аппаратуры систем контроля окружающей среды, а также для специалистов по планированию экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батаев А.В., Колтаков В.Н., Нечесин Е.Г., Шаповалов Ю.И. Результаты эксплуатации буксируемого зондирующего комплекса МГИ 4204 в 34-м рейсе НИС "Академик Вернадский". - Деп. ВИНТИ № 1169-В86 Деп. - 10 с.

2. Nagasaka K. et al. On a free fall and retrieval method for a small CTD. - *The Oceanogr. Mag.*, 1985, vol. 35, № 1-2, P. 31-34.

3. Saltanov N.V. Contour Dynamic Model of Line in Fluids // В кн.: "Морское и экологическое приборостроение". Сборник трудов международного научно-технического семинара, Севастополь, МГИ НАН Украины, 1995, с. 49-50.

4. Салтанов Н.В. Гибкие нити в потоках. Киев, Наукова думка, 1974, -140 с.

5. Saure C. Verhalten der Friefallprofilsond FRS. - *Ber. Inst. Meeresk. Christian-Alberchts - Univ. Kiel*, 1984, № 135, P. 1-68.

6. Sippican corporation. XBT System. - *Undersea technology*, 1967, vol. 8, № 3, p. 27.

7. Sippican corporation. Experimental bathythermograph prob. - *Oceanol. Internat.*, 1968, vol. 4, № 6, p. 55.

8. Bissett - Berman Corporation. *Measuring the ocean catalogue. New product development.* - 1965, February.

9. Патент США № 3404565, кл. 73-170, 1968.

10. Патент Японии № 55-43960, кл. В63С-8/42 НКИ 2123-3Д, 1980.

11. Буксируемый комплекс "Галс-2". - В кн.: Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. Киев, 1981, С. 241-243.

12. Маклаков А.Ф., Снежинский В.А., Чернов Б.С. Океанографические приборы. - Л.: Гидрометеиздат, 1975, - 384 с.

13. "Batfish" series 8500 programmable towed body. - Проспект фирмы Guildline instruments, Ltd, Ontario, Canada.

14. Dessurealt J.G. "Batfish". A depth controllable towed body for collecting oceanographic data. - *Ocean engineering*, 1971, № 3, P. 99-111.

15. Лямин Э.А., Науменко М.Ф., Пака В.Т. и др. Опыт применения буксируемой гирлянды термисторов для исследования термической структуры моря. - *Океанология*, 1965, № 3, т. 5, С. 553-557.

16. Греков Н.А. Буксируемые комплексы с распределенными датчиками температуры для исследования деятельного слоя океана: Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1985, - 161 с.

17. А.С. 1191735 (СССР). Способ измерения вертикальных распределений элементов морской воды на океанологических разрезах / Н.А.Греков, А.Ф.Иванов. - Оpubл. в Б.И., 1985, № 42, С. 158.

**КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
СРЕДСТВ ОСВОЕНИЯ ШЕЛЬФА**

Сергатова Ю.Н.

**Севастопольский государственный
технический университет
г. Севастополь, бухта Стрелецкая,
Студгородок
E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua**

После энергетического кризиса 1992 г. на Украине с особой актуальностью стал вопрос о разработке собственных нефтяных месторождений, которые находятся в основном на прибрежном шельфе. В настоящее время наибольшее распространение в области освоения шельфа получили ПБУ с колоннами решетчатой (ферменной) конструкции. Такие ПБУ позволяют осуществлять разведочное и промышленное бурение шельфа на глубинах от 15 до 200 метров.

Наиболее нагруженные сечения находятся в верхней и нижней части колонны.

Средняя по высоте часть колонны менее нагружена и может быть облегчена, исходя из экономических соображений. Необходимые для этого проверочные расчеты должны быть сделаны не только для максимальных расчетных нагрузок, приложенных в соответствующих сечениях, но и для случаев, когда ПБУ устанавливается на точку бурения при глубинах моря, меньших, чем расчетные. При этом наиболее нагруженное сечение сместится.

Многообразие конструкций колонн и узлов их закрепления не позволяет дать общую методику расчета их напряженного состояния. В связи с этим большое значение приобретают испытания напряженного состояния элементов конструкции ПБУ в натуральных условиях.

В большинстве случаев первичным элементом контрольно-измерительной системы при исследованиях напряженного состояния конструкций ПБУ являются тензодатчики, наклеенные на исследуемые поверхности и деформирующиеся вместе с ними. Соединение и единичных тензодатчиков, и составленных из них блоков с контрольно-измерительной аппаратурой осуществляется с помощью измерительных трасс.

Все существующие в настоящее время контрольно-измерительные системы различаются типом и функциональными возможностями преобразующей регистрирующей аппаратуры.

Характерной особенностью исследуемых ферменных конструкций является многоточечность измерений (до 100 и более точек) и малые уровни сигналов, снимаемых с тензорезисторных датчиков. Традиционные средства регистрации, применяемые в практике прочностных испытаний судов, которые основаны на прямом осциллографировании измеряемых процессов, стали тормозом на пути к улучшению методов испытаний, применению вычислительных средств, повышению качества и надежности испытаний.

До последнего времени испытания прочности обеспечивались тензометрической аппаратурой типа 8АНЧ-7М, «Топаз-3», ЛК-7006-2. Морально и физически устаревшая восьмиканальная тензостанция 8АНЧ-7М потребляет мощность бортовой сети 270 ВхА, весит 70 кг и имеет выход только на светолучевой осциллограф. Шестнадцатиканальная тензостанция ЛК-7006-2 при наличии таких достоинств, как автоматическая балансировка и калибровка, низкая погрешность (0,7%), наличие выхода по току и напряжению, широкая полоса регистрируемых частот (0-500 Гц), имеет ряд существенных недостатков:

- большие весогабаритные характеристики – 150 кг, 850x650x490;
- большое время готовности станции с момента включения – 90 мин.;
- техническое исполнение станции рассчитано для работы в лабораторных условиях при температуре окружающей среды 25°C +10°C и относительной влажности 80%, поэтому станция имеет низкую надежность работы в судовых условиях.

Десятиканальная станция «Топаз-3» при малых весогабаритных характеристиках (9 кг, 140x550x210) имеет ряд серьезных недостатков:

- питание тензорезисторных датчиков осуществляется постоянным током;
- большой температурный дрейф выходного сигнала;
- низкая помехозащищенность каналов от электрических и радиотехнических помех;
- низкая эксплуатационная надежность каналов.

Тензометрические станции не имеют в своем составе регистрирующих устройств, а вид выходной информации не удовлетворяет требованиям совместимости с ПК.

Развитие методов исследования, вычислительных средств обработки потоков информации, совершенствование техники измерения и регистрации выдвинуло ряд требований, предъявляемых к измерительным комплексам в обеспечение натурных испытаний прочности конструкций ПБУ:

- многоканальность измерительной аппаратуры (более 100 каналов);
- магнитная запись результатов измерений;
- информационная совместимость с ПК;
- цифровое преобразование входной информации;

- высокая точность и помехозащищенность измерительных каналов;
- обеспечение частотного диапазона регистрации измеряемых параметров (0-30 Гц);
- обеспечение регистрации различного вида измерительных сигналов;
- модульный принцип построения комплекса с дистанционным управлением;
- исполнение блоков для работы в условиях широкого перепада температур, повышенной влажности, значительных виброперегрузок;
- малые весогабаритные характеристики.

Анализ имеющихся разработок ИРК МАП показал, что из всех имеющихся видов комплексов особого внимания заслуживает «ГАММА-1101».

Информационно - регистрирующий комплекс «ГАММА-1101» вариант комплектации №11, в основе которого заложен принцип цифровой модуляции входной информации, временного разделения каналов с записью на магнитную ленту, наиболее полно обеспечивает вышеперечисленные требования.

Комплекс был разработан для стендовых и летных испытаний авиационной техники. Структурная гибкость комплекса позволяет строить различные как по функциональному назначению, так и по объему регистрируемой информации варианты компоновки.

Комплекс «ГАММА-1101», предназначенный для натурных испытаний прочности ПБУ, имеет модульную структуру с программируемым распределением частоты опроса и адресным опросом многоканальных преобразователей информации (МПИ), объединенных общей (магистральной) линией связи.

Главным элементом схемы является блок управления и синхронизации.

Он вырабатывает сигналы включения всех блоков комплекса и управления магнитными накопителями.

Средства сбора данных, входящих в состав комплекса, представляют собой многоканальные преобразователи информации и предназначены для приема, коммутации и преобразования в цифровой импульсный параллельный двоичный код аналоговых, аналого-дискретных и дискретных электрических сигналов, поступающих от датчиков или согласующих и нормализующих устройств.

В данном случае подлежащие регистрации сигналы тензорезисторных датчиков, соединенных по мостовым или полумостовым схемам, не могут быть непосредственно поданы на блоки обработки и анализа, а требуют предварительной нормализации. Нормализация, т.е. приведение уровня сигнала к диапазону -3 - $+15$ мВ, -3 - $+30$ мВ, осуществляется специально разработанными и изготовленными устройствами согласования.

Устройство согласования вырабатывает набор стабилизированных напряжений постоянного тока для запитки мостовых и полумостовых тензорезисторных схем организует подключение измерительных схем к входным устройствам и установку баланса.

Т.к. во время натурных испытаний прочности конструкций ПБУ частота измеряемого процесса может превышать 2 Гц, предусмотрена возможность расширения частотного диапазона устройства согласования путем запараллеливания каналов.

При этом осуществляется регистрация 16-ти каналов с частотой 0-4 Гц или 8-и каналов с частотой 0-8 Гц.

С целью увеличения измерительных каналов в состав ИРК «ГАММА-1101» вводятся дополнительно еще 4 блока сбора информации с подключением к каждому по 8 измерительных каналов, регистрирующих процесс с частотами от 0 до 10 Гц.

Таким образом, измерительно-регистрирующий комплекс ИРК «ГАММА-1101» позволяет получать

информацию о регистрируемом процессе по 48 измерительным каналам.

Для обеспечения аппаратуры комплекса напряжением питания постоянного тока от 18 до 35 В от бортовых систем электроснабжения постоянного и переменного тока используется устройство УсС-34, имеющее два выхода с напряжением постоянного тока от 18 до 33 В (ток нагрузки каждого 4 А). Блок был доработан с целью подключения к бортовой сети переменного тока 220 В/127 В частотой 50 Гц.

Тип используемых накопителей МЛП-14-3 и структура регистрируемых данных позволяют использовать наземные комплексы воспроизведения и системы автоматизированной обработки.

В качестве наземного комплекса воспроизведения, обработки и анализа полученной информации используются ШМР8.

ШМ Р8 относится к классу малых компьютеров и является одной из самых удачных конструкций Микро-ЭВМ. Это универсальная машина, способная выполнять функции управляющей системы и непосредственно вычислителя. ЭВМ имеет модульный принцип построения, т.е. все функциональные блоки ее выполнены в виде конструктивно законченных устройств (модулей), связь между которыми осуществляется через единый канал обмена информацией (межплатный интерфейс).

Связь между устройствами в ЭВМ типа «Управляющий - управляемый», т.е. в любой момент времени только одно устройство является активным, что гарантирует надежность работы системы.

При проведении натурных испытаний быстродействие ШМ Р5 достаточно для работы в реальном масштабе времени.

Шина адреса данных в машине 16-ти (32-х) разрядная, что позволяет иметь оперативную память 32 Мбайт и обмениваться с внешними устройствами данными с небайтовой структурой, также как в ИРК «ГАММА».

Современные программные средства позволяют увеличить точность проводимых вычислений, быстродействие обработки результатов измерений, а также облегчают работу пользователя при составлении различных программ.

Обработка и анализ полученных результатов натурных испытаний производится наземным вычислительным комплексом.

Пример результатов испытаний приведен на рисунке.

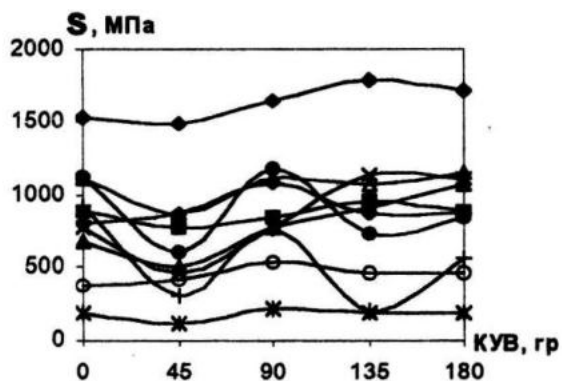


Рис. Зависимость напряжений, замеренных в элементах НКУ СПК (высота волны 1,6м).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Технический отчет по теме: «Анализ методов проведения натурных экспериментальных работ и испытаний, разработка эскизного агрегатного набора средств для создания систем автоматизированного измерения, сбора и обработки данных натурных экспериментальных работ». ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1991.

2. Н.И. Баклашов. Натурный эксперимент. Радио и связь, 1987.

3. Методика статистической обработки данных мореходных испытаний надводных кораблей и судов. Выпуск 13319, п/я В-8662.

4. Я.М. Кубланов, В.И. Левченко. К вопросу об измерении перегрузок при мореходных испытаниях судов, «Вопросы судостроения» серия «Проектирование судов», №27, 1989.

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ СТЕНДА ДЛЯ АТТЕСТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ ПОТОКА И РАСХОДА

Н.А.Греков

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Автоматизированный поверочный стенд для измерения скорости воздушного потока в диапазоне скоростей менее 5 м/с и объемных расходов в диапазоне расходов менее 10 м³/час, рассмотрен в [1]. Однако, нижняя граница измерения потоков в этой работе не уточняется. Связано это с тем, что создание и измерение слабых воздушных потоков - задача весьма сложная. Однако имеется потребность в освоении нижних границ диапазонов.

Например, для значительного класса приборов, измеряющих объемный расход, Государственным стандартом Украины выпущен ДСТУ3336-96, в котором порог чувствительности приборов не должен превышать 0,005 м³/час.

Поверку порога чувствительности таких приборов можно осуществить ротаметрами с постоянным перепадом давления [2]. При своих достоинствах: значительный диапазон измерения, линейность, постоянство потери давления в диапазоне измерений, эти приборы имеют и недостатки, а именно: большие габаритные размеры шкалы (не менее 500 мм), хрупкость, трудность автоматизации

измерения. Погрешность измерения ротаметров в диапазоне температур от +5 °С до +50 °С составляет ± 2,5 %. Нижний предел измерения расхода для ротаметров с полистироловым поплавком (РМ-0.04 ГУЗ) составляет 0,004 м³/час.

Рассмотрим вопрос создания и измерения слабых воздушных потоков (скорости потока, объемного и массового расходов). При использовании поверочного стенда [1], состоящего из аэродинамической трубы открытого типа с конфузуром на входе, труба должна иметь площадь на порядок больше площади конфузора, что приводит к срыву слабых потоков. Ламинарный режим возможен лишь в трубах малого сечения. Если на входе не устанавливать конфузур и воздух всасывать напрямую через торец трубы, то поток отрывается от стенок трубы, и струя воздуха, поступающего в трубу, сжимается.

В работе [3] показано, что с учетом изменения количества движения и уравнения Бернулли площадь сечения струи в два раза меньше площади сечения трубы. При измерении скорости турбулентного движения в трубе, скорость потока на расстоянии 0,223 от стенки трубы равна средней скорости потока [4], а распределение скорости в трубе определяется коэффициентом трения и положением слоя.

Поэтому для слабых потоков можно говорить только о средней скорости потока, проходящего через определенное сечение, и оценивать эту скорость через объемный и массовый расход.

Предлагается устройство, которое может генерировать слабые потоки.

Используем поверочный стенд [1], состоящий из четырех измерительных каналов (разностного давления, температуры (T_1 - входа, T_2 - выхода) и объемного расходомера) и в узел

подключения выхода аэродинамической трубы подсоединим устройство, показанное на рис. 1.

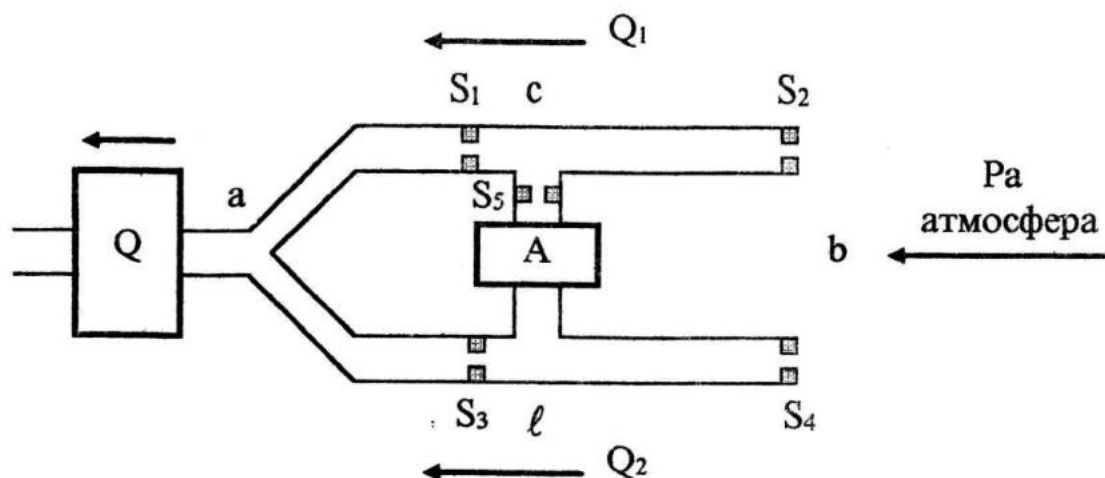


Рис. 1. Дополнительное устройство создания и измерения расхода

Это устройство имеет пять сужающих устройств круглого сечения с различными величинами сечений S_n , которые создают перепад давления ΔP_n при течении газа. Узел "А" служит для подключения испытываемого прибора. Объемный расход потока контролируется и создается устройством Q.

Уравнение для определения величины объемного расхода сухого газа, приведенного к нормальным условиям, имеет вид [5]

$$Q_{\text{НОМ}} = 0.2109 S \cdot N \sqrt{\frac{P \cdot \Delta P}{(P_{\text{НОМ}} \cdot T \cdot K)}}, \quad (1)$$

где P - абсолютное давление среды перед сужающим устройством в условиях измерения;

ΔP - перепад давления среды при течении через сужающее устройство;

T - температура измеряемой среды перед сужающим устройством;

K - коэффициент сжимаемости газа;

$P_{\text{НОМ}}$ - плотность сухого газа в нормальном состоянии;

N - поправочный множитель, учитывающий параметры сужающих устройств;

S - площадь сечения отверстия сужающего устройства.

Если устройство (рис. 1) выполнено из одного материала, то для слабых потоков нет необходимости в измерении T перед каждым сужающим устройством, а ΔP распределяется пропорционально сечениям S_n . Участки трубопроводов устройства выполнены одного диаметра

с одинаковой шероховатостью, следовательно, величина $\frac{1}{S_n} = Z_n$ выражает местное сопротивление.

Общественное сопротивление Z_0 участка a-b

$$Z_0 = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 + Z_4} \quad (2)$$

Величину объемных расходов, проходящих через сечения S_1 и S_2 , обозначим как Q_1 , а через сечения S_3 и S_4 как Q_2 .

Разомкнем узел "А", и с учетом уравнения неразрывности, запишем

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

После преобразования окончательное выражение для определения величины объемного расхода, проходящего через сечение S_5 с учетом выражения 2 и 3 будет:

$$Q_5 = Q \frac{Z_0 \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right)}{Z_0 + Z_5 + Z_A} \quad (4)$$

где Z_A - величина, пропорциональная потере давления в узле "А".

Используя выражение (4) можно рассчитать размеры диаметров сужающих устройств с местными сопротивлениями $Z_1 \dots Z_5$, и изменяя величину объемного расхода Q , получить в узле "А" необходимое значение величины объемного расхода.

Однако, подключенные в узел "А" устройства могут быть нелинейными.

Например, ротационные и ряд других измерителей объемного расхода имеют порог трогания, т.е. через измеритель в узле "А" на начальном этапе не проходит поток, фактически Z_A стремится к бесконечности. Зная среднюю величину Z_A для различных измерителей объемного расхода, необходимо выбрать $Z_5 \gg Z_A$.

Использование предложенного дополнительного устройства и полученных уравнений позволяет значительно расширить функциональные возможности автоматизированного поверочного стенда и грамотно его эксплуатировать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Греков Н.А. Автоматизированный поверочный стенд для измерения скорости воздушного потока. В сб. "СКОС" Севастополь: МГИ НАНУ, 1998. - С. 17-19.
2. Болдин А.А., Бошняк Л.Л., Соловский Б.М. Ротаметры. Л., Машиностроение, 1983. - 198 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1978. - 847 с.
4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. -М.: Физматгиз. 1960. - 715 с.
5. Цейтлин В.Г. Техника измерения расхода и количества жидкостей, газов и паров. М. Издательство стандартов, 1981. - 191 с.

ПРОЦЕССОРНЫЕ МОДУЛИ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

М.Н.Пеньков

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул.Капитанская, 2

E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

При автоматизации систем контроля окружающей среды и других прикладных измерительных систем часто возникает необходимость в сборе данных от датчиков, разнесенных в пространстве. В качестве центрального процессора целесообразнее всего применять стандартный PC в силу его распространенности. Мы опускаем вариант с АЦП, установленном внутри компьютера, из-за ограниченного числа слотов в компьютере и низкой помехоустойчивости системы, т.к. шумы на множестве проводов, которые придется тянуть на большие расстояния будут вносить дополнительную погрешность в измерения.

Удобнее всего применять несложные контроллеры, которые устанавливаются непосредственно возле датчиков, а потом передавать данные по последовательному каналу связи. При этом пары АЦП - микроконтроллер могут изменяться от потребностей.

Из множества выпускаемых интегральных АЦП остановимся на ADS7809 и ADS1210(11). Оба АЦП имеют источник питания +5В, что позволяет обходиться без согласований уровня при работе со стандартной логикой. В табл.1 приведены некоторые параметры этих АЦП.

Отличие ADS1210 от ADS1211 заключается в наличии у последнего внутреннего 4-канального коммутатора аналогового сигнала.

Несмотря на кажущуюся более высокую скорость измерения, у АЦП серии 1210, реальная скорость выше у 7809.

Т а б л и ц а 1
Характеристики некоторых АЦП

Параметр	ADS 7809	ADS 1210	ADS 1211
1. Разрядность	16	24	24
2. Максимальная тактовая частота	2МГц	10МГц	10МГц
3. Измеряемый диапазон	0 – 5В	0 – 5В	0 – 5В

Дело в том, что ADS 7809 работает на своей частоте и одно измерение может происходить со скоростью до 100 кГц.

С ADS 1210 дело гораздо сложнее. Данный АЦП включает в себя собственную схему предварительной обработки, работающую по внутренней программе. Он включает в себя возможность сдвига точки начала измерения, усилитель с переменным коэффициентом усиления, возможность осреднения, внутренний калибратор сдвига и другие коэффициенты, улучшающие его работу с точки зрения точности измерения.

Очень важным параметром является эффективное разрешение (количество достоверных разрядов), которое зависит от перечисленных коэффициентов (см. табл. 2).

Однако, следует иметь ввиду, что любое улучшение эффективного раз-

решения влечет за собой снижение скорости выборки.

Т а б л и ц а 2
Эффективное разрешение ADS1210

Эффективное разрешение (разрядность)	Скорость выборки канала (Гц)
20 – 21	10
19 – 20	25
19 – 20	50
18	100
11 – 12	500
10	1000

Очень удобным свойством данного АЦП является способность перепрограммироваться буквально в процессе измерения по команде с центрального ЭВМ. При этом следует только помнить, что любое изменение параметра или переключение канала влечет за собой не только потерю времени на перезапись внутренних регистров управления, но и потерю первых трех измерений, как недостоверных, из-за особенностей внутренней структуры чипа.

Изменяя внутреннюю настройку АЦП, можно подобрать необходимую скорость выборки при приемлемом эффективном разрешении.

Конечно, имеются и более скоростные 16-разрядные АЦП. Например, ADS7811 имеет скорость выборки 250 кГц.

При выборе микропроцессора следует обращать внимание на его тактовую частоту, т.к. от него будет зависеть и частота опроса АЦП. Серия 89СХХ в настоящее время выпускается с тактовой частотой до 33 МГц.

Большое семейство микропроцессоров 89СХХ фирмы Atmel дает широкий выбор как по частоте, так и по

конфигурации внешних портов. Внедрение в структуру микросхемы Flash-памяти и протокола SPI позволяет перепрограммировать схему не вынимая ее из аппаратуры.

Дальнейшее развитие технологий привело к созданию гибрида АЦП - микроконтроллер. ADuC812 - схема фирмы AnalogDevice представляет собой такой гибрид. К тому же АЦП имеет 8 каналов с внутренним коммутатором. Микросхема поставляется с заводской калибровкой, причем поправочные коэффициенты занесены во внутреннюю память и точность измерения по описанию составляет 0,5 LSB при разрешении 12 разрядов, что вполне достаточно для определенного ряда измерений. Кроме того, система команд ADuC812 совместима со всем семейством 89СХХ.

Следует только помнить, что современные ЭВМ, рассчитанные на работу по последовательному каналу связи, воспринимают только определенный ряд фиксированных частот и поэтому частота кварца должна быть привязана к этому ряду частот.

Имеются определенные ограничения и по скорости передачи информации в зависимости от длины линии связи.

Максимально возможная скорость, воспринимаемая стандартным портом RS232С ЭВМ составляет 19,6 кГц. Кроме того, имеются трудности при построении систем сбора информации от многочисленных абонентов.

При переходе на RS485 скорость может возрасти до 375 Кбит/с, частота, с которой может работать 89СХХ, хотя и потребуются специальная карта, вставляемая в ЭВМ.

Стандарт являет собой симметричную линию связи (витая пара). Пере-

дача и прием ведется по одной линии попеременно либо применяются две витые пары для раздельного приема и передачи. В этом случае возможна еще большая скорость передачи информации (см. табл. 3). При этом возможен обмен с 256 независимых источников информации, при применении репитеров (число приемников, нагруженных на один передатчик без репитера, не должно превышать - 32). Микросхемы серии 89C52 имеют специальный регистр адресного вызова и поэтому могут начинать обмен по команде с ЭВМ.

Таблица 3
Реализация линий связи RS485

Кбит/с	Реализация
62,5	Одна витая пара
375	Одна витая пара
2400	Две витых пары

При этом стандарт EIA RS485 определяет только электрические и физические характеристики. Программная реализация остается прежней, т.е. протокол обмена – RS232C.

Одним из примеров преобразователей из RS232C в RS485 является микросхема MAX1480.

Она также имеет стандартное питание +5 В, что позволяет ей рабо-

тать с серией 89CXX без всякого согласования.

И, наконец, с процессорами имеющими протокол SPI очень удобно применение оперативной Flash памяти серии AT45XX фирмы Atmel с последовательной записью информации. Дело в том, что она имеет тот же протокол, что позволяет использовать ее без каких-либо промежуточных схем.

Кроме того ОЗУ этого типа способно хранить данные годами без источников питания, что позволяет применять их в автономных измерителях или в измерителях включаемых по сигналу таймера.

ЛИТЕРАТУРА

1. ADS1210/ADS1211 24-Bit Analog-to-Digital converter. ©1996 Burr-Brown Corporation.
2. ADS7809 16-Bit 100 kHz Sampling CMOS Analog-to-Digital Converter © Burr-Brown Corporation.
3. AT89C52. 8-Bit Microcontroller with 8 Kbytes Flash. © Atmel.
4. MAX1480 Complete, Isolated, RS485/RS422 Data Interface. ©1996 Maxim Integrated Products.
5. А.А.Мячев. Интерфейсы средств вычислительной техники. Москва. "Радио и связь". 1993.

СПУТНИКОВЫЕ РЛСБО КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.В.Малиновский, В.В.Пустовойтенко

ООО "ДВС ЛТД"

99011 г. Севастополь, ул. Капитанская, 4

Морской гидрофизический институт

НАН Украины

99011 г. Севастополь, ул. Капитанская, 4

Радиолокаторы бокового обзора (РЛС БО), устанавливаемые на украинских ИСЗ, являются уникальным средством для проведения контроля состояния морской поверхности. По отношению к радиолокаторам с синтезированной апертурой (SAR), используемых на зарубежных спутниках (SAR C-band на ERS; SAR L-band на RADARSAT; SAR S-band на JERS), РЛСБО обладает значительно худшим пространственным разрешением, но существенно большей полосой обзора ~450 км и ее протяженностью в несколько тысяч километров. С другой стороны, разрешение ~1,5×2,5 км, получаемое в режиме непосредственной передачи (нп-рпм5) информации, является оптимальным для контроля мезомасштабных образований на поверхности моря и практически совпадает с разрешением 1×1 км метеорологических спутников серии NOAA, работающих в оптическом и ИК диапазонах. Существенным преимуществом использования информации РЛСБО, является возможность *оперативного* приема, тематической обработки и анализа РЛ данных по Черному и Азовскому морям на существующей в

настоящее время сети пунктов приема спутниковой информации в Киеве, Севастополе, Харькове и Днепропетровске.

Среди основных задач, решаемых с помощью РЛСБО необходимо, в первую очередь, выделить следующие:

- контроль поля ветра над морскими акваториями для обеспечения безопасности мореплавания;
- контроль и прогноз ветровой ситуации в прибрежной зоне для обеспечения безопасности сооружений, установленных на шельфе Черного моря;
- контроль ледовой обстановки и динамики положения кромки льда в Азовском море для целей навигации.

Успешная работа РЛСБО, установленного на первом украинском ИСЗ "Січ-1", в период с февраля по ноябрь 1996 г. показала, что все перечисленные задачи могут быть решены в полном объеме [1-5]. Примеры определения структуры поля ветра и его скорости W для различных типов мезомасштабных атмосферных образований над Черным морем, идентифицированных по данным РЛСБО, приведены в [3-5]. К ним относятся циклоны, ветровые струи, вызванные орографическими эффектами, атмосферные волны. Особое практическое значение имеет контроль изменения поля ветра в прибрежной зоне. Это обусловлено наличием там сооружений и коммуникаций (терминалы, нефтепроводы, газовые платформы и др.), которые подвергаются ветровым нагрузкам. Особенностью ветровой обстановки в таких районах является

изменение характеристик воздушного потока, за счет трансформации атмосферного погранслоя (АПС). Стандартные метеорологические прогнозы не позволяют оценивать этот феномен, имеющий пространственные масштабы порядка десятков километров. Большая полоса обзора РЛСБО дает возможность, с одной стороны, проводить полный контроль таких эффектов и, с другой стороны, получать эмпирические зависимости, необходимые для расчета приводной скорости ветра. Примеры сильной ветровой изменчивости в прибрежной зоне Черного и Азовского морей приведены в [3].

Совместное использование информации о поле ветра над морскими акваториями, получаемой с украинских и зарубежных ИСЗ, позволяет проводить детальный анализ при широкой полосе обзора. Естественным необходимым требованием при этом является соответствие данных с различных спутников. Проведем сравнение величин W , рассчитанных по изображениям РЛСБО, со значениями скорости ветра, полученными с зарубежных ИСЗ.

Количественное сопоставление данных РЛСБО ИСЗ "СГЧ-1" со скаттерометрической информацией ИСЗ ERS-2

Специализированным комплексом, предназначенным для определения поля ветра над морской поверхностью является скаттерометр, аналогичный установленному на ERS, имеющим многолучевую антенную систему, с помощью которой определяется направление W . Однако, скат-

терометры имеют относительно плохое пространственное разрешение (лучшим разрешением в 10 км обладает NSCAT, установленный на ИСЗ "QUIKSCAT"). Это не дает возможности контролировать мезомасштабную структуру ветра, что особенно важно для прибрежных районов океана и окраинных морей. Радиофизические комплексы на украинских ИСЗ позволяют проводить его измерения с разрешением в 2-3 км.

Для пересчета уровня сигнала радиолокатора в удельную эффективную поверхность рассеяния σ^0 , позволяющую рассчитывать скорость ветра, используется процедура нормализации РЛ данных. При определении значений W с помощью РЛСБО "СГЧ-1" в работах [3-5] использовалась методика нормализации, предложенная в [6].

Проведем сравнение данных РЛСБО с информацией скаттерометров о поле значений W , осредненных на площади $50 \times 50 \text{ км}^2$. На рис. 1а приведено поле ветра в атмосферном циклоне в центральной части Черного моря (09.09.96 г., 23:00 МСК), полученное по данным скаттерометра ERS. Длина и направление стрелок соответствует скорости и направлению ветрового потока. Более детально этот циклон проявляется на изображении РЛСБО, приведенном на рис. 1б (виток 5530, 09.09.96 г., 22:25 МСК), имеющим лучшее пространственное разрешение. Значение скорости ветра рассчитывалось по методике, предложенной в [6]. Для обоих рисунков наблюдается полное соответствие по пространственной структуре атмосферного образования. Скорость ветра по

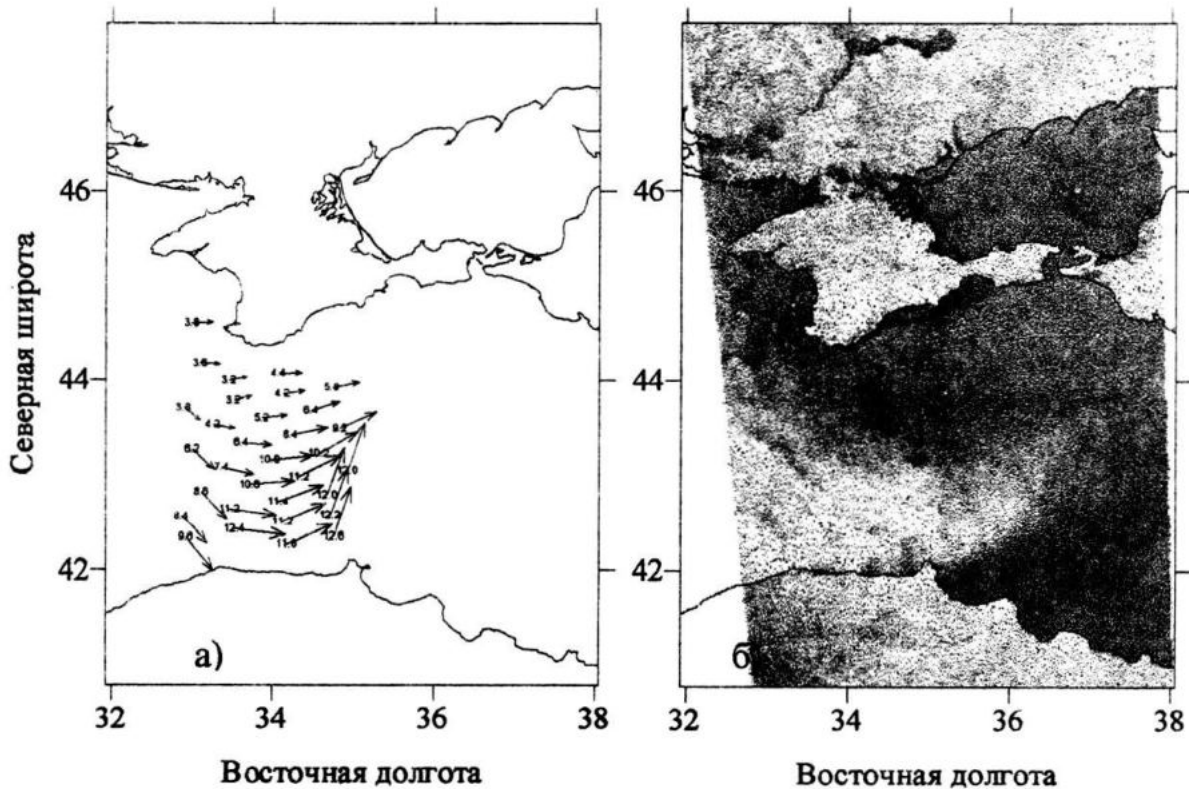


Рис. 1. а) – поле ветра в центральной части Черного моря, полученное по данным скаттерометра ERS 09.09.96 г. 23:00 МСК; б) – отображение атмосферного циклона над Черным морем в изображении РЛСБО 09.09.96 г. 22:35 МСК.

данным РЛСБО изменялась от 7-8 м/с в западной части циклона до 13-14 м/с в его восточной части, что соответствует данным ERS. Для сопоставления информации РЛСБО ИСЗ “Січ-1” и скаттерометра нами были отобраны съемки Черного моря, при которых сдвиг по времени между измерениями с обоих спутников не превышал ± 2 часа. Таких совпадений оказалось четыре за время функционирования РЛСБО ИСЗ “Січ-1”. На рис.2 показано сопоставление данных о модуле скорости ветра, полученных с обоих спутников. Видно, что связь между данными линейная, среднеквадратичное отклонение скорости ветра от сглаживающей прямой составляет $\sigma_W = \pm 1,7$ м/с. Наблюдаемый разброс точек может быть, в первую очередь, обусловлен не пол-

ной синхронностью измерений. Полученная линейная зависимость в широком диапазоне скоростей ветра указывает на хорошее соответствие информации, принимаемой с украинских космических носителей с информацией зарубежных ИСЗ и, в перспективе, позволяет дополнять скаттерометрические данные измерениями РЛСБО для описания тонкой структуры ветровых полей.

Отметим, что пространственные неоднородности в РЛ изображениях морской поверхности могут вызываться не только естественной изменчивостью поля W . Увеличение или уменьшение σ^0 происходит, например, над температурными фронтами. Физический механизм, основанный на трансформации АПС над пространственны-

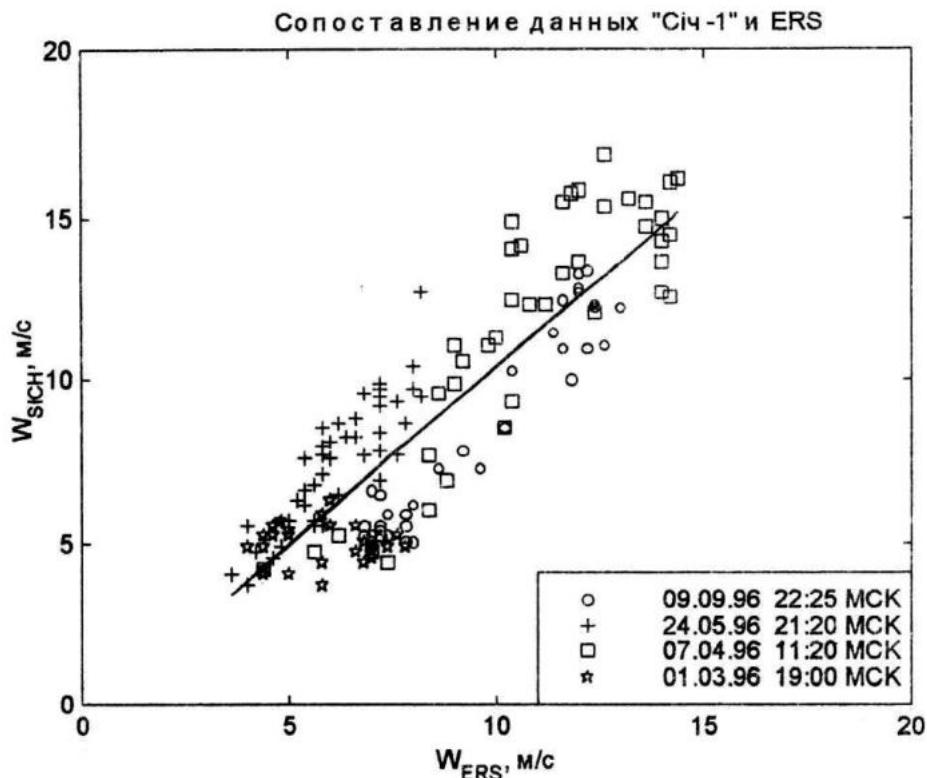


Рис.2. Сопоставление данных о скорости ветра, полученных по информации РЛСБО ИСЗ "Січ-1" и скаттерометра ERS. В легенде указаны даты и время съемок. Сплошная линия – регрессионная прямая, полученная методом минимального квадрата ошибки.

ми неоднородностями температуры океана, и примеры такого эффекта описаны в работе [2]. Практически не исследованными остается вопрос о проявлениях в РЛ сигнале зон конвергенции/дивергенции течений, которые могут влиять на обратное рассеяние радиоволн как за счет трансформации АПС, так и уменьшения (в случае дивергенции) или увеличения (в случае конвергенции) обрушений ветровых волн, вносящих вклад в σ^0 . Рассмотрим пример отображения структуры поля течений в радиолокационном изображении.

Проявление зон конвергенции течений в РЛ изображениях

Радиолокационные методы дают возможность идентифицировать мезомасштабные неоднородности на морской поверхности, связанные с зонами конвергенции течений. В таких зонах происходит скапливание поверхностно-активных веществ (ПАВ), приводящее к "выглаживанию" поверхности, и, следовательно, к изменению ее рассеивающих свойств. Это позволяет проводить контроль крупномасштабных районов загрязнений морских акваторий. Рассмотрим пример отображения конвергентных зон в Черном море в данных РЛСБО.

На рис.3 приведены РЛ изображения (ИСЗ ОКЕАН-07) и квазисинхронное ИК изображение (ИСЗ NOAA) Черного моря, выполненные 22 сентября 1995 года. Как видно из ИК изображения, на поверхности моря, свободной от облаков, очевидно прослеживается температурный фронт. Максимальный перепад температуры через этот фронт равен 3°C. На холодной стороне фронта видна структура поля контрастов поверхностной температуры, характерная для грибовидных течений. Линия фронта также нанесена на радиолокационном изображении.

Основными особенностями поля контрастов РЛ изображений являются:

- ступенчатообразные отрицательные контрасты РЛ сигнала;
- сильные положительные контрасты;
- три локализованные области отрицательных контрастов.

Видно, что положительные контрасты РЛ изображения находятся под облачным покровом и, очевидно, связаны с порывами ветра при процессах облакообразования. "Ступенчатообразные" отрицательные РЛ контрасты привязаны к линии фронта. При этом холодные воды проявляются в виде пониженного обратного рассеяния радиоволн. Отметим, что перепад температуры относительно небольшой, но, тем не менее, фронт идентифицируется в РЛ изображении. Для выяснения происхождения локализованных областей отрицательного РЛ контраста, они нанесены в виде контуров на поле поверхностной температуры.

Как следует из рис.3 две нижние области ложатся на периферию грибо-

видного течения. Одна из них точно попадает на локальную область пониженной температуры, а другая, включая в себя симметричную холодную область, тем не менее охватывает большее пространство и распространяется вдоль линии фронта. Источником отрицательных РЛ контрастов могут являться поверхностно-активные вещества. Эти ПАВ выносятся течениями из северо-западной части Черного моря (грибовидное течение является одним из элементов этой системы течений) и концентрируется в зонах конвергенции как в центрах круговоротов грибовидного течения, так и в "вытянутой" вдоль фронта конвергентной зоны. Третья (или северная) локализованная область отрицательного РЛ контраста концентрируется в центре стационарного круговорота образующегося при "обтекании" Основным Черноморским течением Крыма. Центр этого круговорота является зоной конвергенции где скапливаются загрязняющие вещества, которые попадают в ОЧТ при его прохождении вдоль южного берега Крыма.

Таким образом, совместный анализ поля поверхностной температуры и РЛ изображения с привлечением известных сведений об особенностях циркуляции моря позволяет дать интерпретацию РЛ контрастов. Окончательное заключение об идентификации текущих мезомасштабных особенностях может быть сделано лишь при условии повторения РЛ контрастов в серии последовательных изображений, выполненных во временном интервале, превышающем масштаб атмосфер-

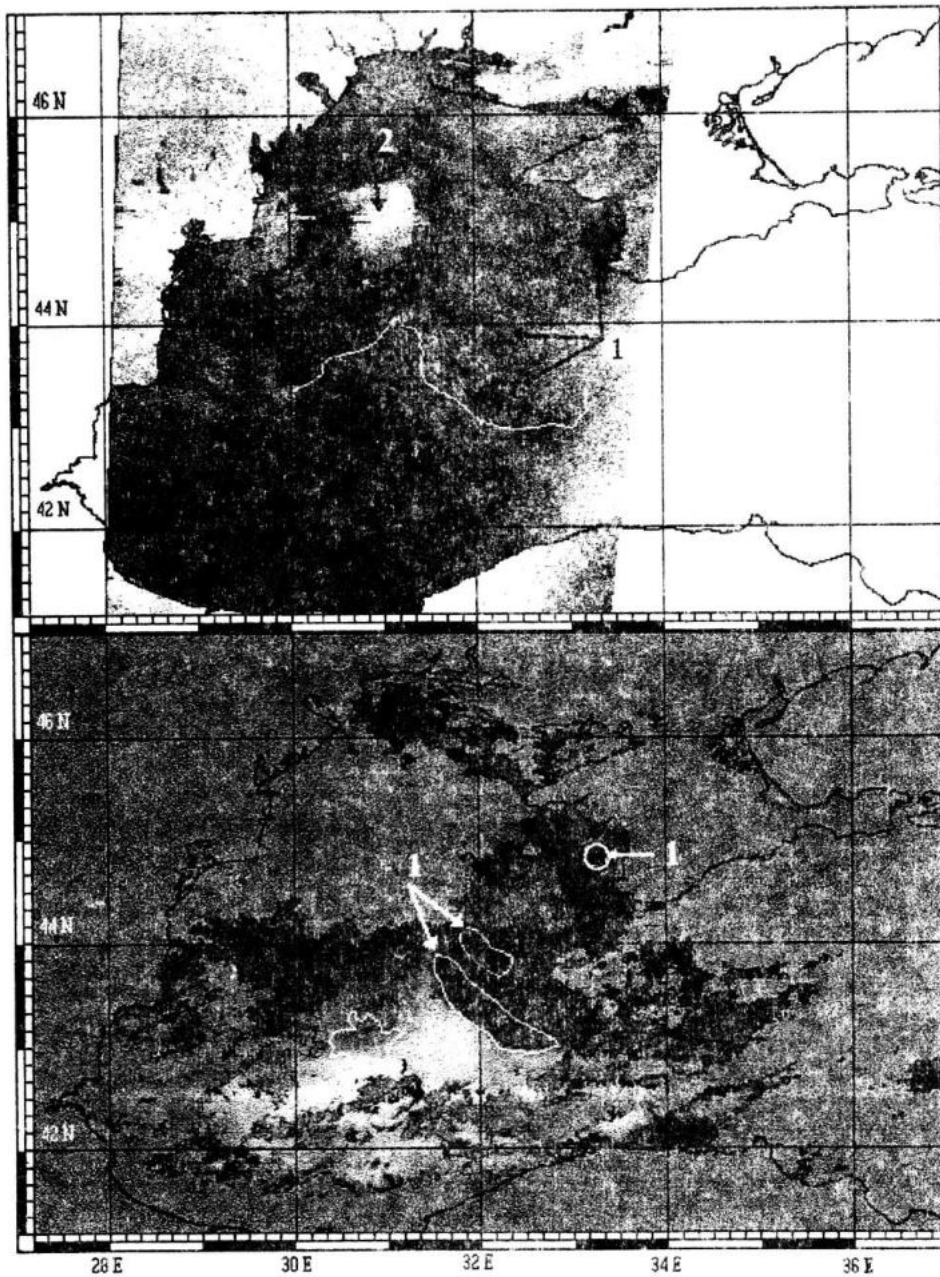


Рис.3. РЛ (сверху) и ИК (снизу) изображения Черного моря. На ИК изображении теплая вода соответствует светлому тону, холодная – темному; равномерный серый цвет – облака и суша. Белая кривая на РЛ изображении – линия температурного фронта; замкнутые кривые на ИК изображении – локальные зоны отрицательного РЛ контраста. Цифра 2- шквалы ветра.

ной изменчивости, но находящимся внутри масштаба изменчивости моря.

Заключение

Использование информации РЛСБО, установленной на ИСЗ дает возможность решать широкий круг задач в интересах Украины. По возможностям интерпретации радиолокационных данных на мезо- и синоптических масштабах, РЛСБО не уступает зарубежным радиолокаторам. При этом несомненными достоинствами РЛСБО являются большая полоса обзора и возможность приема и обработки информации практически в реальном масштабе времени.

Вследствие своей уникальности, РЛСБО необходимо рассматривать как элемент международной космической наблюдательной системы. Комплексирование результатов синхронных РЛ зондирований в рамках единой спутниковой системы позволяет совместить глобальность обзора поверхности моря и суши, присущую украинским РЛСБО и детальность просмотра отдельных участков при использовании данных зарубежных SAR.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального космического агентства Украины: контракты №2-15/00-МГИ и №2-15/00-ДВС.

ЛИТЕРАТУРА

Г.А.В.Родин, В.Н.Кудрявцев, В.В.Малиновский (1997). Идентификация фронтальных разделов в океане по данным радиолокационного зондирования с ИСЗ серии "Океан". Приложение

к промысловой разведке рыб. В кн. "Дистанционные методы мониторинга промысловых районов Мирового океана", ВНИРО, с. 33-62.

2. Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В., Родин А.В. (1999). Проявление температурных фронтов в радиолокационных изображениях океана. ИЗК, № 6, с.23-33.

3. Малиновский В.В., Пустовойтенко В.В., Кудрявцев В.Н. (1998) Использование информации РЛСБО ИСЗ "Січ-1" для наблюдения Черного и Азовского морей". В сб. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАНУ, с.162-173.

4. Korotaev G.K., Grodsky S.A., Malinovsky V.V., Pustovoytenko V.V. et al. (1998). Development of Remote Sensing of Seas and Oceans in Space Research in Ukraine 1994-1997, NSAU, Kyiv. pp. 44-57

5. В.В.Малиновский, В.В.Пустовойтенко. Радиолокационные наблюдения мезомасштабных особенностей приводного ветра (1999).- В сб. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАНУ, с.142-146.

6. В.В.Пустовойтенко, В.В.Малиновский (1998). Некоторые особенности обработки информации спутниковой радиолокационной станции бокового обзора ИСЗ "Січ-1". Морской гидрофиз. журнал, №3, с.70-77.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ИЗБЫТОЧНЫХ СИСТЕМ

В.А.Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Существующие системы различного назначения обычно сохраняют свою пригодность для использования при отказе некоторого количества входящих в них элементов, т.е. имеют избыточность, которая часто вводится в них целенаправленно для повышения надежности. Это структурная избыточность в измерительной и другой аппаратуре, избыточная сетка станций при съемке или контроле полей окружающей среды, избыточные базы данных, сохраняющие или восстанавливающие гарантированное качество при длительном хранении и т.д. Основными количественными оценками роли избыточности обычно являются вероятность безотказной работы во времени $p(t)$ и среднее время безотказной работы T_{cp} , характеризующее долговечность системы. Точные формулы для расчета долговечности различного типа избыточных систем были получены в [1] и частично опубликованы в [2]. Поскольку потребность в точных расчетах долговечности избыточных систем не отпала, эти результаты приводятся в данной работе в полном виде.

1. Общий метод анализа

Система состоит из n элементов, каждый из которых может быть в множестве $\{A\}$ мощностью a^n состояний с экспоненциальным временем пребывания. Как известно, такое

поведение системы можно представить графом переходов и описать однородным марковским процессом [3, 4]. Для каждого i -го состояния (или подмножества состояний) системы справедливо дифференциальное уравнение

$$p_i'(t) = -p_i(t) \sum_{j \in Q} \lambda_{ij} + \sum_{s \in S} p_s(t) \lambda_{si} \quad (1)$$

где λ_{ij} - интенсивность перехода из состояния (подмножества состояний) i в состояние (подмножество) j , S множество состояний (подмножество) системы (источников), из которых возможен непосредственный переход в состояние (подмножество) i , а Q - множество состояний (подмножеств) системы (потребителей), в которые возможен непосредственный переход из состояний (подмножества) i .

Определим среднее время пребывания системы в состоянии (подмножество) i . Для чего проинтегрируем уравнение (1) и учтем начальные условия $p_0(0) = 1$; $p_i(0) = 0$; $i \neq 0$. Получим

$$\tau_0 = \frac{1}{\sum_{j \in Q} \lambda_{0j}}, \quad (2)$$

$$\tau_i = \frac{\sum_{s \in S} \tau_s \lambda_{si}}{\sum_{j \in Q} \lambda_{ij}}, \quad i \neq 0 \quad (3)$$

Если B есть множество рабочих состояний (подмножеств) системы, то среднее время работы системы до отказа определяется выражением

$$T = \sum_{i \in B} k_i \tau_i. \quad (4)$$

где k_i - количество состояний в i -ом подмножестве.

2. Структуры и цепи с двумя типами отказов.

Допустим имеется электрическая цепь из n последовательно (параллельно) соединенных элементов, переходящих в состояния короткого замыкания и обрыва с интенсивностями λ_1 и λ_0 соответственно (рис. 1). Цепь может находиться в

$$\tau_m = \frac{m\tau_{m-1}\lambda_1}{(n-m)(\lambda_0+\lambda_1)} = \frac{m!\lambda_1^m}{(\lambda_0+\lambda_1)^{m+1} \prod_{j=0}^m (n-j)} \quad (5)$$

Учитывая, что количество состояний k_m подмножества B_m будет равно C_n^m , для среднего времени работы цепи до отказа получим

$$T(n) = \sum_{m=0}^{n-1} \frac{\lambda_1^m}{(n-m)(\lambda_0+\lambda_1)^{m+1}} \quad (6)$$

Для параллельной цепи вместо λ_1 в числителе формулы ставится λ_0 . Примем для коэффициента асимметрии отказов $\xi = \frac{\lambda_1}{\lambda_1+\lambda_0} = \frac{\lambda_1}{\lambda}$ и можем записать

$$T(n) = \frac{1}{\lambda} \sum_{m=0}^{n-1} \frac{\xi^m}{n-m} \quad (7)$$

Можем записать:
$$\sum_{m=0}^{n-1} \frac{1}{2^m(n-m)} = \frac{1}{n} + \frac{1}{2(n-1)} + \frac{1}{4(n-2)} + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} \quad (8)$$

Поскольку $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \frac{1}{2^i} = 2$, то легко показать, что любой член ряда (8) больше суммы последующих членов. Следовательно, можем записать

$$\sum_{m=0}^{n-1} \frac{1}{2^m(n-m)} < \frac{2}{n} \quad \text{при } n > 1, \quad (9)$$

$$T(n) < \frac{1}{\lambda} \quad \text{при } \xi = 0,5$$

3" состояниях, причем наличие хотя бы одного обрыва (короткого замыкания) приводит к отказу цепи. Для времени пребывания τ_m в подмножестве состояний B_m , содержащем m допустимых отказов, (например КЗ), можем записать

Таким образом, $0,5 \leq \xi \leq 1$ для последовательной цепи и $0 \leq \xi < 0,5$ для параллельной цепи. Если $n \rightarrow \infty$, то сумма в последнем выражении не превысит суммы геометрической прогрессии со знаменателем ξ , т.е. $\frac{1}{1-\xi}$ и будет максимальной при $\xi \equiv 1$.

Покажем, что при $\xi = 0,5$ избыточная цепь не может быть долговечнее одного элемента.

3. Системы со "скользящим" резервом (избыточные коды).

Система содержит n элементов и сохраняет работоспособность при отказе ρ любых элементов. Из выражения (7) при $\xi = 1$ получим

$$T_p(n) = \frac{1}{\lambda} \sum_{m=0}^{\rho} \frac{1}{n-m} \quad (10)$$

Этот случай в гораздо более общем виде (при различных режимах резерва и процедурах восстановления) доста-

Таблица 2

n	$T_n(\lambda_0, \lambda_1)$	$T_n(\xi)$ $\lambda = \lambda_0 + \lambda_1, \xi = \frac{\lambda_1}{\lambda}$	$T_n \text{ min}$ при $\xi = 0; \xi = 1$	$T_n \text{ max}$ при $\xi = 0,5$
3	$\frac{5(\lambda_1 + \lambda_0)^2 + 12\lambda_1\lambda_0}{6(\lambda_1 + \lambda_0)^3}$	$\frac{5 + 2(1 - \xi)\xi}{6\lambda}$	$\frac{5}{6\lambda}$	$\frac{4}{3\lambda}$
5	$\frac{47(\lambda_1 + \lambda_0)^4 + 90\lambda_1\lambda_0[(\lambda_1 + \lambda_0)^2 + 4\lambda_1\lambda_0]}{60(\lambda_1 + \lambda_0)^5}$	$\frac{47 + 90(1 - \xi)\xi + 360(1 - \xi^2)\xi^2}{60\lambda}$	$\frac{47}{60\lambda}$	$\frac{23}{15\lambda}$
7	$\frac{319}{420(\lambda_1 + \lambda_0)} + \frac{4\lambda_1^2\lambda_0}{3(\lambda_1 + \lambda_0)^3} + \frac{5\lambda_1^2\lambda_0^2}{(\lambda_1 + \lambda_0)^5} + \frac{20\lambda_1^3\lambda_0^3}{(\lambda_1 + \lambda_0)^7}$	$\frac{319}{420\lambda} + \frac{4(1 - \xi)\xi}{3\lambda} + \frac{5(1 - \xi^2)\xi^2}{\lambda} + \frac{20(1 - \xi^3)\xi^3}{\lambda}$	$\frac{319}{420\lambda}$	$\frac{4329}{2520\lambda}$

дублирования системы дает выигрыш в среднем времени безотказной работы порядка $\frac{1}{2}\sqrt{N}$. Точные оценки, даже при малых N и числе резервных блоков $(M-1)N$ отсутствуют. Поскольку общее число возможных рабочих состояний будет $(2^M - 1)^N$, то перебор их по графу переходов для получения конечного выражения $T_{\text{ср}}$ практически ограничен системами малой сложности ($MN \leq 6$).

Для однородных систем можно воспользоваться методом, предполагающим объединение состояний в подмножества однотипных и рассмотрение переходов между подмножествами [5]. При этом перебор может быть существенно сокращен и составлять не более $(M-1)N$. Подмножество рабочих состояний системы, содержащей ρ

отказов обозначим $B_\rho, \rho = 0, (M-1)N$. Очевидно, что система из подмножества $B_{\rho-1}$ переходит в состояние подмножества B_ρ и в среднем пребывает в нем время τ_ρ , определяемое выражением

$$\tau_\rho = \frac{\rho \tau_{\rho-1}}{\lambda(MN - \rho)} \quad (12)$$

$$\text{или } \tau_\rho = \frac{\rho!}{\lambda \prod_{i=0}^{\rho} (MN - i)} = \frac{1}{\lambda(MN - \rho) C_{MN}^\rho} \quad (13)$$

Поскольку число возможных физических состояний системы с ρ отказами на поле MN элементов равно C_{MN}^ρ , но при $\rho \geq M$ $C_{(N-1)M}^{\rho-M}$ из них являются нерабочими, то мощность множества B_ρ равна

$$k_p = \begin{cases} C_{MN}^p, & \text{при } p < M \\ C_{MN}^p - C_N^1 C_{(N-1)M}^{p-M}, & \text{при } p \geq M \end{cases} \quad (14)$$

Если $\lambda = \frac{\lambda_N}{N}$, где λ_N - интенсивность отказов 1, N системы (нерезервированной), то выигрыш для среднего времени работы MN - системы составит

$$V_{M,N} = \lambda_N T_{MN} = N \left\{ \sum_{\rho=0}^{M-1} \frac{1}{(MN - \rho)} + \sum_{\rho=M}^{(M-1)N} \frac{1}{(MN - \rho)} W \right\} \quad (15)$$

$$\text{где } W = 1 - \frac{\rho! N! \{MN - [\frac{\rho}{M}] M\}!}{(MN)! [\frac{\rho}{M}]! \{N - [\frac{\rho}{M}]\}! \{\rho - [\frac{\rho}{M}] M\}!}$$

В таблице 3 представлены значения $V_{M,N}$ для $M=2 \div 5$ и $N=10 \div 100$.

Поскольку для $2, N$ -систем (дублированной) $k_p = 2^p C_N^p$, то можем записать

$$V_{2N} = \lambda_N T_{2N} = \frac{N \cdot N!}{(2N)!} \sum_{\rho=0}^N \frac{2^p (N - \rho - 1)!}{(N - \rho)!} \quad (16)$$

В таблице 4 представлены значения для V_{2N} для $N=10 \div 100$.

Аналогичным образом получим формулы для "холодного" резерва

$$V_{3N} = \lambda_N T_{3N} = N \left\{ \sum_{\rho=0}^2 \frac{1}{(3N - \rho)} + \sum_{\rho=3}^{2N} \frac{1}{3N - \rho} \left[1 - \frac{\rho! N! \left(3N - [\frac{\rho}{3}] 3\right)!}{(3N)! [\frac{\rho}{3}]! \left(N - [\frac{\rho}{3}]\right)! \left(\rho - [\frac{\rho}{3}] 3\right)!} \right] \right\} \quad (18)$$

В таблице 6 показаны значения V_{3N} для $N=10 \div 100$.

Для системы из N блоков, в каждом из которых по k рабочих и m резервных элементов, образующих скользящий резерв в блоке, можем записать

$$\tau_p = \frac{1}{\lambda [N(k+m) - \rho] C_{N(k+m)}^p}, \quad k_p = C_{N(k+m)}^p \quad (19)$$

Таблица 3

Относительное увеличение V_{MN} времени безотказной работы системы из N блоков, каждый из которых содержит $(M-1)$ элементов в "горячем" резерве

M	N	V_{MN}
2	10	7,5
	20	14,6
	30	21,5
	40	28,4
	50	35,4
	60	42,3
	70	49,3
	80	56,2
	90	63,1
	100	70,0
3	10	11,6
	20	22,6
	30	33,6
	40	44,6
	50	55,6
	60	66,6
	70	77,6
	80	88,6
	90	99,5
	100	110,5
4	10	14,5
	20	28,4
	30	42,2
	40	56,1
	50	69,9
	60	83,8
	70	97,7
	80	111,5
	90	125,4
	100	139,3
5	10	16,7
	20	32,8
	30	48,9
	40	65,0
	50	81,1
	60	97,2
	70	113,3
	80	129,4
	90	145,5
	100	161,5
7	10	20,0
	20	39,5
	30	58,9
	40	78,4
	50	97,9
	60	117,3
	70	136,8
	80	156,2
	90	175,7
	100	195,2
8	10	21,4
	20	42,2
	30	62,9
	40	83,7
	50	104,5
	60	125,3
	70	146,1
	80	166,9
	90	187,7
	100	208,5
9	10	22,5
	20	44,5
	30	66,5
	40	88,4
	50	110,4
	60	132,4
	70	154,4
	80	176,3
	90	198,3
	100	220,3
10	10	23,6
	20	46,6
	30	69,6
	40	92,7
	50	115,7
	60	139,4
	70	161,7
	80	184,8
	90	207,8
	100	230,8

Таблица 4

Относительное увеличение V_{2N} среднего времени безотказной работы системы из N дублированных блоков с "горячим" резервом

N	V_{2N}
1	1,5
2	1,8
3	2,1
4	2,3
5	2,5
6	2,7
7	2,9
8	3,0
9	3,2
10	3,3
20	4,5
30	5,4
40	6,1
50	6,8
60	7,4
70	7,9
80	8,4
90	8,9
100	9,4

Таблица 5

Значения $V_{MN,X}$ относительного увеличения среднего времени безотказной работы системы из N блоков, каждый из которых содержит $(M-1)$ элементов в "холодном" резерве

M	N	$V_{MN,X}$
2	10	10,7
	20	20,9
	30	30,9
	40	40,9
	50	51,0
	60	61,0
	70	71,0
	80	81,0
	90	91,0
	100	101,0
	3	10
20		41,0
30		61,0
40		81,0
50		101,0
60		121,0
70		141,0
80		161,0
90		181,0
100		201,0

4	10	31,0
	20	61,0
	30	91,0
	40	121,0
	50	151,0
	60	181,0
	70	210,0
	80	241,0
	90	271,0
	100	301,0
	5	10
20		81,0
30		121,0
40		161,0
50		201,0
60		241,0
70		281,0
80		321,0
90		361,0
100		401,0

Таблица 6

Верхнее значение V_{3N} относительного увеличения среднего времени безотказной работы системы из N мажоритарных блоков с тремя входами

N	V_{3N}
10	11,6
20	22,6
30	33,6
40	44,6
50	55,6
60	66,6
70	77,6
80	88,6
90	99,5

100	110,5
200	220,4
300	330,3
400	440,1
500	550,0
600	659,8
700	769,7
800	879,6
900	989,4
1000	1099,3

Таблица 7

Относительное увеличение среднего времени $V_{(k+m)N}$ безотказной работы системы из N блоков, каждый из которых содержит по k рабочих и m резервных в "скользящем", "горячем" резерве

k	m	N	$V_{(k+m)N}$
8	1	1	1,9
		10	10,4
		100	95,2
		500	472,1
		1000	943,2
	2	1	2,7
		10	18,8
		100	179,4
		500	893,5
		1000	1786,0
	3	1	3,4
		10	26,3
		100	255,6
		500	1274,7
		1000	2548,5
	4	1	4,1
		10	33,3
		100	325,2
		500	1622,7
		1000	3244,6
5	1	4,7	
	10	39,6	
	100	389,2	
	500	1942,8	
	1000	3884,9	
16	1	1	1,9
		10	10,7
		100	98,0
		500	486,0
		1000	971,0
	2	1	2,8
		10	19,8
		100	189,4
		500	943,2
		1000	1885,5
	3	1	3,7
		10	28,4
		100	275,9
		500	1375,7
		1000	2750,5
	4	1	4,5
		10	36,6
		100	357,9
		500	1786,0
		1000	3571,2
5	1	5,2	
	10	44,4	
	100	436,0	
	500	2176,4	
	1000	4351,8	
24	1	1	2,0
		10	10,8
		100	99,0
		500	490,8
		1000	980,7
	2	1	2,9
		10	20,2
		100	193,1
		500	961,5
		1000	1922,0
	3	1	3,8
		10	29,2
		100	283,6
		500	1414,3
		1000	2827,7
	4	1	4,6
		10	37,9
		100	370,9
		500	1850,7
		1000	3700,5
	5	1	5,5
		10	46,3
		100	455,1
		500	2271,8
		1000	4542,7
32	1	1	2,0
		10	10,8
		100	99,5
		500	493,3
		1000	985,7
	2	1	2,9
		10	20,4
		100	195,0
		500	971,0
		1000	1941,0
	3	1	3,8
		10	29,6
		100	287,7
		500	1434,8
		1000	2868,5
	4	1	4,7
		10	38,6
		100	377,9
		500	1885,5
		1000	3770,0
5	1	5,6	
	10	47,4	
	100	465,5	
	500	2323,8	
	1000	4646,8	
46	1	1	2,0
		10	10,9
		100	99,9
		500	495,6
		1000	990,3
	2	1	2,9
		10	20,6
		100	196,8
		500	979,9
		1000	1958,7
3	1	3,8	
	10	30,0	
	100	291,6	
	500	1454,1	
	1000	2907,2	
5	1	5,7	
	10	48,4	
	100	475,6	
	500	2374,2	
	1000	4747,4	

$$V_{(k+m)N} = \lambda_N T_{(k+m)N} = kN \left\{ \sum_{\rho=0}^m \frac{1}{(N(k+m)-\rho)} + \sum_{\rho=m+1}^{mN} \frac{1}{N(k+m)-\rho} \left[1 - \frac{\rho! N! \left(N(m+k) - \left[\frac{\rho}{m+1} \right] (m+1) \right)!}{(N(m+k))! \left[\frac{\rho}{m+k} \right]! (N - \left[\frac{\rho}{m+1} \right])! (\rho - \left[\frac{\rho}{m+1} \right] (m+1))!} \right] \right\} \quad (20)$$

В таблице 7 приведены значения $V_{(k+m)N}$ для $k = 8 \div 32$, $m = 1 \div 5$, $n = 1 \div 1000$.

Для n, N - системы, содержащей N мажоритарных восстанавливающих органов на n входов каждый, получим оценки

$$T \left(\frac{n-1}{2} + \frac{n+1}{2} \right) N < T_{nN} < T(1+(n-1))N, \quad (21)$$

где $T \left(\frac{n-1}{2} + \frac{n+1}{2} \right) N$ - из выражения (20) при $k = \frac{n-1}{2}$, $m = \frac{n+1}{2}$;

$T(1+(n-1))N$ - из выражения (20) при $k = 1$, $m = n-1$;

причем $\lambda_N = (\lambda_0 + \lambda_1)N$.

Полученные выражения для точного расчета среднего времени безотказной работы сложных избыточных систем из однородных элементов могут быть использованы вместо асимптотических оценок.

Автор выражает признательность Глухой А.Р. за расчет таблиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайский В.А. Основы обеспечения точности автоматизированных систем сбора и переработки гидрофизической информации. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. МГИ НАНУ, 1981.

2. Гайский В.А. Точный расчет среднего времени безотказной работы избыточных систем из однородных элементов с экспоненциальным распределением времени жизни. В кн.: Аннотации сообщений VII-го Всесоюзного совещания по проблемам управления. Минск, 1977.

3. Васильев Ю.А., Козлов Б.А. Резервированная система - система стареющая. В кн.: Теория надежности и массовое обслуживание. М., "Наука", 1969.

4. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики". М., Сов. радио, 1975.

5. Кемени Дж., Внелл Дж. Конечные цепи Маркова. Пер. с англ. Под ред. А.А.Юшкевича, М., "Наука", 1970.

**СПЕКТРАЛЬНО-
КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ
АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЙ ПО ДАННЫМ
ИЗМЕРЕНИЙ НА АВТОНОМНЫХ
БУЙКОВЫХ СТАНЦИЯХ**

Н.Г. Хоролич

Морское отделение Украинского
научно-исследовательского гидро-
метеорологического института
г. Севастополь, ул. Советская, 61

А.Х. Дегтерев

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: ongf@alpha.mhi.iuf.net

Для изучения закономерностей изменчивости морских течений как двухмерного векторного процесса обычно используется информация о временных изменениях модуля и направления скорости в одной или нескольких точках исследуемой акватории (на автономных буйковых станциях) в виде векторных временных рядов $V(t)$. Анализировать такие ряды довольно затруднительно, и поэтому приходится использовать декартовы координаты, представляя пульсации вектора скорости в виде его проекций на два ортогональных направления. Однако оценки векторного временного ряда, полученные для его проекций на декартовы оси координат, будут малоинформативны, так как являются неинвариантными (т.е. зависят от выбора системы координат). Поэтому в течение последних 20-30 лет появилось много работ, посвященных разработке и применению новых методов анализа, свободных от перечисленных выше и других недостатков. К настоящему времени наиболее разработанными и распространенными являются метод "вращательных компонент" [8,9] и векторно-алгебраический метод [1,4], которые нашли широкое применение при анализе векторных временных рядов в

океанографии и гидрометеорологии [3,5-7].

Метод "вращательных компонент" основан на представлении процесса $V(t)$ в виде суперпозиции круговых противоположно направленных колебаний, а вектора в виде комплексного числа. В векторно-алгебраическом методе процесс $V(t)$ представляется в виде вектор-функции со значениями в евклидовом пространстве. Корреляционная функция и спектральная плотность определяются как диадные тензоры. Именно почти полное отсутствие элементов субъективизма со стороны исследователя при анализе векторного временного процесса $V(t)$ способствовало дальнейшему совершенствованию метода и его широкому применению в гидрометеорологии.

Однако первые результаты, полученные исследователями в области картирования переменной составляющей полей скоростей течений и ветра ("эллипсов" их дисперсии) с помощью данного метода, какими бы впечатляющими они ни были, заставили нас (впрочем, и самих этих исследователей) усомниться в правильности интерпретации отдельных результатов анализа, в частности, в ортогональности ориентации продольной оси этих "эллипсов" направлению среднего переноса вод [5,6].

Мы полагаем, что такая ориентация продольных осей "эллипсов" дисперсии указанных полей могла быть следствием, по крайней мере, трех причин, причем некоторые из них являются главенствующими. Во-первых, данный эффект мог быть обусловлен влиянием какого-нибудь гидродинамического фактора (длинных волн, вихрей и т.д.). Во-вторых, некоторые исследователи, на наш взгляд, некорректно интерпретировали лишь формально правильные отдельные моменты метода в силу ряда неточностей, которые были допущены самими его

авторами в известных работах [1,4]. И, наконец, в третьих, в цитированных работах нечетко дается определение ориентации главных осей (направлений), относительно которых определяется ориентация большой и малой осей кривых второго порядка, являющихся геометрическим образом симметричных частей диадных тензор-функций, характеризующих поведение вектора скорости $V(t)$ (так называемая проблема нахождения собственных векторов и собственных чисел симметричной части диадного тензора в линейной алгебре). Это и явилось, пожалуй, основным источником некоторых неточностей, полученных в ряде работ.

Поэтому и неудивительно, что эти отдельные неточности сразу же проявились при анализе массового материала наблюдений, выполненного с помощью данного метода.

Целью данной работы является установление и устранение некоторых противоречивых моментов и неточностей, возникающих при использовании векторно-алгебраического метода в [1,4].

Информация о свойствах морских течений содержится прежде всего в диадных тензорах дисперсии, корреляционной и спектральной вектор-функций [1,4]. Тензору дисперсии, который является симметричным, и симметричным частям двух последних тензор-функций можно поставить в соответствие центральную кривую второго порядка (эллипс, окружность, гиперболу). В линейной алгебре [2] характеристики этой кривой принято определять с помощью коэффициентов квадратичной формы (см. ниже). Однако авторы [1,4] ошибочно отождествили эти коэффициенты с аналогичными (совпадающими с ними лишь по форме представления, но не по физическому смыслу) компонентами матрицы, соответствующей симмет-

ричной части этих тензоров. Таким образом, парадокс возникшей ситуации заключается в том, что определяемая с помощью принятого в [1,4] подхода кривая не принадлежит симметричной части анализируемых тензоров.

Ориентация большой оси такой кривой, отражающая прежде всего направленность изменений анализируемого процесса, совпадает, как известно [2], с осью ординат в новой системе координат (в которой кривая может быть приведена к канонической форме).

Эта неточность, на наш взгляд, в основном и явилось источником ошибочных выводов, полученных практически во всех работах по данному вопросу.

Коротко остановимся на ходе рассуждений авторов [1,4].

Из линейной алгебры известно [2], что симметричная билинейная форма в двумерном пространстве в общем случае может быть представлена в виде диагональной матрицы, для которой справедливо следующее выражение:

$$a_{11}x_1^2 + 2a_{12}x_1x_2 + a_{22}x_2^2 = \lambda_1\xi_1^2 + \lambda_2\xi_2^2, \quad (1)$$

где a_{11} , a_{12} , a_{22} - компоненты симметричного тензора (например, корреляционного или спектрального [1,4]), λ_1 , λ_2 - главные компоненты, или собственные числа данного тензора (причем $\lambda_1 \geq \lambda_2$), а ξ_1 , ξ_2 характеризуют такие направления для λ_1 , λ_2 , при которых недиагональные компоненты двумерной матрицы, соответствующей (1), будут равны нулю.

Заметим, что λ_1 и λ_2 являются инвариантами:

$$\begin{aligned} \lambda_1 + \lambda_2 &= a_{11} + a_{22}, \\ \lambda_1\lambda_2 &= a_{11}a_{22} - a_{12}^2. \end{aligned} \quad (2)$$

ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕРМОПРОФИЛЕМЕРОВ

П.В.Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Создание распределенных датчиков температуры, термопрофилемеров, и получение с помощью них качественно новых измерительных данных о непрерывных профилях температуры в средах поставило задачу по получению и первичной обработке такой информации. Широкие и еще не до конца исследованные возможности термопрофилемеров по контролю других параметров среды, напрямую связанных с температурными полями, можно оценить только вследствие многосторонней и качественной обработки таких измерений.

В результате решения этой задачи были разработаны и внедрены новые уникальные для данного прибора алгоритмически-программные методы обработки и отображения измерительной информации. Созданная на их основе полнофункциональная диалоговая программная система позволяет провести полный спектр первичных операций, связанных с градуировкой датчиков, сбором и регистрацией данных термопрофилемеров.

Прием как измерительной, так и градуировочной информации осуществляется в цифровых последовательных кодах на порт RS 232 персонального компьютера. Расшифровка кадра позволяет в реальном масштабе времени определять по выходным данным АЦП (в данном случае 20 разрядов) и путем эталонной корректировки с использованием линейной или полиномиальной интерполяции значение сопротивления каждого из проводников датчика. В программе реализованы алгоритмы градуировки, подробно описанные в [1,2]. Нахождение градуи-

ровочных коэффициентов для каждого распределенного участка датчика осуществляется решением систем линейных уравнений по методу Гаусса с выбором главного элемента. Расчетное время с использованием метода Гаусса составляет приблизительно $0.005 \cdot n \cdot m$ секунд на ПЭВМ с процессором 486DX2 и тактовой частотой 66 МГц, где n -число неизвестных в системе, а m -количество систем. Существующий в программе алгоритм проверки полученных результатов градуировки показал более высокую точность этого метода по сравнению с другими методами Гаусса и итераций при решении поставленной задачи. Подстановка результатов вычислений в исходные системы уравнений показывает нулевые погрешности расчетов для установленной точности сопротивлений термочувствительных проводников и измеряемой температуры. Так как процесс градуировки термопрофилемера осуществляется многократным помещением датчика в различные установившиеся профили температур, контролируемые платиновым эталоном, то и качество градуировки сильно зависит от стабильности этих профилей в течение определенного интервала времени. Возможность выбора таких интервалов в диалоге с оператором ПЭВМ осуществлена в программном пакете на основе численно-графического отображения всей входной кодовой информации (Рис.1).

Программный блок, отвечающий за измерения температуры с помощью термопрофилемеров, содержит в себе различные алгоритмы отображения измерительной информации как в реальном времени, так и в режиме имитации из ранее записанного кодового файла данных. Имеется блок ручной корректировки градуировочных коэффициентов. Таким образом, для наиболее полного и наглядного отображения температурных процессов, происходящих в среде контроля распределенным

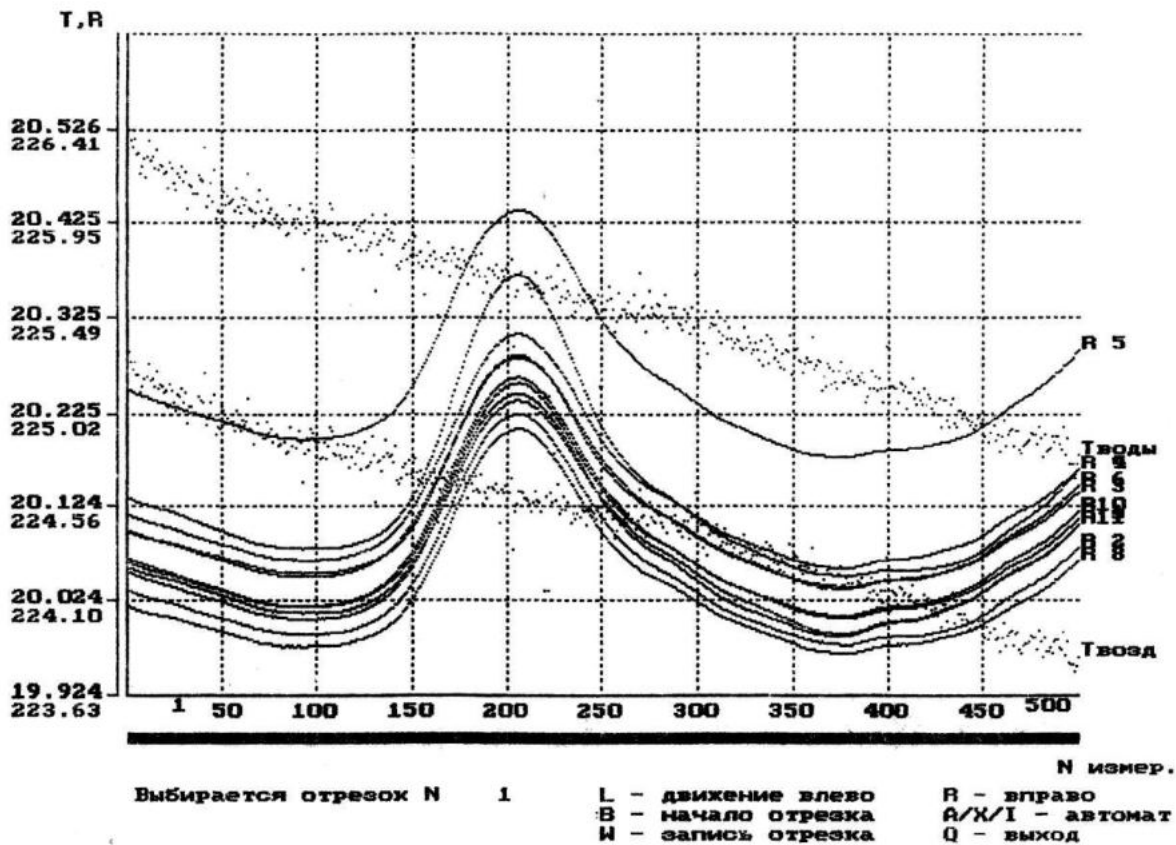


Рис.1 Графическое отображение данных при градуировке термопрофилемера

датчиком, было определено и реализовано пять способов:

- 1) Численно-графический режим, в котором в виде столбчатых диаграмм в автоматическом или заданном диапазоне шкалы отображаются мгновенные профили температуры на всех участках датчика и соответствующие им численные значения температуры с заданной точностью (Рис.2). При этом во время вывода на экран дисплея ПЭВМ существует возможность мгновенного переключения с параметра температуры, на численный контроль кодов, сопротивлений проводников, шумовых составляющих температуры и кодов всех участков и проводников распределенного датчика.
- 2) Режим временного графического отображения, когда значения измерения, когда значения измеренной температуры отоб-

ражаются графиками различных цветов на температурно-временной шкале, что позволяет увидеть изменчивость на каждом из участков (Рис.3).

- 3) Режим графического отображения в изолиниях температуры заданной шкалы, который посредством линейной интерполяции между соседними участками датчика для каждого профиля позволяет произвести прорисовку точек цветных изолиний. Здесь масштабирование участков может меняться от и до (Рис.4). Несмотря на то, что для каждого мгновенного профиля температуры интерполяция и прорисовка производится независимо, на экране дисплея изолинии имеют непрерывный непрерывающийся замкнутый характер, что является как контролем так и доказательством истин-

ности измерений температурных полей среды.

- 4) Режим графического отображения в виде наложения изолиний и скоростей позволяет одновременно наблюдать как изолинии температуры режима 3) так и области различных скоростей изменения температуры в среде, которые строятся по тому же алгоритму что и изолинии, но отображаются на экране дисплея как закрашенные в различные цвета по заданной шкале пятна (Рис.5).
- 5) Режим графического отображения скоростей смещений в пространстве позволяет в заданной шкале-цвете отобразить области пространственных скоростей в среде посредством предварительного неотображаемого на экране дисплея построения большого числа изолиний температуры и анализа их смещения в пространстве (Рис.6).
- 6) Режим позволяет рассчитать и отображать для измеряемого профиля температуры и заданного или параллельно измеряемого другими датчиками профиля солености изолинии плотности.

Во время работы любого из режимов кроме того существует возможность записи-дозаписи измерительных и вычисленных данных в файл с дальнейшим его преобразованием в текстовый выходной файл данных в формате пригодном для построения графиков и изолиний в таких пакетах как Grapher, Excel и др. Кроме того программа позволяет в послерабочем более наглядном масштабируемом графическом виде просмотреть ход изменения температуры во времени на любом из участков распределенного датчика или сопротивления заданного проводника. Вычисление производных при определении скоростей осуществляется по формуле численного дифференцирования по семи точкам :

$$V = \frac{x_3 - 9x_2 + 45x_1 - 45x_{-1} + 9x_{-2} - x_{-3}}{60 \cdot \Delta t}, \quad (1)$$

где V - производная (скорость) изменения температуры или смещения в пространстве для центральной точки x_0 ; x_i - значение параметра в точке i и Δt - временной интервал (период опроса датчика) измерения,

что исключает влияние на результат возможных высокочастотных шумов и сбоев. При интерполяционном расчете сопротивлений проводников датчика по кодам используются пять эталонов, значения которых лежат в диапазоне дрейфа в зависимости от температуры.

Программный пакет и реализованные в нем алгоритмы прошли проверку в реальных экспедиционных и лабораторных условиях. С помощью распределенно-модулированных датчиков - термопрофилемеров были собраны и обработаны уникальные измерительные данные по измерениям температуры в водной и воздушной средах. Полученные графики и изолинии позволили более полно оценить возможности термопрофилемеров для определения таких параметров морской среды как амплитуда и период внутренних волн, теплозапаса, вертикальных скоростей, поверхностного волнения и уровня раздела сред.

Пакет обладает своим графическим диалоговым интерфейсом и работает в операционных системах MS Dos и Windows. Некоторые режимы обработки и графического отображения измерительной информации требуют больших вычислительных ресурсов, поэтому режимы 3) - 6) в реальном масштабе времени измерений удовлетворительно без потерь кадров входной информации, поступающих с частотой до 1Гц, будут работать на ПЭВМ класса Pentium. Не смотря на это все базовые функции программы удовлетворительно исполняются на ПЭВМ 386SX-33 RAM 1Mb.

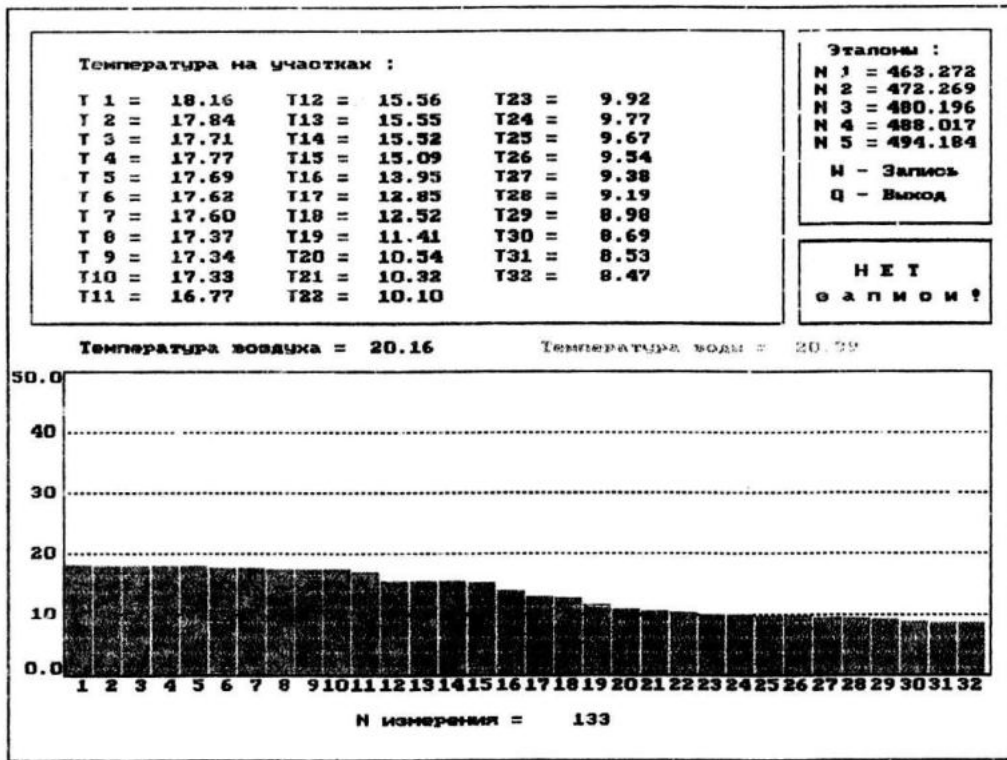


Рис.2 Численно-графический режим отображения измерительной информации мгновенных профилей температуры

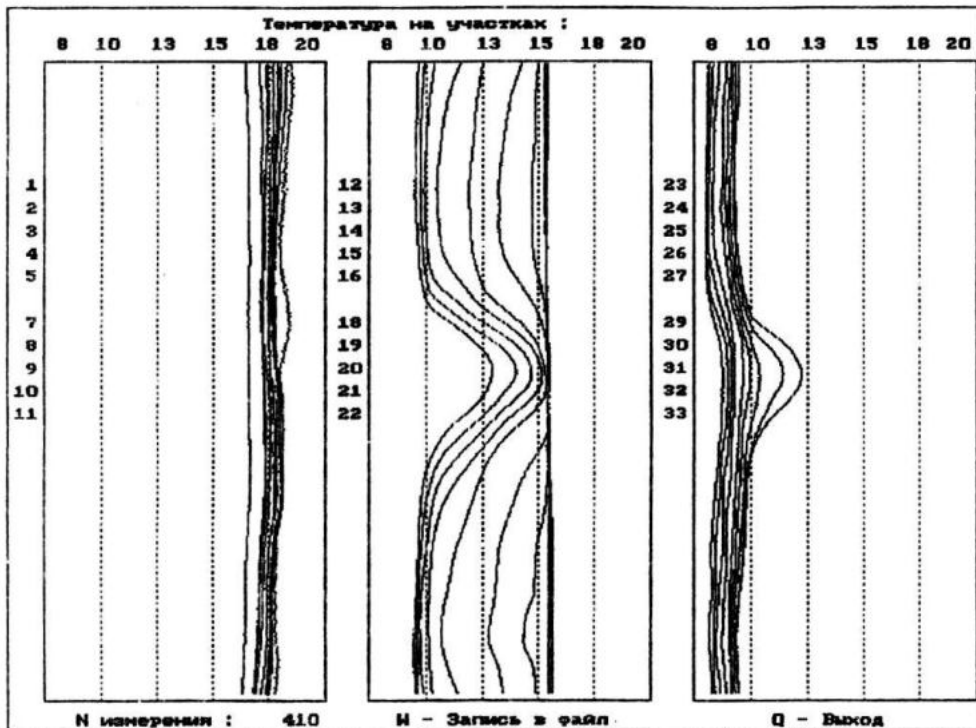


Рис.3 Режим отображения временного хода температуры на участках датчика

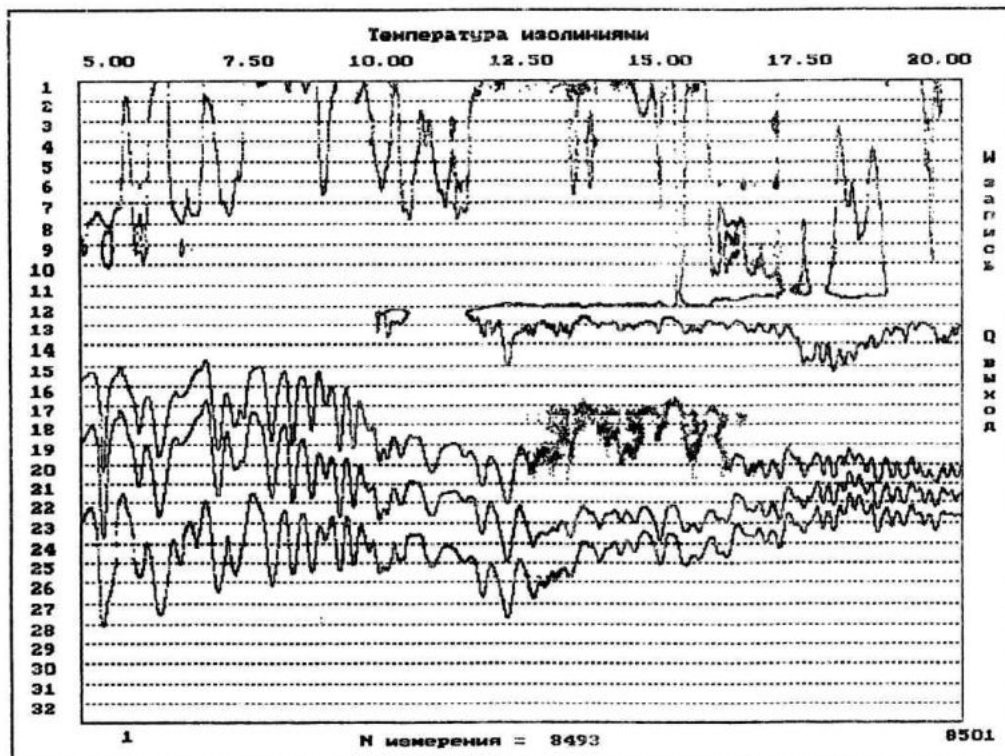


Рис.4 Режим отображения изолиний температуры

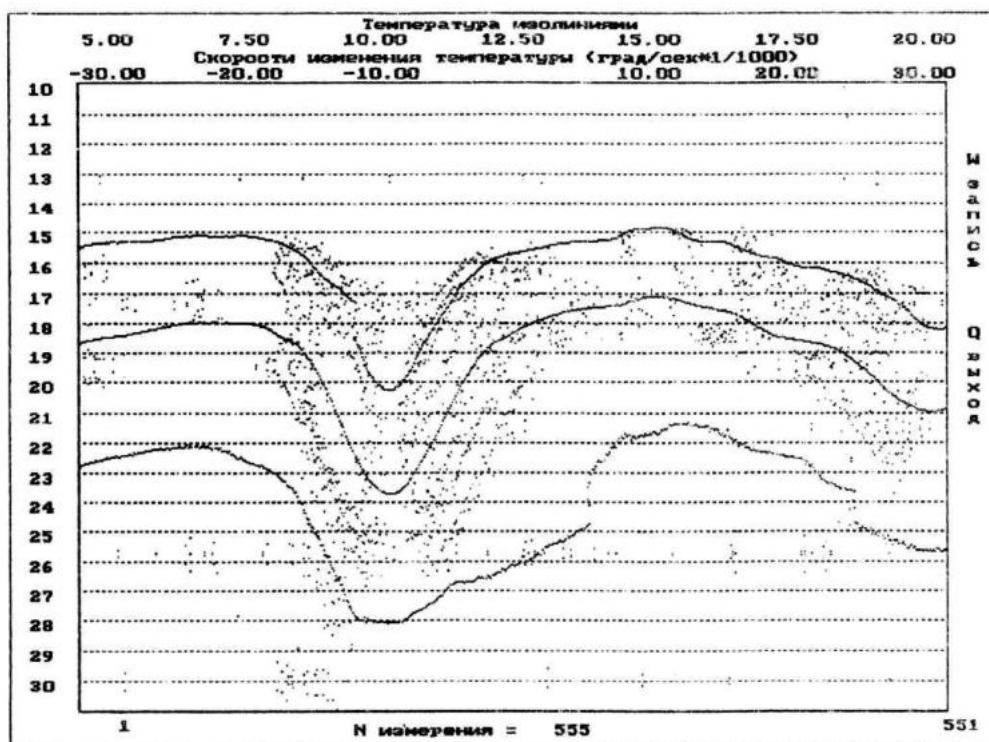


Рис.5 Режим отображения изолиний температуры и скоростей изменения температуры

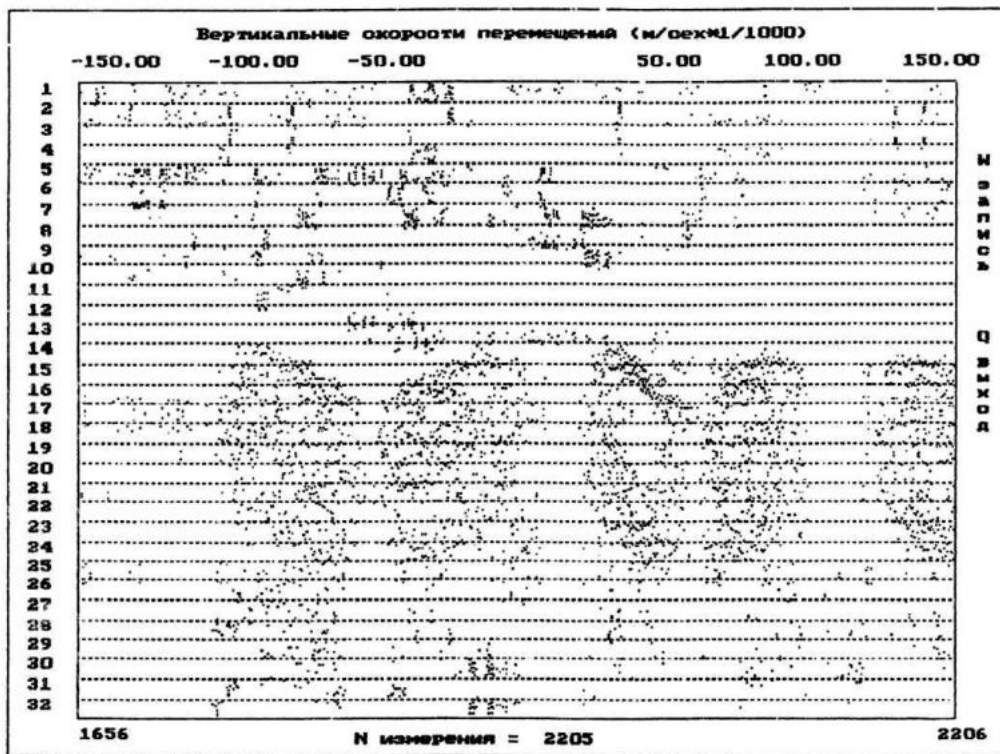


Рис.6 Режим отображения изолиний скоростей смещения изолиний температуры

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайский В.А., Егупов Н.Д., Корнюшин Ю.П. Применение функций Уолша в системах автоматизации научных исследований // -К.: Наукова думка, 1993.-210с.

2. Гайский В.А. Принципы построения распределенных профилиме-

ров температуры на базе разложений по ортогональным полиномам // Автоматизация научных исследований морей и океанов. Тезисы докл. 5-ой Всесоюзной школы. Севастополь, 1980.

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ФОНА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Афанасьев, Г.П. Мясоедов,
Я.Г. Шкурский

Севастопольский институт
ядерной энергии и промышленности.

В настоящее время усилилось внимание специалистов и широких слоев населения к измерениям уровня мощности дозы гамма-излучения на уровне естественного фона. Это, прежде всего, объясняется выходом в свет Закона Украины «О защите человека от воздействия ионизирующих излучений» от 14 января 1998 года [1] и Норм радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) [2]. Кроме того, население периодически будоражат слухи об аварии на той или иной АЭС, которые иногда даже вызывают панические настроения в городе. Все чаще имеют место обращения к специалистам кафедры Дозиметрии и РТК с просьбой об измерении уровня излучения в квартирах.

С какими же уровнями излучения приходится сталкиваться в этом случае? В соответствии с принятыми на Украине нормами [1], [2] допустимый уровень мощности дозы в жилых помещениях составляет 30 мкР/час для вновь строящихся зданий и 50 мкР/час для ранее построенных.

Многомесячные ежедневные измерения уровня мощности дозы естественного фона, выполняемые на кафедре Д и РТК СИЯЭиП с помощью стационарных лабораторных установок, показывает, что естествен-

ный фон в Севастополе изменяется в пределах от 3 мкР/час до 10 мкР/час со средним уровнем около 5 мкР/час. Таким образом, необходимо измерять мощность дозы, начиная с уровня 3 мкР/час.

Открытым остается вопрос о допустимой величине погрешности измерения мощности дозы. Этот вопрос не регламентируется указанными выше нормативными документами. Поэтому, очевидно, следует принять рекомендуемое в литературе [3] требования, согласно которому допустимая погрешность измерения определяется допустимой неопределенностью в величине ожидаемого радиационного эффекта воздействия излучения на людей. Рассчитанной в соответствии с этим требованием приемлемой погрешностью отдельного измерения можно считать $\pm 40\%$ [3].

Измерение уровней гамма-излучения на местности и в различных помещениях в большинстве случаев целесообразно измерять переносными приборами. Такими измерениями заняты целый ряд организаций: лаборатории внешней среды АЭС, лаборатории санитарно-эпидемиологической службы, метеослужбы. В случае аварии – подразделения МЧС. Они снабжены большим парком различных переносных дозиметрических приборов, разработанных, как правило, еще в советское время. Однако эти приборы не отвечают требованиям по диапазону и погрешностям измерения, чтобы с их помощью измерять мощность дозы на уровне естественного фона. Причина этого состоит в том, что попадание фотонов гамма-излучения в блоки детектирования приборов при малых уровнях мощности дозы носит статистический характер и необходимо довольно длительное время,

чтобы получить достоверное значение результата измерения.

Характеристики отечественных приборов, используемых для измерения мощности дозы, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Тип прибора	Нижняя граница диапазона измерения, мкР/час	Погрешность на уровне нижней границы, %	Время измерения, с
1. Комбинированный дозиметр – сигнализатор ДКС-1	100	± 124	100
2. Бета–гамма радиометр КРБГ-1	25	± 85	60
3. Гамма–дозиметр КДГ-1	100	± 38	60
4. Гамма–дозиметр ДРГ-05	36	± 150	100
5. Универсальный дозиметр–радиометр МКС-01р	36	± 25	100
6. Сцинтилляционный геологоразведочный прибор СРП-68	3	не нормирован	60

Из таблицы следует, что абсолютное большинство приборов не могут использоваться для измерения естественного фона. (Кроме устаревшего СРП-68, который может использоваться только при известном спектре γ -излучения). Тем не менее, эти приборы имеют возможности для измерения уровней естественного фона, если увеличить время измерения. Дело в том, что большинство из них при измерении на наиболее чувствительном диапазоне имеют звуковую (через

головные телефоны) или световую (через индикаторную лампочку) сигнализацию о каждом случае регистрации отдельного фотона. В технических описаниях этот режим – по счету числа регистраций – дается как индикаторный, в котором погрешность не определена и коэффициент пересчета тоже.

Однако этот режим – режим счета звуковых или световых сигналов, может быть использован для измерения малых уровней гамма-излучения с погрешностью не хуже $\pm 25\%$.

Дело в том, что в этом режиме измерители мощности дозы работают как радиометры. Нижняя же граница диапазона измерения при этом определяется минимальной достоверно измеряемой скоростью счета [4]:

$$n_{\min} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot n_{\phi} \cdot \delta^2 \cdot t_{\text{изм}}}}{2\delta^2 \cdot t_{\text{изм}}} \quad (1)$$

где n_{\min} - скорость счета при измерении мощности дозы, имп/с;

n_{ϕ} - собственный фон блока детектирования, имп/с;

δ - относительная статистическая погрешность, доли;

$t_{\text{изм}}$ - время измерения мощности дозы.

Нижняя граница диапазона измерения мощности дозы при этом будет :

$$P\gamma_{\min} = n_{\min} / \eta, \quad (2)$$

где η - чувствительность прибора, (имп/с) / (мкР/час).

Из формулы (1) следует, что уменьшить нижнюю границу диапазона измерения прибора можно, прежде всего

за счет увеличения времени измерения и, кроме того, за счет уменьшения собственного фона детектора или увеличения, в разумных пределах, допустимой погрешности измерения.

В связи с этим, на кафедре дозиметрии и радиационно-технологического контроля СИЯЭ и П разработана методика измерения низких уровней мощности дозы путем счета импульсов от блоков детектирования переносных приборов. Предварительно производится измерение собственного фона детектора при помещении блока детектирования в свинцовый домик с толщиной стенок не менее 50 мм. Счет импульсов при этом осуществляется с помощью пересчетной установки УСЦ-01, подключенной к гнездам предназначенных для головных телефонов. Погрешность излучения при этом выбирается $\pm 5\%$ (не менее 400 импульсов).

Затем определяется чувствительность прибора путем создания мощности дозы на уровне, на порядок превышающем уровень естественного фона от источника известной активности.

После того, исходя из формул (1) и (2) определяется время измерения данным прибором для уровней $\cong 5$ мкР/час при погрешности $\pm 25\%$ (именно до этого уровня погрешности справедлива формула (1)).

Результаты измерения, получают по формуле:

$$P\gamma = \frac{n - n_{\phi}}{\eta}, \quad (3)$$

Погрешность измерения определяется соотношением

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\text{изм}}^2 + \delta_{\phi}^2} \quad (4)$$

Скорость счета на уровне естественного фона не высока: около 5...10 импульсов в минуту и импульсы можно считать на слух. Однако время измерения может составлять 5...10 минут. Чтобы сделать процедуру счета импульсов более точной, на кафедре разработана схема подключения калькулятора к гнездам головных телефонов на приборах.

Таким образом, благодаря разработанной на кафедре Д и РТК СИЯЭиП методике появилась возможность измерения уровней естественного фона переносными приборами с достаточной точностью.

Следует также отметить, что введение в практику регулярного измерения естественного уровня естественного фона существующими приборами, приведет к повышению оперативности радиационного контроля за внешней средой и улучшению профессиональной выучки дозиметристов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Украины «О защите человека от воздействия ионизирующих излучений» от 14.01.98 г.
2. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97). Киев, МОЗ, 1997г.
3. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Энергоатомиздат, 1988 г.
4. Сборник методик по определению активности радионуклидов в объектах внешней среды и организма человека. – М.: Воениздат, 1980 г.

ОЦЕНКА СПЕКТРОВ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ КАНАЛОВ И СИГНАЛА ПРИ ГРУППОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Бабий В.И.

Морской гидрофизический институт НАН
Украины
99000 Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: ocean@alpha.mhi.iuf.net

Будем рассматривать групповые измерения как разновидность совокупных измерений однородных величин, а групповой измеритель как совокупность однотипных или разнотипных средств измерений (СИ), применяемых как единое целое. При этом объединенная структура может выполнять новые функции, не свойственные составляющим ее индивидуальным СИ.

Пусть групповой измеритель, структурная схема которого изображена на рис. 1, состоит из n одиночных СИ (измерительных каналов), на входы которых одновременно воздействует измеряемая величина $x(t)$, а на выходах имеем исправленные результаты измерений $x_i(t)$, представляющие собой ряды равнооточных или неравнооточных отсчетов, где t - время. Одиночные СИ, входящие в состав группового СИ, могут осуществлять, как прямые, так и косвенные измерения величины $x(t)$ и быть в свою очередь также многоканальными, например, при косвенных (СТД) и прямых измерениях скорости звука. Выходы одиночных СИ соединены с вычислительным устройством (ВУ), которое проводит математическую обработку измерительной информации с целью получения восстановленных значений величины $x(t)$ и оценок погрешности ее измерения. Возможны различные методы обработки этой информации: простейшее осреднение, оптимальная фильтрация, корреляционные методы и т.п. Ниже рассмотрен спектральный метод обработки и показана возможность оценки индивидуальных спектров

собственной инструментальной погрешности каждого канала группового СИ в процессе измерений.

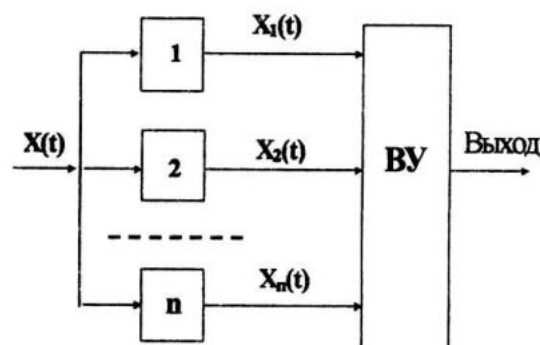


Рис. 1. Структурная схема группового измерителя.

1, 2, ..., n - измерительные каналы;
ВУ - вычислительное устройство.

В качестве оценки измеряемой величины на выходе группового СИ при неравнооточных отсчетах $x_i(t)$ принимают среднее взвешенное по ансамблю:

$$\langle x(t) \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i(t)}{\sum_{i=1}^n a_i}, \quad (1)$$

где a_i - веса, которые выбирают обратнопропорциональными выборочным дисперсиям.

В случае равнооточных отсчетов (идентичных измерительных каналов) выражение (1) переходит в

$$\langle x(t) \rangle = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i(t). \quad (2)$$

Предположим, что на выходе каждого измерительного канала имеем аддитивную смесь сигнала и шума

$$x_i(t) = \overline{x(t)} + \xi_i(t), \quad (3)$$

где $\overline{x(t)} = \overline{x(t)} + \overline{x'(t)}$, $\overline{x(t)}$ - среднее значение и $\overline{x'(t)}$ - флуктуации сигнала (отклонения от среднего), $\xi_i(t)$ - инструментальный (собственный) шум i -ого канала; черта сверху означает

осреднение по времени. Здесь $\overline{x'(t)} = 0$; $\overline{[x'(t)]^2} = \sigma_x^2$; $\overline{\xi_i(t)} = 0$; $\overline{\xi_i^2(t)} = \sigma_{\xi_i}^2$ - средние значения и дисперсии флуктуаций сигнала и шумов, которые подлежат экспериментальной оценке.

Метод групповых измерений основан на предположении статистической независимости собственных шумов (погрешностей) измерительных каналов, образующих групповое СИ, как друг от друга, так и от входного воздействия (сигнала), т.е. $\overline{\xi_i(t) \cdot \xi_j(t)} = 0$ при $i \neq j$ и $\overline{\xi_i(t) \cdot x'(t)} = 0$. Поэтому при групповых измерениях n независимыми каналами мощность суммарного сигнала увеличивается в n^2 раз, а мощность шума в n раз - как для когерентных и некогерентных составляющих. В результате отношение мощностей сигнал/шум на выходе группового СИ в единичном отсчете увеличивается в n раз, а выигрыш в точности (отношение амплитуд сигнал/шум) в \sqrt{n} по сравнению с одним каналом.

В силу статистической независимости слагаемых в (3) спектральные плотности мощности сигнала $S_x(f)$ и шума $S_{\xi_i}(f)$, также как и их дисперсии, на выходах измерительных каналов суммируются энергетически:

$$S_i(f) = S_x(f) + S_{\xi_i}(f), \quad (4)$$

$$\sigma_i^2 = \int_{f_1}^{f_2} S_i(f) df = \sigma_x^2 + \sigma_{\xi_i}^2, \quad (5)$$

где f - частота; f_1 и f_2 - нижняя и верхняя границы спектра (определяются продолжительностью наблюдений и частотой отсчетов при дискретизации).

Покажем, что в выражении (4) можно определить раздельно слагаемые $S_x(f)$ и $S_{\xi_i}(f)$. Для этого образуем ряды разностей синхронных отсчетов на выходах измерительных каналов:

$$\Delta x_{ij}(t) = x_i(t) - x_j(t) = \xi_i(t) - \xi_j(t), \quad (6)$$

где $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq n$, $i \neq j$. Наибольшее число рядов разностей равно числу сочетаний из n по 2.

Дисперсии разностных рядов (6) с учетом их статистической независимости имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta ij}^2 &= \overline{[\xi_i(t) - \xi_j(t)]^2} = \\ &= \overline{\xi_i^2(t)} - 2\overline{\xi_i(t) \cdot \xi_j(t)} + \overline{\xi_j^2(t)} = \\ &= \sigma_{\xi_i}^2 + \sigma_{\xi_j}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Известно, что энергетический спектр суммы (разности) двух статистически независимых случайных процессов $\xi_i(t)$ и $\xi_j(t)$ равен сумме энергетических спектров этих процессов [1]. Соответственно, индивидуальные спектры инструментальной погрешности каждого канала группового СИ связаны системой неоднородных линейных алгебраических уравнений:

$$S_{\Delta ij}(f) = S_{\xi_i}(f) + S_{\xi_j}(f), \quad (8)$$

где $S_{\Delta ij}(f)$ - спектры рядов разностей (6).

Например, для $n=3$ запишем

$$\begin{aligned} S_{\Delta 12}(f) &= S_{\xi_1}(f) + S_{\xi_2}(f) \\ S_{\Delta 13}(f) &= S_{\xi_1}(f) + S_{\xi_3}(f) \\ S_{\Delta 23}(f) &= S_{\xi_2}(f) + S_{\xi_3}(f). \end{aligned} \quad (9)$$

Откуда находим индивидуальные спектры собственных случайных погрешностей всех трех каналов

$$\begin{aligned} S_{\xi_1}(f) &= \frac{1}{2}[S_{\Delta 12}(f) + S_{\Delta 13}(f) - S_{\Delta 23}(f)] \\ S_{\xi_2}(f) &= \frac{1}{2}[S_{\Delta 12}(f) + S_{\Delta 23}(f) - S_{\Delta 13}(f)] \\ S_{\xi_3}(f) &= \frac{1}{2}[S_{\Delta 13}(f) + S_{\Delta 23}(f) - S_{\Delta 12}(f)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Восстановленные спектры сигнала (без спектров шумов) на выходе каждо-

го канала получим из (4) и (10) в виде

$$S_x(f) = S_i(f) - S_{\xi_i}(f), \quad i=1,2,3, \quad (11)$$

а восстановленный результирующий (т.е. осредненный по ансамблю) спектр сигнала будет

$$\langle S_x(f) \rangle = \frac{1}{3} [S_1(f) + S_2(f) + S_3(f)] - \frac{1}{6} [S_{\Delta 12}(f) + S_{\Delta 13}(f) + S_{\Delta 23}(f)], \quad (12)$$

где все спектры в правой части равенства рассчитываем по реализациям $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ и их разностям. Подобным же способом находим индивидуальные спектры собственных шумов и сигналов на выходах всех измерительных каналов при $n > 3$.

Рассмотрим случай $n=2$. Это минимальное число каналов в групповом СИ. Разностный ряд (6) всего один и по нему возможна только оценка сверху спектров собственных шумов каналов. Чтобы определить индивидуальные спектры $S_{\xi_1}(f)$ и $S_{\xi_2}(f)$ составим систему уравнений, привлекая кроме спектра разности $S_{\Delta 12}(f)$ еще и автоспектры $S_1(f)$, $S_2(f)$ реализаций $x_1(t)$ и $x_2(t)$,

$$\begin{aligned} S_1(f) &= S_x(f) + S_{\xi_1}(f) \\ S_2(f) &= S_x(f) + S_{\xi_2}(f) \\ S_{\Delta 12}(f) &= S_{\xi_1}(f) - S_{\xi_2}(f), \end{aligned} \quad (13)$$

откуда следует

$$\begin{aligned} S_{\xi_1}(f) &= \frac{1}{2} [S_1(f) + S_{\Delta 12}(f) - S_2(f)] \\ S_{\xi_2}(f) &= \frac{1}{2} [S_2(f) + S_{\Delta 12}(f) - S_1(f)] \\ \langle S_x(f) \rangle &= \frac{1}{2} [S_1(f) + S_2(f) - S_{\Delta 12}(f)], \end{aligned} \quad (14)$$

где $\langle S_x(f) \rangle$ - восстановленный результирующий спектр сигнала на выходе группового СИ при $n=2$.

В общем случае (при $n > 1$) восстановленный результирующий спектр

сигнала на выходе группового СИ имеет вид

$$\langle S_x(f) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [S_i(f) - S_{\xi_i}(f)], \quad (15)$$

где

$$\langle S_{\xi_i}(f) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{\xi_i}(f) \quad (16)$$

есть результирующий спектр собственных шумов группового измерителя.

Зависимости, аналогичные (8)-(16), согласно (5) получаем также для дисперсий, например, сигнала

$$\langle \sigma_x^2 \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\sigma_i^2 - \sigma_{\xi_i}^2] \quad (17)$$

и собственных шумов каналов

$$\sigma_{\xi_i}^2 = \sigma_i^2 - \langle \sigma_x^2 \rangle.$$

По выборочным дисперсиям шумов $\sigma_{\xi_i}^2$ определяем веса в (1). Заметим, что спектральные зависимости (8)-(16) посредством Фурье-преобразований трансформируются в корреляционные и структурные функции, например, для сигнала:

$$\langle B_x(\tau) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [B_i(\tau) - B_{\xi_i}(\tau)], \quad (18)$$

$$\langle D_x(\tau) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [D_i(\tau) - D_{\xi_i}(\tau)]. \quad (19)$$

Выражения (12), (15)-(17) соответствуют варианту математической обработки информации в ВУ, когда сначала вычисляем статистические характеристики, например, спектры реализаций $x_i(t)$ для каждого канала, а затем их суммируем и вводим поправки на собственные шумы. При таком методе обработки не используется свойство когерентности сигнала и не получается соответствующий выигрыш в точности (отношении сигнал/шум).

Другой вариант обработки информации (причем более простой) заключается в том, что сначала реализации

$x_i(t)$ суммируем, а затем находим статистические характеристики, например, спектр этой суммы:

$$S_{\Sigma}(f) = n^2 \cdot S_x(f) + \sum_{i=1}^n S_{\xi_i}(f), \quad (20)$$

откуда следует

$$\tilde{S}_x(f) = \frac{1}{n^2} \cdot [S_{\Sigma}(f) - \sum_{i=1}^n S_{\xi_i}(f)], \quad (21)$$

В отличие от (16) обобщенный спектр собственных шумов, приведенных ко входу группового СИ, в случае суммирования рядов $x_i(t)$ имеет вид:

$$S_{\xi\Sigma}(f) = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{i=1}^n S_{\xi_i}(f), \quad (22)$$

а частотная зависимость (спектр) отношения мощности сигнал/шум будет:

$$F(f) = \frac{\tilde{S}_x(f)}{S_{\xi\Sigma}(f)} = \frac{n^2 \tilde{S}_x(f)}{\sum_{i=1}^n S_{\xi_i}(f)}, \quad (23)$$

т.е. получаем выигрыш в n раз.

Абсолютная погрешность измерения групповым СИ есть

$$\Delta X(t) = \langle X(t) \rangle - X(t), \quad (24)$$

дисперсия этой погрешности

$$\overline{[\Delta X(t)]^2} = \sigma_{\xi\Sigma}^2 = \int_{f_1}^{f_2} S_{\xi\Sigma}(f) df, \quad (25)$$

соответственно, точность группового СИ будет

$$A = \frac{X(t)}{\sigma_{\xi\Sigma}} \approx \frac{\sum_{i=1}^n x_i(t)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{\xi_i}^2}}, \quad (26)$$

и получаем выигрыш точности \sqrt{n} .

Выражения (21)-(23) характеризуют предельную разрешающую способность и точность группового СИ при исследовании спектров случайных процессов. На практике погрешность оценки спектральных плотностей определяется еще и выборочными флуктуациями и по-

грешностями перекрытия спектров. Эти обстоятельства надо учитывать, в частности, при частотной коррекции и динамических измерениях. Из выражений (11),(15),(21) следует, что восстановленные на выходах каналов и на выходе группового измерителя спектры сигналов (а также их дисперсии, корреляционные и структурные функции) инвариантны к собственным случайным шумам с точностью, определяемой выборочными флуктуациями. Таким образом групповой измеритель позволяет на основе принципа многоканальности реализовать структурно-алгоритмический метод достижения инвариантности этих статистических характеристик по отношению к собственным шумам каналов (которые можно условно отнести к внутренним влияющим факторам) наряду с их инвариантностью к внешним влияющим факторам [2].

За счет структурной и информационной избыточности групповые СИ могут повысить надежность и точность результатов в случае, когда исчерпаны дальнейшие возможности совершенствования индивидуальных СИ.

При разработке групповых СИ на базе встроенных микропроцессоров возможно совмещение функций предварительной математической обработки информации индивидуальных каналов и совместной обработки. При этом основные потоки измерительной информации будут протекать в самом групповом СИ, тогда как на его выходе поток информации практически не увеличится.

Минимизировать усложнение аппаратуры можно, оставляя в составе каждого измерительного канала только элементы и узлы, ответственные за прогрессирующую погрешность (например, первичные измерительные преобразователи), а промежуточные измерительные преобразователи и встроенные меры, как более стабильные узлы, могут быть общими.

Преимущество групповых СИ по сравнению с одиночными состоит в существенном снижении требований к постоянству испытательного сигнала при измерении спектров собственных шумов каналов. Более того, для группового СИ случайная компонента входного сигнала полезна, поскольку при $\sigma_x^2 > \sigma_{\xi_i}^2$ естественным образом происходит внешняя рандомизация, при которой в погрешности каналов и в результирующую погрешность СИ (и в ее спектр) войдут шумовые составляющие от гистерезиса и квантования, что отвечает реальным условиям измерений.

Главное достоинство групповых СИ заключается в принципиальной возможности одновременно с проведением измерений осуществлять непрерывный текущий контроль собственных инструментальных шумов каждого канала и измерителя в целом. Текущие индивидуальные спектры инструментальной погрешности и статистические параметры разностных рядов, характеризующие прогрессирующую (дрейфовую) составляющую погрешности каждого канала, позволяют контролировать и прогнозировать время наступления метрологического отказа, корректировать и оптимизировать межповерочные интервалы, оперативно принимая объективные решения о необходимости проведения очередной калибровки (градуировки). Поэтому в современных автоматизированных гидрофизических прецизионных измерительных комплексах для

повышения метрологической надежности, качества и достоверности результатов представляется целесообразным иметь не менее трех идентичных независимых каналов каждой прямо измеряемой величины. Примером такого технического решения может служить групповой ($n=3$) измеритель гидростатического давления (глубины) в перспективном гидрологическом зонде ИСТОК-8 [3,4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Заездный А.М. Основы расчетов по статистической радиотехнике. -М.: Связь, 1969.-447 с.
2. Бабий В.И. Принципы построения инвариантных гидрофизических измерителей скорости звука. - В кн.: Системы контроля окружающей среды. Сб. научных трудов.-Севастополь, 1999. с. 70-79.
3. Бабий В.И., Бабий М.В. Измеритель гидростатического давления с алгоритмической термокомпенсацией. - Морское и экологическое приборостроение. Международный научно-технический семинар. Сб. трудов.-Севастополь,1995. с.18.
4. STD - зонд гидрологический ИСТОК-8. Эскизный проект. Технический проект. Рт1.570.057 ПЗ. Севастополь, 1992.

**СПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ
ОСНОВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ
ИЗМЕРИТЕЛЕЙ**

Бабий В.И.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
99000 Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: ocean@alfa.mhi.iuf.net

Представим общую математическую модель гидрофизического средства измерений (СИ) совокупностью отдельных черных ящиков, формально описывающих функционально законченные блоки (узлы): первичные и промежуточные измерительные преобразователи, встроенные меры ограниченной точности, кодеры и декодеры, линии связи и т.п. Эти черные ящики имеют свои входы и выходы и объединены между собой в единое СИ в соответствии с его структурной схемой (так называемые К-сети).

Пусть СИ имеет n таких функциональных блоков. Тогда статистические свойства погрешности СИ характеризуется квадратная (n, n) спектральная матрица

$$\|S_{ij}(f)\|, \quad (1)$$

где элементы матрицы при $i=j$ есть автоспектры, а при $i \neq j$ - взаимные спектры погрешностей блоков. Полагая в нормальных условиях отсутствие корреляции между собственными случайными погрешностями разных блоков, получим спектр результирующей погрешности СИ в виде суммы элементов главной диагонали (след) матрицы (1)

$$S(f) = \text{spur} \|S_{ij}(f)\| = \sum S_i(f). \quad (2)$$

Следовательно, результирующий спектр основной погрешности СИ является суммой приведенных ко входу автоспектров основных погрешностей каждого из составляющих его блоков. Спектры $S_i(f)$ могут быть любые. Удобной моделью спектра погрешности отдельного i -ого блока СИ является его

аппроксимация суммой степенных функций

$$S_i(f) = \sum a_{ir} \cdot f^{k_r} \quad (3)$$

где r - целые числа, k_r - показатели степени. Поскольку современные гидрофизические СИ представляют собой сложные электронно-механические устройства, им свойственны шумы, носящие универсальный характер [1-3]: молекулярные тепловые, дробовые, квантования и т.п., имеющие природу белого шума, относящиеся преимущественно к электронной части СИ, и розовый или фликкер-шум [4], обусловленный механическими узлами СИ (датчики, встроенные меры и т.п.), определяющими дрейфовую составляющую погрешности. Следовательно, можно ограничиться в (3) суммой только этих двух спектров: белого шума ($k_1=0$) и фликкер-шума ($k_2=-1$). Тогда при $a_{i1}=S_{i0}$ имеем

$$S_i(f) = S_{i0} + a_i/f. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2) получим обобщенный (результатирующий) спектр основной погрешности СИ

$$S(f) = \sum_{i=1}^n S_{i0} + \frac{1}{f} \sum_{i=1}^n a_i = S_0 + \frac{a_p}{f} = S_0 \cdot \left(1 + \frac{f_p}{f}\right), \quad (5)$$

где S_0 и a_p/f - соответственно приведенные ко входу суммы спектральных плотностей мощности белого шума и фликкер-шума всех блоков СИ; f_p - частота перехода (раздела) спектра $S(f)$, на которой суммарные спектральные плотности мощности белого шума и фликкер-шума равны: $S_0 = a_p/f_p$.

Отношение $S_i(f)/S(f)$ из (4) и (5) позволяет оценить вклад каждого из составляющих СИ функциональных блоков в результирующий спектр основной погрешности. Например, в импульсном время-пролетном гидрофизическом измерителе скорости звука погрешность измерения интервалов времени в электронном блоке обусловлена преимущественно шумами квантования

(белый шум), а дрейфовая составляющая погрешности ($1/f$ -шум) - нестабильностью эффективной длины акустической базы датчика. Аналогичные особенности характерны и для каналов измерения температуры, электропроводности и гидростатического давления в гидрологических СТД-зондах.

Выражение

$$S(f) = S_0 \cdot (1 + f_p/f) \quad (6)$$

и есть спектральная модель основной погрешности СИ. Нормированный спектр $S(f)/S_0 = 1 + f_p/f$ представлен на рис. 1.

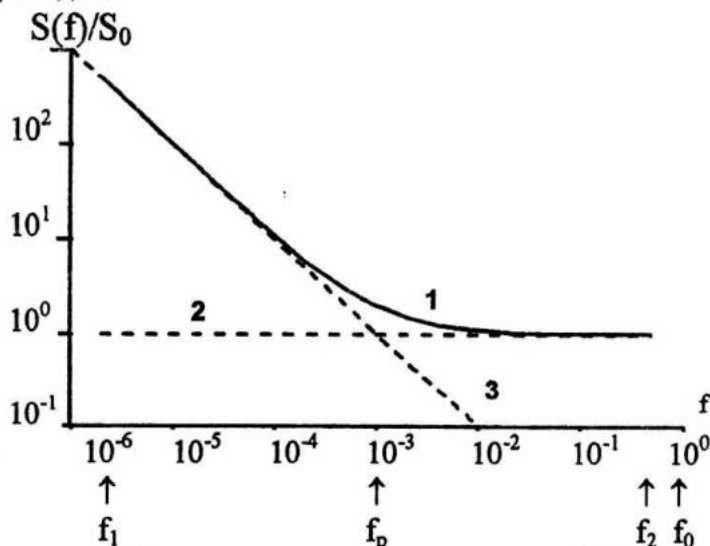


Рис. 1. Нормированный спектр основной погрешности СИ (модель) - 1; 2 - спектр белого шума; 3 - спектр фликкер-шума.

В реальных СИ спектр $S(f)$ ограничен со стороны высоких частот полосой пропускания измерительного тракта (до аналого-цифрового преобразователя), имеющей частоту среза $f_2 \leq f_0/2$, где f_0 - частота отсчетов; а со стороны низких - частотой $f_1 = 1/T_N$, где T_N - продолжительность наблюдений. Введем параметр $m = f_0/f_p$. В зависимости от m в спектре может преобладать либо фликкер-шум, либо белый шум. Один из способов оценки параметров S_0 и f_p модели спектра (6) состоит в аппроксимации этой зависимостью методом наименьших квадратов экспериментально полученных спектров основной погрешности СИ. В реальных СИ частота f_p может находиться приблизительно в диапазоне от 10^{-3} до 1 Гц.

На основе достаточно общих физических соображений статическую инструментальную погрешность СИ можно представить суммой

$$\Delta[X_0, t] = \Delta_0(X_0) + \Delta_1(X_0, t) + \Delta_2(X_0, t), \quad (7)$$

где $\Delta_0(X_0)$ - постоянная величина, которая соответствует неисключенным остаткам систематической составляющей основной погрешности в окрестности точки X_0 шкалы; $\Delta_1(X_0, t)$ - широкополосный стационарный случайный процесс с нулевым средним (центрированный) и постоянной спектральной плотностью мощности (белый шум); $\Delta_2(X_0, t)$ - нестационарный случайный процесс со спектром мощности вида $1/f$ (розовый шум), где f - частота, который описывает прогрессирующую погрешность. Такое деление основной погрешности является условным и проводится для упрощения анализа и интерпретации. В действительности все три составляющие проявляются совместно и образуют единый нестационарный случайный процесс.

Экспериментально определяемый спектр (6) есть текущий спектр [5] слу-

чайного процесса (7), вычисленный по конечной реализации продолжительностью T_N , начало которой соответствует моменту t_0 при выпуске СИ после его метрологической аттестации. В момент t_0 последнее (третье) слагаемое в (7) равно нулю, $\Delta_2(X_0, t_0) = 0$ и погрешность СИ определится первым и вторым членами, характеристики которых сохраняются неизменными в течение всего интервала T_N . Старение (деградация) СИ идет непрерывно, начиная с момента t_0 . Сначала фликкер-шум не превышает белого шума, который маскирует эффект старения. Однако, по прошествии времени $t_p > 1/f_p$ прогрессирующая составляющая погрешности начинает преобладать и постепенно старение СИ приводит к метрологическим (скрытым) отказам. Таким образом $1/f$ -шум принципиально ограничивает точность СИ в области низких частот.

Обобщенный спектр (6) связывает между собой основные метрологиче-

ские характеристики СИ - точность (погрешность), быстродействие и стабильность (нестабильность). Стабильность как инвариантность метрологических характеристик во времени является внутренним свойством СИ и основой для нормирования показателей точности и метрологической надежности, например, для обоснованного назначения межповерочных интервалов. Высоочастотный участок спектра (белый шум) описывает кратковременную стабильность и характеризует пороговую чувствительность (предельную разрешающую способность) [3], а низкочастотная часть, соответствующая фликкер-шуму, долговременную стабильность [2].

Располагая спектром (6) можно найти эволюцию погрешности во времени. Среднее квадратическое отклонение (СКО) погрешности СИ за период от t_0 до $t_0 + T_N$, будет

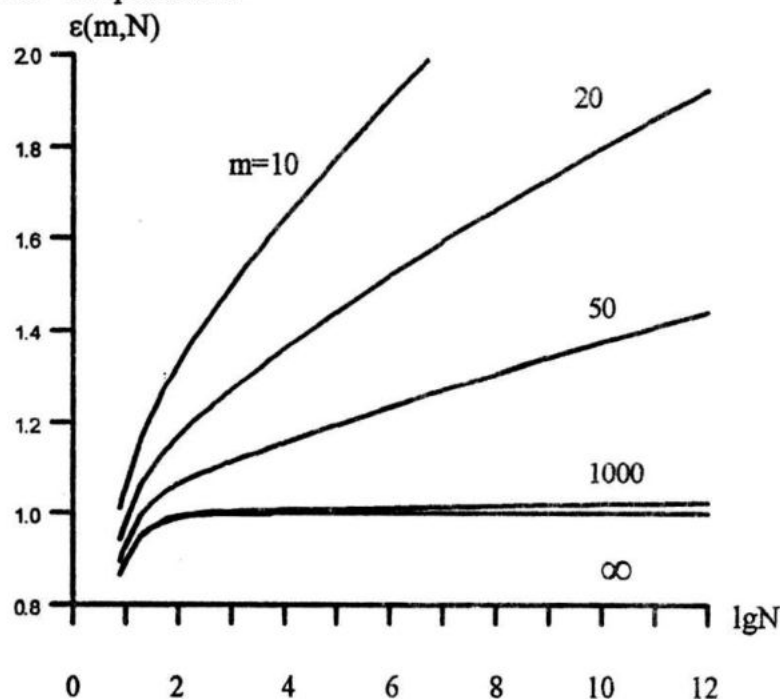


Рис.2. Эволюция нормированной основной погрешности СИ в зависимости от параметра m .

$$\sigma(T_N) = \left[\int_{f_1}^{f_2} S(f) df \right]^{1/2} = \left[S_0 \int_{1/T_N}^{f_0/2} (1 + f_p/f) df \right]^{1/2} \quad (8)$$

Вычислив относительную погрешность $\gamma(T_N) = \sigma(T_N) / X_0$ можно, например, назначить класс точности СИ для заданного T_N , если при этом под T_N подразумевать межповерочный интервал. В инвариантном во времени СИ $m > N$, где $N = T_N \cdot f_0$, и выражение (6) описывает спектр белого шума, для которого СКО

$$\sigma_0 = [S_0 \cdot (f_0/2 - f_1)]^{1/2} \approx [S_0 \cdot f_0/2]^{1/2} \quad (9)$$

Введем безразмерный параметр качества СИ в виде отношения СКО погрешности реального СИ к СКО инвариантного во времени: $\epsilon(m, N) = \sigma(m, N) / \sigma_0 = [1 - 2/N + (2/m) \ln(N/2)]^{1/2}$. (10)

Зависимость (10) представлена на рис.2. Величина $\epsilon(m, N)$ показывает во сколько раз при заданных m и N средняя квадратическая погрешность реального СИ больше погрешности инвариантного во времени. Вид этой зависимости практически совпадает с зависимостью $\gamma(T_N)$.

В инвариантном во времени СИ третье слагаемое в (7) пренебрежимо мало по сравнению со вторым слагаемым в течение всего срока жизни СИ, например, на рис.2 этому соответствуют зависимости при $m > 10^3$. Так, если $f_0 = 10$ Гц, а срок эксплуатации $T_N = 10$ лет, то при $m > 10^3$ СИ может выполнить $N = T_N \cdot f_0 \approx 3 \cdot 10^9$ гарантированных равноточных отсчетов за весь срок службы. При этом должно выполняться условие

$$T_{я} > T_M > T_N,$$

где $T_{я}$ - среднее время наработки до явного отказа, T_M - среднее время наработки до скрытого (метрологического) отказа.

Поскольку современные СИ являются аналого-цифровыми устройствами, то должно выполняться условие относительной малости вклада шумов квантования так, чтобы они существенно не ограничивали пороговую чувствительность и разрешающую способность, т.е.

$$S(f_2) \geq S_0 > S_k \approx \Delta_k^2 / 6f_0,$$

где Δ_k - шаг квантования.

Рассмотренная выше спектральная модель основной погрешности позволяет в метрологическом аспекте достаточно полно оценить качество и совершенство гидрофизических СИ четырьмя параметрами:

- неисключенной систематической погрешностью (НСП) Δ_0 ;
- частотой отсчетов f_0 ;
- спектральной плотностью мощности случайной погрешности на частоте Найквиста $S(f_0/2)$;
- частотой перехода (раздела спектра) f_p или отношением f_0 / f_p .

ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов М.Н., Фридман А.Е., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. - Л.: Лениздат, 1987. - 295 с.
2. Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. Динамика погрешностей средств измерений. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. - 192 с.
3. Бабий В.И. О пределе чувствительности измерений температуры морской среды - В кн.: Морские гидрофизические исследования, N3(49). Севастополь, 1970, с.113-129.
4. Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследованиях 1/f шума. - Успехи физических наук, т.141, вып.1, 1983. с.151-176.
5. Харкевич А.А. Спектры и анализ. - М.: ГИТТЛ, 1957. - 236 с.

МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.А. Абдулаев

НПП "Диатекс"

99005, г.Севастополь, ул. Ленина, 38

E – mail: Abdulaev@transcon.bizland.com

Результаты исследования свойств реальных различных объектов, сигналов, шумов упорядочиваются и формализуются в создании математической модели исследуемого явления. Любая модель признана отражать лишь одно или несколько определенных свойств данного явления и всегда содержит ограниченную информацию о нем. По мере расширения знаний об исследуемой стороне явления модель совершенствуется, усложняется. Другие стороны модели описываются другими моделями, которые могут быть, и не связаны между собой.

Различают детерминированные и вероятностные модели. Более общая - вероятностная модель, отражающая, как устойчивые свойства, так и случайный характер наблюдаемого явления. Последнее возникает всякий раз, когда данное явление определяется множеством факторов, причин, условий. Тогда и нецелесообразно и невозможно оценить действие каждого отдельного фактора, а необходимо устанавливать более общие - вероятностные законы явления.

Можно выделить следующие классы явлений, по степени содержания случайных факторов:

- 1) полностью случайные, определенные множеством однородных факторов;
- 2) с преобладанием одного или нескольких сильных факторов и множеством слабых однородных факторов;
- 3) описываемые квазидетерминированными функциями, т.е. регулярными функциями, некоторые параметры которых представляются случайны-

ми, если они не оказывают влияния на результат, или неизвестны исследователю.

В первом случае только вероятностное описание способно дать характеристику общих закономерностей явления. Детерминированный подход возможен лишь при абстрактных рассуждениях (задав начальные условия движения бесконечно большого числа частиц, можно в принципе предсказать их движение), но практически сделать невозможно.

Во втором случае на первых стадиях изучения явления можно пользоваться детерминированными методами, но по мере повышения точности описания, измерения, представления явления, неизбежен переход к использованию вероятностных моделей.

В третьем случае вероятностная модель необходима лишь при решении некоторых задач, например, для отражения того факта, что определенные параметры сигнала неизвестны до проведения опыта, а полученные в ходе отдельных опытов значения его называются случайной величиной. Так, если на стороне передачи известны амплитуда, частота и начальная фаза периодического сигнала, то на стороне приёма один или несколько параметров сигнала обязательно неизвестны (ибо смысл передачи сообщений в том и состоит, чтобы с помощью сигнала сообщить неизвестное). Тогда факт неизвестности параметра сигнала, например фазы, отражают введением вероятностного описания его, что и позволяет количественно оценить качество обнаружения или измерения свойств слабого сигнала на фоне шумов. Из свойств рассмотренных случайных явлений следует, что детерминированная модель представляет собой частный, вырожденный случай вероятностной модели.

Рассмотрим свойства вероятностных моделей. Наиболее общий способ представления случайного явления - описание его с помощью случайной функ-

ции, полностью характеризуемой *n*-мерной плотностью вероятности или бесконечной последовательностью обобщенных корреляционных или иных характеризующих функций. Таким образом, случайная функция, случайный процесс (ансамбль реализаций, на котором задана вероятностная мера) представляет собой абстракцию - обобщенную вероятностную модель случайного явления.

Недостаток такого обобщенного вероятностного описания, особенно существенный при экспериментальных исследованиях, состоит в необходимости определения бесконечно большого числа характеристик сложного случайного явления, описываемого нестационарной негауссовской многомерной плотностью вероятности. Поэтому разрабатывают конкретные (частные) вероятностные модели, в которых сложный случайный процесс представляют состоящим из конечного числа простых элементов - случайных и детерминированных функций, определенным образом связанных между собой. При таком описании случайный процесс может быть охарактеризован конечным числом функций и параметров. Это свойство чрезвычайно ценно для практики, что и определяет важность задачи создания конкретных моделей случайных физических явлений. По мере расширения объема знаний об исследуемом объекте, явлении сформулированная вначале простая формальная модель совершенствуется, заменяется более информативной структурной моделью.

В теории измерений рассматривают иерархию моделей различного уровня. По степени точности описания явлений различают: идеальную модель, дающую истинное, полное, исчерпывающее вероятностное описание явлений, чего практически достигнуть невозможно, и рабочую модель, дающую частичное, но доступное исследователю описание явления, достаточно точное для решаемой задачи. Анализ результатов, полу-

чаемых с привлечением вероятностных моделей различного вида, и сравнение результатов, найденных с помощью рабочих моделей, позволяют теоретически оценить погрешность измерений, разделить их на отдельные составляющие, выявить причины их возникновения.

В практике статистических измерений использование статистических моделей играет более простую роль: перед проведением измерений экспериментатор на основании имеющегося опыта выбирает одну-две конкретные (априорные) модели исследуемого явления, откуда следует перечень статистических характеристик, функций или параметров, которые необходимо измерить. Далее экспериментатор определяет метод измерения для каждой из требуемых статистических характеристик соответственно поставленной задаче. В результате измерений подтверждается выбор одной из априорных моделей, которая теперь уже становится апостериорной моделью процесса для данной постановки задачи.

Отметим еще раз, что одно и то же физическое явление, в зависимости от условий задачи, может быть описано различными моделями. И вероятностные модели не являются исключением из этого правила. Приводимые в [4] вероятностные модели показывают, что одна и та же осциллограмма процесса, трактуемая как реализация процесса, может быть описана различными вероятностными моделями - случайными процессами различного класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков А.К. Статистические измерения в судовой акустике. - Л.: Судостроение, 1985. - 272 с.

**МЕТОДЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ
СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**

В.А. Абдулаев

НПП "Диатекс"

99005, г. Севастополь, ул. Ленина, 38

E-mail: Abdulaev@transcon.bizland.com

Можно представить следующие две конкретные цели измерения статистических характеристик реальных процессов и полей:

- 1) определение характеристик процессов, действующих на входе и выходе конкретного устройства, с целью описания его как канала связи;
- 2) получение характеристик процесса или поля, генерируемых (излучаемых) конкретной системой, устройством.

В первом случае измерения выполняются, как правило, в широком диапазоне, соответствующем рабочему диапазону частот исследуемой системы. Во втором - необходимо получить такой статистических характеристик процесса, чтобы их можно было использовать при оценке различных систем, работающих в различных диапазонах частот под воздействием процесса, генерируемого исследуемой

системой. С этой целью предлагается измерять комплекс характеристик в смежных полосах частот, что позволяет получить сглаженную частотную зависимость выбранной статистической характеристики:

$$Q(\omega) = Q \left[\int_{-\infty}^{\infty} \xi(t') h_{\phi}(t-t') dt' \right],$$

где Q - оператор определения статистической характеристики;

$$h_{\phi}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{\phi}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega - \text{импульсная}$$

характеристика фильтра с частотной характеристикой $K_{\phi}(\omega)$, полосой пропускания $\Delta\omega$ и средней частотой ω_0 .

Поясним предложенный принцип измерения частотных свойств статистических характеристик. Известно, что спектр процесса характеризует распределение энергии колебаний по частоте, практически - распределение по частоте дисперсии колебаний в смежных полосах частот. Подобно распределению дисперсии, целесообразно характеризовать таким же образом распределение по частоте кумулянтов высших порядков, коэффициентов модуляции, коэффициентов взаимной корреляции двух процессов и т.п., определяемых в смежных полосах частот. Формирование такой зависимости от частоты, как будет показано ниже, может быть обусловлено как физикой образования процесса, так и суммированием про-

цессов различной физической природы, обладающих различными спектрами и статистическими характеристиками, возможно, и не зависящими от частоты. Частотная зависимость статистической характеристики позволяет различать процессы по виду этой зависимости, например, при диагностике состояния исследуемой системы или выявлении источника данного процесса. При необходимости по данным частотной зависимости может быть определена статистическая характеристика в любом широком диапазоне частот. Рассмотрим в общей постановке вопрос.

Пусть процесс фильтруется идеальными полосовыми фильтрами и в каждой полосе частот характеризуется статистической характеристикой $Q(\omega_i)$. Тогда аналогичная характеристика в широкой полосе частот может быть найдена как характеристика Q суммы некоррелированных процессов ξ_i . Для линейного оператора

$$Q = Q \left[\sum_{i=N}^{N+n} \xi_i(t) \right] = \sum_{i=N}^{N+n} Q[\xi_i(t)] = \sum_{i=N}^{N+n} Q(\omega_i)$$

В случае нелинейного оператора Q возможно проявление взаимодействия процессов при их суммировании, выражающееся в ненулевом значении слагаемых вида $\overline{\xi_p^m(t) \xi_q^n(t)}$, что должно учитываться при расчёте конкретной характери-

ки. Для дисперсии процесса $D = \overline{\xi^2(t)}$ в широкой полосе частот получим известное правило

$$D \left[\sum_{i=N}^{N+n} \xi_i(t) \right] = \sum_{i=N}^{N+n} D_{\xi_i} + \sum_i \sum_j \overline{\xi_i(t) \xi_j(t)} = \\ = \sum_{i=N}^{N+n} D_i$$

где учтено свойство некоррелированности процессов смежных не перекрывающихся полосах частот $\overline{\xi_i(t) \xi_j(t)} = 0$.

Необходимость измерения частотной зависимости различных статистических характеристик будем учитывать при обсуждении свойств различных моделей случайных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков А.К. Статистические измерения в судовой акустике. — Л.: Судостроение, 1985. — 272 с.

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ STD-ИЗМЕРЕНИЙ
В АНТАРКТИКЕ**

И.Ю.Шкворец

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
99000, г. Севастополь, ул.Капитанская, 2
E-mail: shkvor@bios.iuf.net

Введение

Современный международный уровень проведения океанографических исследований предъявляет высокие требования к точности измерения STD-параметров (относительная электрическая проводимость (практическая соленость), температура, гидростатическое давление) морской среды. Так, в соответствии с требованиями программы WOCE [5], стандартные отклонения погрешностей измерений должны быть на уровне:

- по температуре - 0.002°C;
- по практической солености - 0.002;
- по гидростатическому давлению - 0.05% от диапазона измерений.

Столь высокий уровень требований, соизмеримый с погрешностями рабочих эталонов физических величин, выдвигает соответственно высокие требования к метрологическим характеристикам используемой при проведении измерений STD-системы, методики выполнения измерений и метрологического обеспечения прецизионных STD-измерений. Не случайно в требованиях по представлению данных и отчетов в рамках международных программ обязательно указание выполненных в рейсе метрологических работ (калибровка, корректировка градуировочных коэффициентов, результаты измерений практической солености проб воды на прецизионном солемере, используемые эталоны и т.д.). Кроме того, в технической документации на современные зарубежные прецизионные STD-системы обязательно требование контроля по-

грешности измерений и, при необходимости, калибровки и коррекции результатов STD-измерений. В отечественной практике океанографических измерений, проводимых в Морском гидрофизическом институте НАН Украины (МГИ НАНУ), вышеуказанные работы являются неотъемлемой частью метрологического обеспечения STD-измерений [2]. Метрологическое обеспечение океанографических измерений во время проведения 2-й Украинской морской антарктической экспедиции в 61-м рейсе НИСП "Эрнст Кренкель" (январь-май 1998г.) осуществлялось Метрологической службой МГИ НАНУ, и включало следующие виды работ:

-периодический контроль измерений практической солености STD-системой методом отбора проб кассетой батометров и измерений солености проб на прецизионном лабораторном солемере;

-определение фактических градуировочных коэффициентов измерительных каналов (ИК) относительной электрической проводимости (ОЭП) в реальных условиях проведения океанографических работ;

-контроль и корректировка градуировочных коэффициентов ИК температуры, ОЭП, гидростатического давления в случае их значительных уходов;

-градуировку (калибровку) ИК в случае их ремонта или замены датчиков;

-оценку фактических значений погрешности измерений океанографических параметров в экспедиционном рейсе.

Методика и средства метрологического обеспечения STD-измерений

При проведении работ по метрологическому обеспечению STD-измерений в лабораторных и судовых условиях использовалась следующая разработанная Метрологической службой МГИ и у-

вержденная в органах Госстандарта нормативно-техническая документация:

- "ГСИ. Измерительные каналы температуры океанографических измерительных систем. Инструкция по поверке" МИ 851-91;

- "ГСИ. Измерительные каналы гидростатического давления океанографических измерительных систем. Инструкция по поверке" МИ 535-91;

- "ГСИ. Измерительные каналы относительной электрической проводимости океанографических систем. Инструкция по поверке" МИ 952-91.

Образцовые средства измерений температуры, ОЭП (практической солености) и гидростатического давления служат для передачи размера единиц физических величин от исходных эталонов к рабочим средствам измерений океанографических параметров. Подробное описание и метрологические характеристики образцовых средств, используемых при метрологическом обеспечении прецизионных STD-измерений, изложены в работе [2]. При проведении работ по метрологическому обеспечению океанографических измерений в экспедиционном рейсе использовались следующие образцовые средства измерений:

- образцовый лабораторный солемер МГИ4602 (СОКОЛ) №03, прошедший метрологическую аттестацию в декабре 1997г. и имеющий среднеквадратическую погрешность измерений практической солености не более 0.002;

- нормальная вода серии С152 (К15=1.00008) производства ИО РАН и аттестованная перед рейсом по стандартной морской воде IAPSO производства "Ocean Scientific Int." (Великобритания);

- стандартная морская вода С30 практической соленостью 30.033, служащая для контроля линейности солемера;

- образцовые кварцевые измерители температуры ПДТ N3 и ИТ N8, откалиб-

рованные перед рейсом по рабочему эталону температуры в соответствии с МТШ-90 и имеющие среднеквадратическую погрешность не более 0.003°C.

Обработка результатов измерений производилась с помощью пакета программ МЕТРОЛОГ, позволяющего рассчитывать образцовые значения контролируемых океанографических величин, сравнивать их с показаниями STD-системы, вычислять градуировочные коэффициенты ИК, оценивать фактические значения погрешностей измерений.

Результаты метрологического обеспечения STD-измерений

За время рейса фактически все океанографические зондирования выполнялись с помощью STD-системы ИСТОК-7 (ОЛС) N 04. Данная прецизионная 16-разрядная STD-система [1], разработанная в МГИ НАНУ, за время эксплуатации с 1991г. показала высокие метрологические свойства, что подтвердили результаты периодических поверок, метрологического обеспечения в рейсах, интеркалибрации результатов STD-измерений во время международных программ [3],[4].

В декабре 1997г. ИСТОК-7 N04 прошел предрейсовую поверку в Лаборатории гидрофизической метрологии Метрологической службы МГИ НАНУ. Оценки основных погрешностей за межповерочный интервал 6 месяцев составили:

- по температуре - не более 0.003 °C;

- по ОЭП - не более 0.00032;

- по давлению - не более 0.012 МПа (0.06% от диапазона измерений).

По результатам градуировки (калибровки) был выполнен расчет новых градуировочных коэффициентов. Среднее квадратическое отклонение (СКО) погрешности аппроксимации градуировочных характеристик ИК составило:

- по температуре - 0.001 °C;

- по ОЭП - 0.00005;

-по давлению - 0.001 МПа (0.005% от диапазона измерений).

Кроме того, было выполнено исследование влияния окружающей температуры на показания ИК температуры. Дополнительная погрешность данного влияния при окружающей температуре 0°C не превышает 0.006 °C. Функция данного влияния была учтена при расчете градуировочной характеристики ИК температуры.

В рейсе контроль погрешности STD-измерений осуществлялся методом отбора проб воды кассетой батометров на различных горизонтах, измерениях практической солености проб на прецизионном солемере СОКОЛ и сравнения ее с результатами измерения практической солености STD-системой ИСТОК-7. В соответствии со Шкалой практической солености (ШПС-78), океанографический параметр "практическая соленость" является функцией ОЭП, температуры и гидростатического давления *in situ*, что позволяет использовать практическую соленость как интегральный параметр метрологического контроля STD-измерений. Так как в районе проведения океанографических работ практическая соленость изменяется от 32 до 35, то для повышения точности выполнения измерений на солемере СОКОЛ, кроме калибровки по нормальной воде практической соленостью 35, контролировалась погрешность измерений в точке диапазона с практической соленостью 30 по стандартной морской воде С30.

На начальном этапе работ по результатам обработки 20 проб с 5 станций была выполнена корректировка градуировочных коэффициентов ИК ОЭП. Практически по всем пробам ИСТОК-7 показывал занижение значений практической солености, вычисленной по лабораторным градуировочным коэффициентам на систематическое значение - 0.030. Данная погрешность объясняется невозможностью в лабораторных условиях смоделировать реальные условия

при выполнении океанографических работ (ограниченный объем градуировочного бака, солевой состав градуировочного раствора и др.) Для исключения систематической погрешности был скорректирован градуировочный коэффициент ИК ОЭП: $COB = -1E-4$. При этом коэффициенты температурно-барической коррекции использовались те же, что были экспериментально определены для STD-системы ИСТОК-7 N4: $CRT = -8.2E-5$; $CRP = 4E-5$. В дальнейшем результаты контроля измерений практической солености за весь период работ подтвердили корректность определения данных градуировочных коэффициентов. В таблице 1 приведены результаты метрологического контроля измерений практической солености STD-системой ИСТОК-7 на глубоководной океанографической станции №72, выполненной у Южных Оркнейских островов 8 апреля 1998г.

Всего за время экспедиции было отобрано и измерено на солемере СОКОЛ 112 проб на соленость, при этом контроль измерений практической солености STD-системой ИСТОК-7 осуществлялся на 38 океанографических станциях (более 60% всего количества). Следует отметить, что гидрологические условия на ряде станций (значительная изменчивость поля солености, малые глубины зондирования и т.п.) не позволяли на достаточно высоком уровне точности производить контроль STD-измерений. На рис.1 представлены результаты контроля измерений практической солености STD-системой ИСТОК-7 N4 за весь период экспедиционных работ. Как видно из рис. 1, в верхнем деятельном слое океана наблюдается увеличение дисперсии погрешности измерений практической солености по сравнению с глубинными слоями. Вероятнее всего это обусловлено не столько качеством STD-измерений, сколько сложностью прецизионного отбора проб в слоях с большей измен-

чивостью поля солености. Также немаловажный вклад в это вносит значительная насыщенность органикой и растворенным кислородом деятельного слоя Антарктических вод. Перенасыщенность растворенным кислородом проб (результаты гидрохимического анализа показали наличие в пробе с суточной выдержкой наличие 130% насыщения растворенным кислородом), приводит к образованию пузырьков на стенках измерительной ячейки солемера и не позволяет производить прецизионные измерения. Для уменьшения концентрации растворенного кислорода в пробах необходимо заполнять склянку для пробы не более 2/3 своего объема и при выдержке пробы в лаборатории до выравнивания температуры пробы кратковременно приоткрывать крышку пробы для уменьшения давления выделяющегося кислорода. В целом оптимальным для выполнения контроля измерений практической солености является отбор проб с глубин более 1000м, что и подтверждается дисперсией погрешности на этих глубинах. К сожалению, основные океанографические зондирования выполнялись до глубины 1000м, что не позволило набрать достаточного статистического материала на глубоководных горизонтах.

5 апреля 1998г. во время захода на станцию Акад. Вернадский была выполнена поверка (калибровка) ИК температуры STD-системы ИСТОК-7 №4. Для повышения достоверности результатов поверки в качестве образцового средства измерения температуры использовались два различных кварцевых измерителя температуры ПДТ №3 и ИТ №8, аттестованных перед рейсом по рабочему эталону температуры в соответствии с Международной практической температурной шкалой 1990г. Поверка выполнялась в жидкостном термостате в тех же контрольных точках, что и при пре-рейсовой поверке (калибровке) в диапазоне реальных температур Антарктиче-

ских вод. Результаты поверки представлены в таблице 2.

Статистические оценки погрешности измерений практической солености и температуры STD-системой ИСТОК-7 №4 в течение рейса составили:

-математическое ожидание погрешности $M[\Delta S] = 0.0001$;

-математическое ожидание погрешности $M[\Delta T] = -0.0001$ °C;

-СКО случайной погрешности $b[\Delta S] = 0.0029$;

-СКО случайной погрешности $b[\Delta T] = 0.0016$ °C.

Как видно из полученных статистических оценок систематическая составляющая (математическое ожидание) погрешности измерений практической солености и температуры за период рейса практически равна нулю, что свидетельствует о высокой стабильности градуировочных характеристик STD-системы ИСТОК-7 N4. Величина оценки СКО случайной погрешности измерений практической солености определяется суммарным влиянием как собственно инструментальной погрешности STD-системы, так и методическими погрешностями качества отбора проб, вычисления практической солености по ШПС-78, погрешностью образцового солемера, исходных стандартов морской воды и т.п. Полученная оценка СКО случайной погрешности измерений практической солености и температуры может служить оценкой качества полученной в рейсе океанографической информации и фактически соответствует уровню современных международных требований.

Выводы

1. Полученная в 61-м экспедиционном рейсе НИС "Эрнст Кренкель" океанографическая информация имеет высокое метрологическое качество. Оценки среднеквадратических погреш-

Таблица 1.

Сравнение результатов измерений практической солености
STD-системой ИСТОК-7 N4 и солемером СОКОЛ N3 на ст. N72.

Глубина, м	Температура °C	Код ОЭП NR	Соленость ИСТОК-7,S1	Соленость СОКОЛ,S2	Погрешность S1 - S2
4	-0.7343	18926	33.3723	33.3764	-0.0041
499	0.2999	20355	34.6484	34.6433	0.0051
749	0.3351	20465	34.6650	34.6639	0.0011
751	0.3345	20465	34.6648	34.6649	-0.0001
999	0.2440	20486	34.6573	34.6596	-0.0023
1001	0.2434	20487	34.6590	34.6622	-0.0032
1250	0.1481	20505	34.6533	34.6538	-0.0005
1497	0.0697	20531	34.6474	34.6448	0.0026
1498	0.0697	20532	34.6492	34.6479	0.0013
1748	0.0248	20580	34.6473	34.6478	-0.0005
1749	0.0230	20580	34.6490	34.6509	-0.0019
1998	-0.0202	20626	34.6447	34.6442	0.0005
2038	-0.0402	20626	34.6447	34.6446	0.0001

Таблица 2.

Результаты поверки ИК температуры STD-системы ИСТОК-7 N4.

N п/п	Код ИКТ	T исток, °C	T пдт, °C	T ит, °C	T исток-Tпдт, °C	T исток-Tит, °C
1	3732	0.1098	0.1101	0.1103	- 0.0003	- 0.0005
2	3730	0.1086	0.1090	0.1090	- 0.0004	- 0.0004
3	3729	0.1080	0.1078	0.1083	0.0002	- 0.0003
4	3725	0.1056	0.1044	0.1057	0.0012	- 0.0001
5	5383	1.1125	1.1118	1.1083	0.0007	0.0042
6	5381	1.1113	1.1095	1.1076	0.0018	0.0037
7	5379	1.1101	1.1083	1.1056	0.0018	0.0045
8	5378	1.1095	1.1072	1.1049	0.0023	0.0046
9	16526	7.8832	7.8865	7.8862	-0.0033	-0.0030
10	16523	7.8814	7.8854	7.8842	-0.0040	-0.0028
11	16520	7.8796	7.8831	7.8829	-0.0035	-0.0033
12	16517	7.8777	7.8808	7.8789	-0.0031	-0.0012

ностей STD-измерений за период рейса составили:

- по температуре - 0.002°C;
- по практической солености - 0.003.

2. Применение в практике экспедиционных рейсов метрологического обеспечения океанографических работ с использованием современных прецизионных образцовых средств и методик позволяет значительно повысить точность STD-измерений и выполнять океанографическую съемку на современном международном уровне.

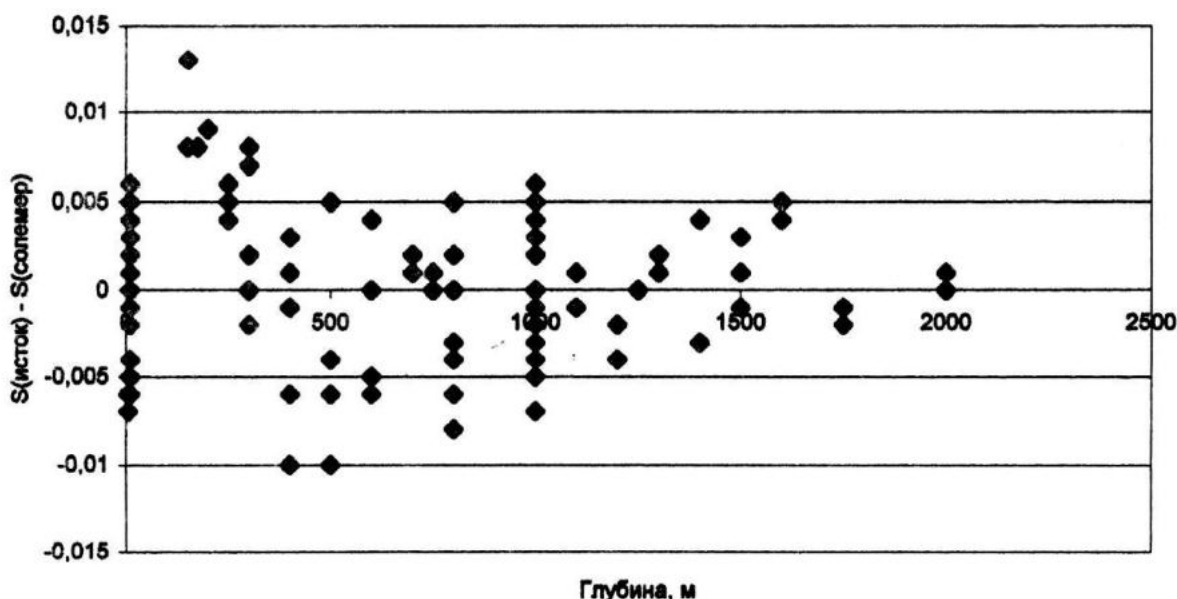
3. При выполнении океанографических работ в рейсе использовалась STD-система ИСТОК-7 и прецизионные образцовые средства отечественной разработки и изготовления (МГИ НАН Украины), что свидетельствует о высоком уровне океанографического приборостроения на Украине. В то же время следует отметить, что данные средства измерений изготовлены в начале 90-х годов и в настоящее время нуждаются в модернизации по ряду технических и метрологических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайский В.А., Забурдаев В.И., Иванов А.Ф. 1992. Стандартный гидролого-гидрохимический автоматизированный комплекс для морских экологических исследований. Школа "Автоматизация гидрологических исследований" // Тезисы докладов.- Севастополь, МГИ АН Украины, С.43-45.
2. Калашников П.А., Шкворец И.Ю., Егоров Ю.А. 1997. Метрологическое обеспечение прецизионных измерений солености, температуры и давления STD-системами / Морской гидрофизический журнал. №1. С.73-79.
3. Joyce T., Bacon S., Kalashnikov P. et al. 1992. Results of an oxygen / salinity comparison cruise on the R/V Vernadsky // WHP Office Rep. WHP0 92-3. WOCE Rep. N93/92.-Woods Hole, Mass. USA.
4. Oguz T., Besiktepe S., Ivanov L. et al. 1993. Physical and Chemical Intercalibration Workshop/ IOC Workshop Report. - N98 -P.86.
5. WOCE Report N67/91.-July1991.-Rev.1.-Woods Hole,Mass.,USA.

Рисунок 1.

Распределение погрешности измерения солености по глубине



**РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И
НАТУРНЫХ СЛИЧЕНИЙ
ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕКТРО-
СОЛЕМЕРОВ ТИПА AUTOLAB
И ГМ-65**

В.И.Забурдаев

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Лабораторные электросолемеры типа Autolab (CSIRO, Австралия) [1] и ГМ-65 ("Гидрометприбор", СССР) [2, 3] являются индуктивными электросолемерами с параметрической автокомпенсацией зависимости относительной электрической проводимости (ОЭП) морской воды от температуры. Последнее их свойство позволяет измерять соленость по ОЭП без применения активного прецизионного термостатирования и без перекалибровки прибора при изменении температуры пробы в рабочей камере в диапазоне (1÷3) °С. Эта эксплуатационная особенность способствовала массовому использованию этих приборов в сложных условиях судовых лабораторий.

Солемеры Autolab широко применялись в океанографической практике в период 1962-1975 гг. в процессе выполнения исследований по многим известным международным проектам, включая GEOSSEX, MODE и POLYMODE. Выпускались они в двух модификациях: узкодиапазонный (измерение солености в диапазоне 27÷42) и широкодиапазонный ($S \approx 2\div42$). Установленная разработчиком [1] погрешность измерения солености лежала в пределах $\pm 0,003$.

Лабораторные электросолемеры типа ГМ-65 (первоначальные названия узкодиапазонного варианта СОЛ-65, широкодиапазонного - СОЛЕКС-1 [2]) производились на заводе "Гидрометприбор" Госкомгидромета СССР (г. Сафоново Смоленской области). В основу структурной и электрической схем положены схемы широкодиапазонного солемера Autolab, а конструктивное исполнение было выполнено в более компактной форме. Этот тип прибора широко использовался в СССР в 1968-1991 гг. в ведомствах Госкомгидромета, Минрыбхоза, Гидрографической службы, в Академии наук СССР и союзных республик и др. как для измерения солености океанских вод, так и окраинных, средиземных и внутренних морей. Указанная изготовителем основная погрешность этого прибора [3] в эквиваленте солености (ОЭП) составляла $\pm 0,02 (\pm 50 \cdot 10^{-5})$ и $\pm 0,03 (\pm 75 \cdot 10^{-5})$ в диапазонах изменения солености (ОЭП) от 28 до 43 (от 0,8 до 1,2) и от 5 до 28 (от 0,17 до 0,8) соответственно. В диапазоне солености (ОЭП) от 2 до 5 (от 0,07 до 0,17) погрешность измерения солености (ОЭП) может достигать $\pm 0,04 (\pm 100 \cdot 10^{-5})$.

Столь существенное отличие в классе точности практически однотипных приборов Autolab и ГМ-65 (включая конкретные параметры принципиальных электрических схем) может быть вызвано либо разным качеством комплектующих изделий, изготовления, настройки, либо в одном случае завышением, а в другом - занижением метрологических характеристик производителями. Опубликованные материалы по сличениям

электросолемеров как в береговых, так и в судовых условиях говорят о том, что фактические расхождения в показаниях солемеров значительно превосходят (в $2 \div 10$ раз) их паспортные погрешности. Это относится как к приборам Autolab, так и ГМ-65. Рассмотрим более подробно результаты этих сличений, так как они могут помочь оценить возможные погрешности измерений в тех массивах информации, которые получены с помощью этих типов приборов и хранятся в ведомственных, национальных и международных банках данных.

Сличения лабораторных электросолемеров различных типов производились неоднократно. Однако наиболее ценные с точки зрения одновременного использования приборов типа Autolab, ГМ-65 и других, в том числе и прецизионного компаратора проводимости Р.С.С. национального океанографического центра (NOIC) США, являются сличения, выполненные по инициативе К.Грассхофа и Ф.Германа в 1974-1975 годах [4]. Интеркалибрация солемеров, используемых в процессе выполнения международной программы ТРОПЭКС-1974 производилась в 1974 году. МГИ НАН Украины располагает данными* результатов сличений двух солемеров типа ГМ-65 (один с НИС "Михаил Ломоносов" МГИ АН УССР, другой с НИС "Пассат" Госкомгидромета СССР) и Р.С.С. (NOIC, USA) как образцового прибора. Наличие

прецизионного компаратора проводимости Р.С.С. в обоих экспериментах позволяет связать данные сличений, выполненных К.Грассхофом и Ф.Германом, с данными сличений по программам ТРОПЭКС-1974. К.Грассхоф и Ф.Герман производили сличение по пробам с малой (Балтийская вода, $S \approx 8,0$) и с большой (Средиземноморская вода, $S \approx 38,1$) соленостью. Пять ампул Балтийской воды и пять ампул Средиземноморской вместе с четырьмя ампулами стандартной (нормальной) воды с соленостью 35 (серия Р-64) для калибровки были посланы на каждый солемер, участвующий в сличениях. Результаты сличений приведены в табл. 1 и табл. 2. В эксперименте по ТРОПЭКС-1974 на каждый солемер выделялось по двенадцать приготовленных проб, охватывающих диапазон солености от 32 до 38. В табл.3 показаны данные сличений по этому эксперименту.

В табл. 4 приведены результаты измерений с помощью индуктивного солемера солености, а также хлорности, выполненные НИС "Atlantis-II" [5] в придонном перемешанном слое в Черном море в 1969 году и результаты измерений солености с помощью солемера ГМ-65, полученные в Черноморском этапе 28 рейса НИС "Академик Вернадский" в 1983 году [6]. В этой же таблице указаны разницы между значениями солености,

* Информация получена из официального письма заместителя директора управления морской техники NOAA США У.М.Николсона заместителю директора Института Океанологии АН СССР И.Е.Михальцеву от 6 февраля 1975 года.

полученными на НИС "Atlantis-II", "Академик Вернадский" и значениями солености Черноморской воды на глубинах 1750 ÷ 2100 м, полученных в результате высокоточных измерений по программам HydroBlack и CoMSBlack в 1991-1993 гг. [7]. Привлечение этих материалов для оценки метрологических характеристик солемеров Autolab и ГМ-65 стало возможным благодаря обнаруженному НИС "Клог" (WHOI, USA) в 1988г. [8] и надежно зарегистрированному в экспедициях по упомянутым Черноморским проектам придонного перемешанного слоя в диапазоне глубин 1750-2100 м с соленостью $S_{1978} = 22,333 \pm 0,002$ и потенциальной температурой $\Theta = 8,895 \pm 0,003$ по всей глубинной части Черного моря.

Учитывая медленные процессы водообмена на этих глубинах, этот слой можно считать естественным бассейном с высоким постоянством солености в пространстве и времени и использовать в качестве природной реперной точки для испытаний лабораторных солемеров и зондирующих СТД-систем.

Для исключения погрешностей сличений, вызванных различием практических шкал солености, используемых при измерениях в Черном море на НИС "Atlantis II" (шкала Кокса 1966 г. [9]), на НИС "Академик Вернадский" (шкала Кокса 1966 г.) и в программах HydroBlack, CoMSBlack (шкала ШПС-1978), все данные были приведены к шкале ШПС-1978.

Для удобства визуального анализа результатов сличения все данные по расхождениям показаний солемеров представлены на рис. 1.

Как видно из табл. 1-4 и из рисунка, реальные расхождения в показаниях солемеров значительно превосходят их "паспортные" погрешности и носят относительно закономерный характер: с удалением от точки калибровки солемеров ($R_1 \approx 1,0$, $S \approx 35,0$) расхождения возрастают.

В эксперименте К.Грассхофа и Ф.Германа использовались 11-13 солемеров типа Autolab и один ГМ-65. Все они показали высокую индивидуальную воспроизводимость измерений. Отклонения от среднего значения при 12 измерениях проводимости одной и той же пробы между калибровками редко превышали 0,003 в эквиваленте солености. Следовательно, большие расхождения в средних значениях солености каждого прибора (это особенно относится к приборам Autolab) со средними показаниями Р.С.С. вызваны вероятнее всего неисключенными инструментальными погрешностями индивидуально каждого прибора.

В эксперименте К.Грассхофа, Ф.Германа солемер ГМ-65 показал расхождения 0,007 и -0,001 для проб с соленостью 8 и 38 соответственно. Эти значения меньше паспортных погрешностей и, как это можно видеть по другим сличениям, не отражают действительных метрологических характеристик этого типа прибора.

Измерения солености проб Черноморской воды, отобранной в экспедиции НИС 00 "Atlantis-II", производились, судя по работе [5], не на борту судна, а в Вудсхольском океанографическом институте (WHOI, США) с помощью индуктивного солемера

(конкретный тип прибора не указан, но учитывая установившуюся в среде океанологов традицию под индуктивным солемером подразумевать только приборы типа Autolab, можно считать, что именно этот тип прибора использовался). Принимая во внимание факт постоянства солености Черноморской воды в перемешанном придонном слое в диапазоне от 1750 до 2100 м [7] и учитывая сравнительно высокую индивидуальную воспроизводимость солемеров Autolab, следует отметить, что среднее квадратическое отклонение случайной составляющей расхождения слишком велика и достигает $\sigma_s = 0.021$. Привлекая данные параллельного прецизионного определения хлорности тех же проб воды (пробы на хлор отбирались непосредственно из рабочей камеры солемера сразу после измерения кондуктометрической солености), выполненные К.Кремлингом с прецизионностью (воспроизводимостью) не хуже $\Delta Cl = \pm 0,0005 \text{ ‰}$, находим, что среднее квадратическое отклонение разброса хлорности в отобранных пробах составляет $\sigma_{Cl} = 0.0114 \text{ ‰}$ при средней хлорности $Cl = 12,3451 \text{ ‰}$.

Сопоставление рассеяний независимых измерений кондуктометрической солености и хлорности показывает, что $\sigma_s / \sigma_{Cl} = 1.84$ и практически точно соответствует хлорному коэффициенту солености по шкале Кокса ($S = 1.80655 \cdot Cl$). Это в свою очередь говорит о том, что причина большого рассеяния солености, измеренной с помощью солемера Autolab, определяется не столько инструментальной погрешностью солемера, сколько изменчивостью солености

(хлорности) в пробах воды как в момент отбора (например, из-за возможной негерметичности пробоотборников) или в процессе хранения и транспортировки отобранных проб от места сбора до места измерений.

Среднее значение солености в придонном перемешанном слое Черного моря по данным НИС "Atlantis-II" составляет $S = 22,396$ вместо определенного позднее значения $S_{1978} = 22,333$ [7]. Причина расхождений средних значений солености $\Delta S = 0,063$ может заключаться и в систематической погрешности собственно солемера и в изменчивости солености проб в процессе отбора, хранения и транспортировки. В настоящее время только по данным экспедиции НИС "Atlantis-II" установить более точно истинную причину расхождений невозможно.

Как видно из табл. 3, расхождения в показаниях солености в придонном перемешанном слое солемером ГМ-65 в Черноморском этапе 28-го рейса НИС "Академик Вернадский" в 1983 году по сравнению с измерениями 1991-1993 гг. практически полностью совпадают с показаниями солемера Autolab (среднее расхождение составляет $\Delta S = 0,047$ при среднем квадратическом отклонении случайной составляющей $\sigma_s = 0,016$). В этом случае соленость проб измерялась непосредственно на судне без длительного хранения и транспортирования и в качестве возможных причин большого рассеяния остаются только изменчивость солености проб в процессе их отбора кассетой батометров и дальнейшего отбора в штатную посуду, а также в силу инструментальных особенностей прибора.

Сличение солемеров ГМ-65 и Р.С.С. в процессе проведения эксперимента ТРОПЭКС-1974, показало (см. рис. 1, табл. 4), что наряду с трендом (возрастание расхождений с уменьшением солености) расхождения имеют скачкообразный характер в случае малой разности солености контрольных проб (в пределах $0,01 \div 0,2$). При этом скачки для обоих сличаемых приборов составляют $\Delta S \approx 0,01$ и наблюдаются на одних и тех же значениях солености (ОЭП) или на одних и тех же номерах контрольных проб. Этот факт говорит о наличии инструментальных погрешностей солемера ГМ-65, ответственных за проявление дифференциальной нелинейности в статической характеристике преобразования. В принципе этот вид погрешности должен быть присущ и солемерам типа Autolab, поскольку они имеют одинаковую функционально-электрическую схему, однако установить это экспериментально не удалось в связи с отсутствием в МГИ НАН Украины солемеров Autolab.

Полученные результаты лабораторных и натуральных сличений электросолемеров типа Autolab и ГМ-65 наводят на мысль, что при высокой индивидуальной воспроизводимости показаний главными причинами больших расхождений могут быть:

1) аддитивная и мультипликативная погрешности приборов, вызванные отклонением индивидуальных статических характеристик преобразования (СХП) приборов от коминальной линейной СХП. В работе [9] приводятся сведения о том, что в приборах типа ГМ-65 эти

погрешности могут быть вызваны смещением "нуля", изменчивостью выходного импеданса индуктивного делителя (причем как активной, так и реактивной составляющей его), в зависимости от значения коэффициента деления (т.е. в зависимости от относительной электропроводимости пробы воды), а также в зависимости от индуктивности жидкостного витка воды и обмотки компенсации в трансформаторном датчике ОЭП. Подобные погрешности имеются и в солемерах Autolab, поскольку функционально-электрическая схема их аналогична схеме ГМ-65;

2) калибровка приборов по одной точке шкалы с помощью нормальной воды с $S = 35,0$, $R_{15} = 1,0$ не выявляет особенностей индивидуальных СХП приборов во всем диапазоне измерений, в результате чего ни аддитивные, ни мультипликативные погрешности в дали от значения $R_{15} = 1,0$ из результатов измерений не исключаются. В связи с этим в накопленных в банках данных результатах измерений малой солености ($S = 8 \div 25$), например вод Балтийского, Азовского, Черного, Каспийского морей или высокой солености (воды Средиземного, Красного морей), полученных с помощью приборов Autolab и ГМ-65 до внедрения шкалы практической солености ШПС-1978 и до введения в 1980-1982 гг. четырех стандартов нормальной воды ($S = 10$, $S = 30$, $S = 35$, $S = 38$) для калибровки приборов, возможны ошибки в солености, достигающие минус $0,01 \div 0,08$. Эти погрешности значительно превышают приписанный данным приборам класс точ-

Таблица 1

Результаты сличений электросолемеров
по контрольной пробе Балтийской воды
(по K.Grasshoff, F.Herman [4])

Контрольная проба	Показания сличаемых приборов, S, ‰				Расхождения, ΔS , ‰		
	Autoiab	ГМ-65	Autosal (Guildline)	P.C.C.	ΔS_{A-L}	$\Delta S_{ГМ}$	ΔS_{A-s}
Вода из Балтийского моря $S \approx 8,0$	7,987	7,995	7,988	7,988	-0,001	0,007	0,000
	7,984	-	-	-	-0,004	-	-
	7,992	-	-	-	0,004	-	-
	8,004	-	-	-	0,016	-	-
	8,010	-	-	-	0,022	-	-
	7,997	-	-	-	0,009	-	-
	8,021	-	-	-	0,033	-	-
	8,058	-	-	-	0,070	-	-
	8,054	-	-	-	0,066	-	-
	8,068	-	-	-	0,080	-	-
	7,984	-	-	-	-0,004	-	-
	7,993	-	-	-	0,005	-	-
Среднее значение	8,012	7,995	7,988	7,988	0,025	0,007	0,000
σ_s	0,031	-	-	-	0,031	-	-

Таблица 2

Результаты сличений электросолемеров
по контрольной пробе Средиземноморской воды
(по K.Grasshoff, F.Herman [4])

Контрольная проба	Показания сличаемых приборов, S, ‰				Расхождения, ΔS , ‰		
	Autolab	ГМ-65	Autosal (Guildline)	P.C.C.	ΔS_{A-L}	$\Delta S_{ГМ}$	ΔS_{A-s}
Вода из Средиземного моря $S \approx 38,1$	38,134	38,128	38,132	38,129	0,005	-0,001	0,003
	38,132	-	-	-	0,003	-	-
	38,118	-	-	-	-0,011	-	-
	38,119	-	-	-	-0,010	-	-
	38,127	-	-	-	-0,002	-	-
	38,124	-	-	-	-0,005	-	-
	38,127	-	-	-	-0,002	-	-
	38,126	-	-	-	-0,003	-	-
	38,117	-	-	-	-0,012	-	-
	38,130	-	-	-	0,001	-	-
	38,131	-	-	-	0,002	-	-
Среднее значение	38,126	38,128	38,132	38,129	-0,003	-0,001	0,003
σ_s	0,006	-	-	-	0,006	-	-

Таблица 3

Соленость, хлорность Черноморской воды в придонном перемешанном слое по данным НИС "Atlantis-II" (1969 г. [5]) и НИС "Академик Вернадский" (1983 г. [6])

Соленость, хлорность Черноморской воды в ППС по данным НИС "Atlantis-II"						Соленость Черноморской воды в ППС по данным 28 рейса НИС "Академик Вернадский"					
№ станции	Глубина, м	Атл. S ₁₉₆₆	Атл. S ₁₉₇₈	Хлорность, ‰ Cl	Атл. Δ S ₁₉₇₈	№ станции	Глубина, м	А.В. S ₁₉₆₆	А.В. S ₁₉₇₈	А.В. Δ S ₁₉₇₈	
1432/1	2009	22,371	22,382	12,3429	0,049	3962	1781	22,386	22,398	0,065	
1445/1	1812	22,364	22,375	12,3357	0,042	3963	1747	22,357	22,369	0,036	
1464/0	2078	22,386	22,397	12,3387	0,064	3977	2000	22,357	22,369	0,036	
1466/2	1997	22,420	22,431	12,3627	0,098	3978	1757	22,352	22,364	0,031	
1466/2	2098	22,399	22,410	12,3540	0,077	3979	1958	22,358	22,370	0,037	
1478/2	1938	22,372	22,383	12,3368	0,050	3985	1748	22,368	22,380	0,047	
-	-	-	-	-	-	3992	1947	22,390	22,402	0,069	
-	-	-	-	-	-	3992	1762	22,382	22,394	0,061	
Среднее значение		22,3853	22,3963	12,3451	0,063	-	-	22,369	22,380	0,047	
Среднее квадратическое отклонение		0,021	0,021	0,0114	0,021	-	-	0,0157	0,0157	0,0157	

Результаты сличений солемеров ГМ-65 на НИС "Михаил Ломоносов" ($S_{ГМ}^{МЛ.}$)
и НИС "Пассат" ($S_{ГМ}^{П}$) с показаниями Р.С.С.
(сличение при проведении программы ТРОПЭКС-1974)

№ пробы	$S_{проб}^*$	$S_{ГМ}^{МЛ.} - S_{РСС}$	$S_{ГМ}^{П} - S_{РСС}$	$S_{ГМ}^{МЛ.} - S_{ГМ}^{П}$
1	37,95	0,011	0,002	0,009
2	36,67	0,019	0,008	0,011
3	35,05	0,007	0,002	0,005
4	33,54	0,031	0,017	0,014
5	31,99	0,022	0,010	0,012
6	36,53	0,010	0,010	0,000
7	38,06	0,014	0,014	0,000
8	36,70	0,021	0,010	0,011
9	35,04	0,018	0,010	0,008
10	33,59	0,032	0,015	0,017
11	32,09	0,033	0,021	0,011
12	33,54	0,021	0,014	0,007
Среднее значение, ΔS		0,020	0,011	0,0087
Среднее квадр. отклонение, σ		0,009	0,0056	0,0052

S^* - ориентировочное значение солёности.

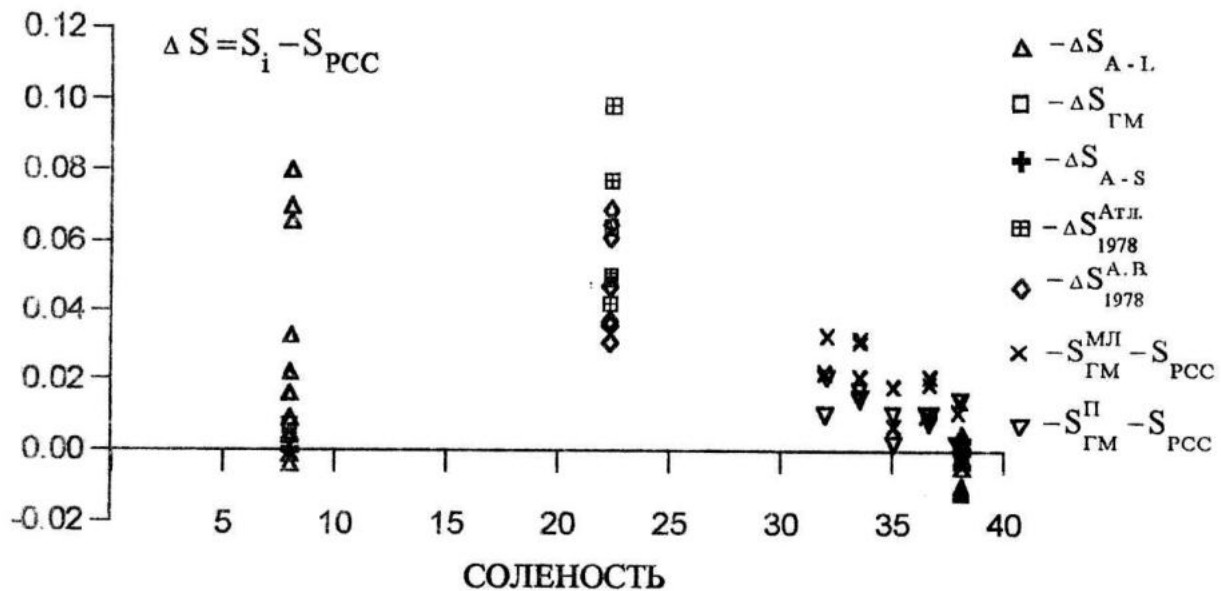


Рис. 1. Расхождения в показаниях приборов

ности. Этот факт необходимо учитывать при анализе и сопоставлении архивных данных с современными результатами измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brown N.L., Hamon B.V. An inductive salinometer. *Deep-Sea Research*, 1961, V 8, N 1, P. 65-75.

2. Козловская И.А., Ермаков В.М. Приборы СОЛ-65 и СОЛЕКС-1 для определения солености морской воды по относительной электропроводности. В кн.: Автоматизация научных исследований морей и океанов. Симпозиум 1968 г.), часть I. Издание МГИ АН УССР, Севастополь, 1969, С. 113-118.

3. Электросолемер ГМ-65. Паспорт Л82.840.004ПС 1976, 66 листов.

4. UNESCO Technical papers in marine science, N 24. Seventh report of the joint panel on oceanographic tables and standards. K.Grasshoff, F.Herman. alinometer intercalibration experiment. Paris. UNESCO, 1975, P. 19-23.

5. Kremling Klaus. Relation between chlorinity and conductometric salinity in Black Sea water // *Black Sea, geol., chim. and biol.* - Tulsa, Oklahoma, 1974. - P. 151-154.

6. Гидрологические таблицы. Архивные материалы МГИ НАН Украины по Черноморскому этапу 28 рейса НИС "Академик Вернадский" 23.11 - 14.12.1983 г. Инв. № 23870.

7. Иванов Л.И., Шкворец И.Ю. Термохалинная структура глубинных и придонных вод Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 1995. № 6. С. 53-60.

8. Murray I.W., Zafer T.Ozsoy E. Hydrographic properties and ventilation of the Black Sea. *Deep-Sea Research*, 38 (suppl), 1991, pp. 5663-5689.

9. Забурдаев В.И. Исследования метрологических характеристик лабораторного солемера ГМ-65 как компаратора электропроводности морской воды. Тезисы докладов Всесоюзной школы "Технические средства и методы исследования Мирового океана", М., ИО АН СССР, 1987, т. 1, С. 43.