

Автоматизация научных исследований морей и океанов

УДК 551.46.08

В.А. Гайский, П.В. Гайский

Технологии измерения уровня моря

Проводится анализ современных методов и средств измерения уровня моря и вод суши, дается описание созданного в МГИ НАН Украины *CTD*-измерителя уровня моря, формулируются требования к идеальному измерителю уровня вод и показывается, что таким прибором может быть *электронная мерная рейка* на базе распределенных термопрофилемеров Уолша.

Введение

Согласно [1 – 4], уровень моря – это высота свободной поверхности Мирового океана, измеряемая относительно некоторого условно принятого за нуль горизонта. Изменения уровня природных вод всегда представляли интерес для человека как фактор безопасности среды обитания и условий хозяйственной деятельности. Первоначально эти изменения фиксировались визуально относительно отметок о высоком и низком уровнях вод на скалах, а затем относительно меток мерных реек, выполненных на специально установленных досках, вехах, сваях, опорах мостов. Мерная рейка до сих пор остается наиболее распространенным инструментом для измерения уровня вод суши и моря благодаря дешевизне и надежности.

Визуальный отсчет с помощью мерных реек дает значение мгновенного уровня вод. По определению [4], наблюдаемый (мгновенный) уровень содержит средний уровень, составляющую прилива – отлива и метеорологическую составляющую.

Согласно стандарту [1], под уровнем моря понимается высота поверхности моря, свободная от ветровых волн и зыби, измеренная относительно условного горизонта (нуля наблюдений поста, плоскости нуля рейки). Следовательно, информация о мгновенном уровне вод должна быть определенным образом отфильтрована для получения данных об уровне. Однако количественные характеристики такой фильтрации не являются общепринятыми или установленными стандартом.

Временная изменчивость уровня вод, например Черного моря [3], может быть обусловлена одновременно такими естественными явлениями, как речной сток, испарение с поверхности, атмосферные осадки, водообмен через проливы, антропогенный сток, оседание и уплотнение донных осадков, ветровое перераспределение вод по пространству, атмосферное давление, пространственно-временные изменения плотности воды, сгонно-нагонные явления, волновые процессы (сейши и приливные колебания), геодинамические

© В.А. Гайский, П.В. Гайский, 2010

силы (обусловленные поднятием и опусканием земной коры медленные вертикальные движения), цунами. Эти явления имеют разные масштабы пространственной и временной изменчивости. Некоторые из них являются периодическими, и для них могут быть известны спектрально-волновые окна существования. Тогда их вклад может быть выделен при обработке записей мгновенного уровня вод, например для приливов. Для частотного спектра волнения, исходя из современных требований к измерению параметров поверхностных волн, при использовании измерителя мгновенного уровня вод можно ограничиться частотным диапазоном входного сигнала 0 – 5 Гц.

Существующие стандарты не устанавливают количественные характеристики той фильтрации, которая дает значение уровня, соответствующего определению «свободного от волн и зыби». А это делает наблюдения на различных постах с различной фильтрацией в успокоителях и при обработке некорректно сравнимыми. Поэтому на измеритель уровня вод целесообразно возложить задачу измерения мгновенного уровня, а все задачи фильтрации решать при обработке первичных данных, которая может быть унифицированной и регионально адаптированной. В этой связи установленные в настоящее время сроки наблюдения уровня на водах суши в 8 и 20 ч и дополнительно через 2, 4 и 6 ч требуют пересмотра.

В используемых измерителях уровня вод происходит неконтролируемая фильтрация сигнала о мгновенном уровне, а по результатам измерений вычисляются средние уровни за час, сутки, месяцы, годы, выделяются различные периодические составляющие, определяются спектральные характеристики.

Прежде чем обрабатывать первичную измерительную информацию об изменении уровня вод как о процессе, правильным было бы знать его характеристики на выходе измерителя.

Цель данной работы – анализ состояния и тенденций развития технологий измерения уровня природных вод и ознакомление с перспективными разработками МГИ НАН Украины в этой области.

Анализ используемых измерителей уровня природных вод

Отсутствие автоматизации измерений, регистрации, передачи и обработки информации сделало традиционные мерные рейки неконкурентноспособными перед приборами, выполняющими эти операции.

Первый механический измеритель уровня вод с часовым механизмом, самописцем, успокоительным колодцем и осреднением был сделан еще в 1830 г. [4]. Позднее появились электромеханические и электронные измерители уровня.

Успокоительные колодцы. В настоящее время большинство уровнемерных постов имеют успокоительные колодцы, в которых установлены поплавковые самописцы уровня моря, регистрирующие данные на бумажную ленту с дискретностью 1 ч и более. По побережью Черного моря таких постов около 50, в Украине – 14 [3]. Некоторые из них оборудованы приставкой для преобразования угла поворота вала самописца в цифровой код и регистрации (передачи) данных в цифровой форме [3]. Такая автоматизация измерений и

получения данных в цифровой форме, безусловно, полезна. Однако она не улучшает метрологических характеристик метода измерения, реализуемого поплавковым самописцем в колодце. Изучение репрезентативности измерений уровня моря в успокоительных колодцах показало [5], что вода в них существенно отличается от воды в море по температуре и солености вследствие плохого водообмена, возможного подтопления грунтовыми и стоковыми водами. Так, на гидрологическом посту на Павловском мысе ГМС «Севастополь» вода в уровнемерном колодце была по температуре на $8 - 10^{\circ}\text{C}$, а по солености на 12 – 15 единиц практической солености ниже, чем в море [6]. Это приводило к отличию плотности воды в море и в колодце и, независимо от измерителя уровня в колодце, – к погрешности измерения уровня 0,5 – 1%.

Организация проточного режима колодцев для усиления водообмена с морем вряд ли практически возможна по экономическим соображениям (дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты) и нецелесообразна в связи с дополнительной погрешностью от напора или нарушением вертикальной стратификации.

Таким образом, для исключения погрешности измерения уровня моря, вызванной различием средней плотности воды в море и в колодце, необходимо измерять эту плотность и вносить соответствующую поправку в результат измерения уровня.

Другим источником погрешности измерения уровня в уровнемерном колодце может быть погрешность дискретизации, вызванная элиазингом высоких частот, прошедших демпфирующую трубу, соединяющую колодец с морем. Наличие элиазинга верхних частот при интервале дискретизации 1 ч обнаружено по записям уровня с интервалом дискретизации 5 мин [7]. Следовательно, успокоительный колодец не полностью фильтрует частоты с периодом менее 1 ч.

Для правильной интерпретации результатов измерения уровня в колодце вообще необходимо знать его передаточную функцию. Очевидно, что она будет индивидуальной для каждого колодца.

Гидростатические измерители уровня. Наиболее распространены гидростатические измерители уровня, использующие датчики абсолютного или разностного давления, которые устанавливаются ниже уровня «нуля поста». Показания датчика абсолютного давления определяются выражением

$$P = P_a + \int_0^h g\rho(z)dz = P_a + \bar{\rho}gh, \quad (1)$$

где P_a – давление атмосферы; $\rho(z)$ – вертикальный профиль плотности в столбе воды над датчиком; $\bar{\rho}$ – средняя по профилю плотность; g – ускорение силы тяжести в точке установки датчика; h – уровень воды над датчиком.

Поскольку P_a может изменяться, например в диапазоне $\pm 10\%$ от среднего значения 850 гПа, что эквивалентно колебанию уровня вод в пределах ± 1 м, учет P_a при измерении P необходим.

Для исключения P_a используют датчики разностного давления, соединенные трубкой с атмосферой, при этом их показания определяются выражением

$$P_p = \int_0^h g\rho(z)dz = \bar{\rho}gh. \quad (2)$$

Использование отдельного датчика для измерения P_a с последующим исключением атмосферного давления из результата измерения P при обработке данных может оказаться предпочтительнее. При этом погрешность измерения P_a прямо войдет в результат измерения уровня:

$$h = \frac{P - P_a}{\bar{\rho}g} = \frac{P_p}{\bar{\rho}g}. \quad (3)$$

Поскольку, как будет показано ниже, класс точности современных датчиков давления может быть выше, чем современные требования к точности измерения уровня, основным источником методической погрешности гидростатического измерителя уровня является неопределенность значения средней по уровню плотности $\bar{\rho}$. Чтобы определить реальное $\bar{\rho}$, необходимо знать реальный профиль $\rho(z)$.

Из регионального уравнения состояния морской воды (например для Черного моря) [8] можно вычислить $\rho(z)$ по профилям температуры $\theta(z)$, электропроводности $C(z)$ и гидростатического давления $P(z)$, которые также необходимо знать.

Задача определения уровня моря по гидростатическому давлению на «нуле поста» аналогична задаче определения глубины нахождения океанографического прибора по гидростатическому давлению, которая решалась в ряде работ [9, 10]. Если этот прибор является CTD-зондом, то профили $\theta(z)$, $C(z)$, $P(z)$ обычно определяются при зондировании на эту глубину. Если это другой океанографический прибор, то используются данные стандартного моря из климатического массива, которые при расчете глубины дадут погрешность, составляющую единицы процентов [10].

При использовании датчиков давления, установленных в воде ниже уровня «нуля поста» вблизи берега, возможно, нет необходимости контролировать $\rho(z)$, поскольку из-за наличия волнения и перемешивания воды может отсутствовать вертикальная стратификация и тогда $\rho(z) = \text{const} = \bar{\rho}$. Однако знать $\bar{\rho}$ (или $\bar{\theta}$ и $\bar{C}$) необходимо.

При использовании датчиков давления, установленных в успокоительном колодце, где перемешивание отсутствует и возможна вертикальная стратификация, желательно или контролировать $\rho(z)$, или сразу определять $\bar{\rho}$ через измерение $\bar{\theta}$ и $\bar{C}$ датчиками с пространственным (объемным) осреднением.

Поскольку чувствительность ρ к параметрам θ и C примерно одинакова, дисперсия допустимых погрешностей их измерения должна составлять не более трети от дисперсии допустимой погрешности измерения плотности или

уровня [10]. Таким образом, для получения погрешности меньше 1% гидростатические измерители уровня должны быть дополнены измерителями температуры и электропроводимости и стать *CTD*-измерителями уровня. Фильтрующая способность гидростатических измерителей зависит от глубины постановки датчика давления, поскольку амплитуда волн затухает с глубиной по экспоненциальному закону. Однако возможности подавления длинных волн заглублением датчика ограничены вследствие существующей погрешности измерения давления 0,02 – 0,1%, которая определяет абсолютную погрешность измерения уровня 1 – 5 мм.

Пневматические измерители уровня. Пневматические (пузырьковые) измерители уровня [11] можно отнести к гидростатическим измерителям, поскольку в них давление с некоторого горизонта ниже «нуля поста» под поверхностью воды передается на берег с помощью трубки (с открытым в воде концом), заполненной нагнетаемым азотом, пузырьки которого выходят из отверстия; гидростатическое давление измеряется на другом конце трубки на берегу с вычитанием давления атмосферы.

Этим измерителям присущи все погрешности гидростатических разностных измерителей, указанные выше. Кроме того, имеются эксплуатационные трудности по обслуживанию компрессора, и отмечается также плохая работоспособность таких измерителей при сильном волнении.

Акустические измерители уровня. В рамках программы *MedGloss (Mediterrannien Global See Observing Systeme)* в дополнение к уже установленным на постах самописцам уровня для сохранения преемственности наблюдений устанавливаются современные мареографы, в частности акустические [11]. Их принцип действия состоит в измерении времени прохождения звукового импульса туда и обратно между излучателем-приемником и поверхностью воды. Акустический излучатель-приемник располагают в воздухе над наивысшим уровнем в колодце или звуковой трубе для защиты акустической трассы от внешней среды.

Инструментальные метрологические характеристики этих измерителей очень высоки: разрешение по уровню 1 мм; погрешность градуировки $\pm 0,01\%$; погрешность нелинейности $\pm 0,02\%$; допустимая скорость изменения уровня – до 3 м/с и т. д. Однако имеются источники методических погрешностей, которые могут свести эти достоинства на нет. Прежде всего, возникает рассмотренный выше вопрос о репрезентативности наблюдений вследствие возможной разницы средних плотностей воды в море и в трубе (колодце). Акустические измерители выпускаются с диапазонами 10; 15 и 23 м. Поскольку скорость звука в воздухе зависит от температуры и влажности, для измерения в рабочем режиме используется время прихода сигнала, отраженного от точки, расположенной на расстоянии 1,2 м от излучателя-приемника. При этом контролируемая база составляет соответственно 12; 8 и 5% от диапазона измерения. Если на акустической трассе установится плотностная стратификация и, например, средние температуры на трассе и на образцовой базе будут отличаться на 10°C, то погрешность измерения уровня будет достигать 2 см. Нет никаких гарантий того, что средняя скорость на всей трассе всегда равна средней скорости на ее малой части.

Идеальный измеритель уровня. Исходя из изложенного выше, можно сформулировать следующие требования к современному идеальному измерителю уровня. Он должен:

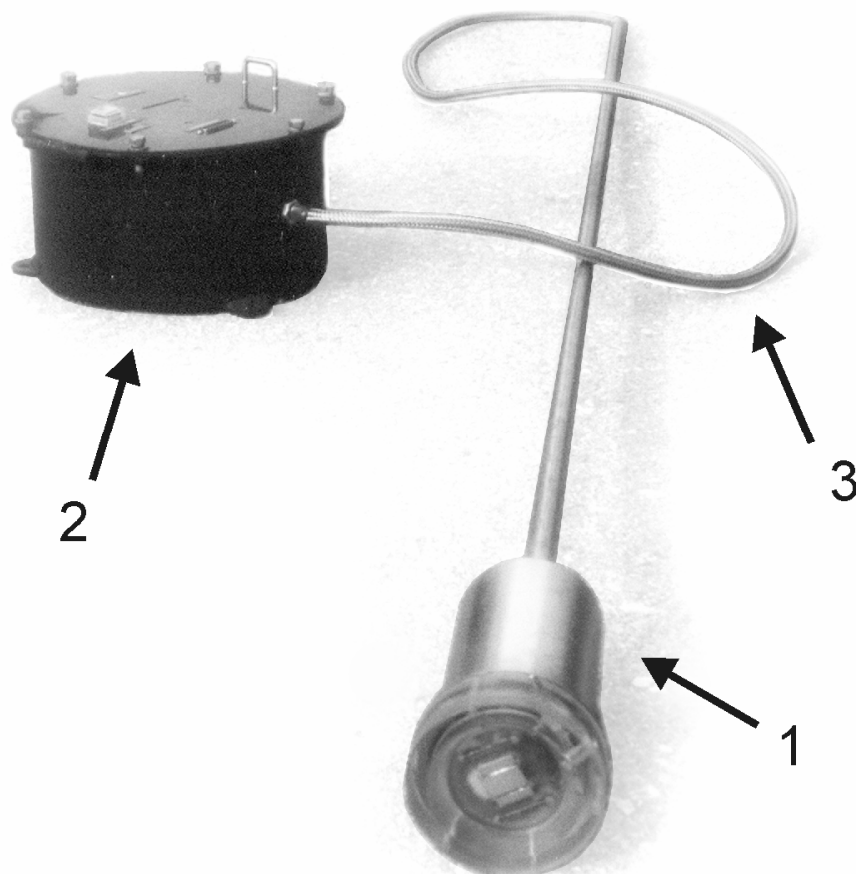
- автоматически измерять в цифровой форме, регистрировать и передавать данные;
- выполнять прямое измерение мгновенного уровня вод непосредственно «*in situ*», аналогично мерной рейке;
- быть инвариантным ко всем другим параметрам среды, кроме уровня вод;
- давать результат измерения, интерпретация которого после обработки была бы совместима с результатами предшествующих многолетних наблюдений традиционными и (или) другими средствами;
- быть пригодным для установки на существующих уровневых постах вместо или совместно с другими средствами без существенного изменения конструкции специальных капитальных сооружений или без таковых;
- сохранять работоспособность в шторм, зимой и при образовании льда.

Поскольку обычно гидрологические посты, кроме измерения уровня, проводят также другие наблюдения, желательно, чтобы измеритель уровня дополнительно выполнял какие-либо из них. Например, определял: профиль температуры в атмосфере и в воде на границе вода – воздух; толщину льда; толщину снега; уровень воды подо льдом.

CTD-измеритель уровня моря ИУМ-1. В последние годы по заказу Гидрометеослужбы Украины в МГИ НАН Украины был создан новый гидростатический измеритель уровня моря ИУМ-1 [12, 13]. Прибор предназначен для автономного измерения уровня моря в стандартных водомерных колодцах без существенного влияния на результат изменений атмосферного давления, солености и температуры воды. Общий вид ИУМ-1 показан на рис. 1.

В состав измерителя входят: блок погружной с датчиками – 1; блок управления с клавишной панелью, флэш-памятью и жидкокристаллическим дисплеем в корпусе, защищенном от вандализма, – 2; кабель связи и питания в соединительной трубке – 3; технологический кабель связи с ПЭВМ; программное обеспечение «*Level*» для ПЭВМ. Прибор измеряет разность давления на фиксированном горизонте в воде и в атмосфере, температуру и электропроводимость воды с устанавливаемым периодом опроса от 22 с и выше. Результаты измерений регистрируются в памяти, по вызову отображаются на дисплее и (или) передаются в ПЭВМ. При расчете уровня учитываются изменения плотности воды в зависимости от солености и температуры.

Метрологические характеристики ИУМ-1 по данным государственных приемочных испытаний приведены в табл. 1, технические характеристики прибора – в табл. 2. Прибор прошел опытную эксплуатацию на уровневом посту на Павловском мысе ГМС «Севастополь» в период 14 июля – 30 ноября 2003 г. Измерения уровня выполнялись с дискретностью 5 мин в одном колодце параллельно с поплавковым самописцем СУМ, который регистрировал отсчеты с периодом 1 ч [7].



Р и с. 1. Общий вид ИУМ-1: 1 – блок погружной; 2 – блок управления; 3 – соединительная трубка с кабелем

Т а б л и ц а 1

Метрологические характеристики ИУМ-1

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Случайная погрешность	Погрешность
Уровень моря, м	0 – 2,00	0,002	$\pm 0,02$
Разностное давление, кПа	0 – 20	0,03%	$\pm 0,15\%$
Температура воды, °C	0 – 35	0,030	$\pm 0,10$
Электропроводимость, отн. ед.	0,01 – 0,9	0,001	$\pm 0,003$

Технические характеристики ИУМ-1

Характеристика	Значение
Тип интерфейса	RS232
Электропитание:	
в автономном режиме от аккумулятора	12 В, 1,2 А·ч
от сети	~ 220 В, 50 Гц, 20 Вт
Автономность по памяти в зависимости от периода регистрации	32 – 1020 сут
Габаритные размеры, мм:	
блок погружной	Ø 80×190
блок управления	Ø 300×160
Масса, кг:	
блок погружной	4
блок управления	12
Диапазон рабочих температур воздуха, °С	30 – 50
Диапазон рабочих атмосферных давлений, кПа (мм рт. ст.)	84 – 106 (630 – 800)
Полный срок службы, лет	не менее 8
Межповерочный интервал, сут	не менее 180

Записи длиннопериодных колебаний уровня обоих приборов совпадали, а амплитуды короткопериодных колебаний после 16-часового осреднения у поплавкового самописца оказались больше, что можно объяснить наличием элиайзинга.

Подтвердилась необходимость контроля температуры и электропроводимости в колодце, без которого погрешность определения уровня была бы в 2-3 раза больше.

ИУМ-1 является составной частью комплекса оборудования морской прибрежной гидрометеостанции «Бриз», в составе которой имеются измерители температуры и электропроводимости воды в прибрежных водах. Это позволяет контролировать различие в плотности воды в колодце и в море и обеспечить репрезентативность наблюдений уровня.

Если обратиться к табл. 1, то можно отметить, что приведенные метрологические характеристики измерительных каналов не являются предельно достижимыми и могут быть на современном уровне «улучшены» по разностному давлению в 15 раз, по температуре в 50 раз, по относительной электропроводимости в 10 раз. Следовательно, точность *CTD*-измерителя уровня

может быть увеличена не менее чем в 10 раз, тогда погрешность измерения уровня будет составлять ± 2 мм. Однако такой измеритель будет иметь и большую стоимость.

Очевидно, что CTD-измеритель уровня моря удовлетворяет только части требований к идеальному измерителю.

Измерители уровня на базе распределенных термопрофилемеров. Представляют интерес возможности распределенных термопрофилемеров по определению положения границ раздела различных сред: воздух – вода (уровень вод), воздух – снег – лед – вода (толщина снежного покрова и льда, уровень вод), воздух – снег – лед – воздух – вода (дополнительно толщина воздушной прослойки подо льдом). Рассмотрим эти возможности термопрофилемеров, которые измеряют текущий профиль температуры среды вдоль датчика $\theta_n(z, t)$.

Как известно [14], принцип действия распределенных термопрофилемеров основан на разложении профиля температуры вдоль термочувствительного кабеля по функциям ортогонального базиса, коэффициенты которых определяются по сопротивлениям проводов.

Для определения положения границ раздела сред, а также по технологическим причинам удобно использовать для модуляции функции Уолша, имеющие вид прямоугольных волн с дискретным шагом по пространству и двоичным значением амплитуд. Используются один, два или три датчика термопрофилемера с подогревом или без, которые устанавливаются в сечении через границы раздела [15 – 19].

Информативными для определения положения границ раздела сред с различными теплофизическими свойствами могут быть профили: температуры среды $\theta_n(z, t)$, коэффициента теплообмена датчика со средой $\alpha(z, t)$, теплоемкости датчика с присоединенной массой $mc(z, t)$, а также динамические и спектральные характеристики этих величин.

Профиль температуры среды $\theta_n(z, t)$. При использовании одного датчика без подогрева, эквивалентного инерционному звену 1-го порядка, уравнение теплового баланса имеет вид

$$[\theta_1(z, t) - \theta_n(z, t)]\alpha(z, t)S + \frac{mc\partial\theta_1(z, t)}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

где $\theta_1(z, t)$ – мгновенная (текущая) температура датчика; $\theta_n(z, t)$ – мгновенная (текущая) температура среды вдоль датчика; mc – погонная теплоемкость датчика; $\alpha(z, t)$ – погонный текущий коэффициент теплообмена датчика со средой; S – погонная площадь внешней поверхности датчика.

Можем записать

$$\theta_n(z, t) = \theta_1(z, t) + \frac{mc}{\alpha(z, t)S} \frac{\partial\theta_1(z, t)}{\partial t}. \quad (5)$$

Если температура слоя среды не изменяется, то не изменяется и локальная температура датчика $\theta_1(z, t)$ и $\frac{\partial\theta_1(z, t)}{\partial t} = 0$. Тогда имеет место устано-

вившийся режим и $\theta_n(z, t) = \theta_1(z, t)$, т. е. профили температуры среды и датчика совпадают. Если граничные слои среды (воздух – снег – лед – воздух – вода) имеют разную температуру, то на вертикальном профиле $\theta_1(z)$ границам раздела сред будет соответствовать максимум производной $\frac{\partial \theta_1(z)}{\partial z}$.

Однако при равенстве или близости температуры слоев этот способ определения границ раздела не работает.

Медленно изменяющиеся профили температуры среды $\theta_n(z)$ и коэффициента теплообмена $\alpha(z)$. Если принять, что конструктивные параметры датчика mc и S известны и постоянны и профиль температуры среды $\theta_n(z)$ и ее физические свойства $\alpha(z)$ не изменяются существенно за несколько (не менее трех) отсчетов профиля температуры датчика $\theta_1(z, t)$, который подогревается переменной мощностью $P(z, t)$, то для двух моментов времени t_i и t_{i+1} получим уравнения теплового баланса

$$P(t_i) = \theta_1(z, t_i)\alpha(z)S - \theta_n(z)\alpha(z)S + mc \frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial t}, \quad (6)$$

$$P(t_{i+1}) = \theta_1(z, t_{i+1})\alpha(z)S - \theta_n(z)\alpha(z)S + mc \frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial t}.$$

Из решения системы уравнений (6) следует

$$\alpha(z) = \frac{P(t_i) - P(t_{i+1}) - mc \left[\frac{\partial \theta_1(z, t_i)}{\partial t} - \frac{\partial \theta_1(z, t_{i+1})}{\partial t} \right]}{S[\theta_1(z, t_i) - \theta_1(z, t_{i+1})]}, \quad (7)$$

$$\theta_n(z) = \frac{[\theta_1(z, t_i) + \theta_1(z, t_{i+1})]\alpha(z)S - [P(t_i) + P(t_{i+1})] + mc \left[\frac{\partial \theta_1(z, t_i)}{\partial t} + \frac{\partial \theta_1(z, t_{i+1})}{\partial t} \right]}{2\alpha(z)S}. \quad (8)$$

В общем случае моменты времени t_i и t_{i+1} произвольны, но условие постоянства $\alpha(z)$ за время измерений налагает требование их близости. С другой стороны, для корректного вычисления $\alpha(z)$ по выражению (7) желательно, чтобы профили температуры датчика $\theta_1(z, t_i)$ и $\theta_1(z, t_{i+1})$ различались как можно больше. Это может быть обеспечено снижением параметра термической инерции за счет $\frac{mc}{S}$ при одновременном увеличении изменчивости мощности нагрева $P(t)$.

Таким образом, реализация динамического режима нагрева датчика с большей изменчивостью во времени, чем изменчивость внешней среды по температуре и коэффициенту теплообмена, позволяет с помощью одного

термопрофилера получить профили температуры среды $\theta_n(z)$ и коэффициента теплообмена датчика со средой $\alpha(z)$.

Поскольку коэффициент теплообмена α зависит от плотности, теплопроводности, кинематической вязкости, удельной теплоемкости среды и скорости обтекания средой датчика, для разных сред воздух – вода он отличается в несколько раз и является более информативным, чем температура для определения положения границ раздела сред, соответствующих максимальным пространственным градиентам $\frac{\partial \alpha(z)}{\partial z}$.

Однако использование одного датчика для измерения $\alpha(z)$ в динамическом режиме затруднено.

Профили коэффициента теплообмена $\alpha(z, t)$ и температуры среды $\theta_n(z, t)$. Определяются при помощи двух термопрофилеров, установленных параллельно в сечении через границу раздела сред.

При использовании двух пассивных датчиков с идентичными конструктивными размерами – диаметром кабеля d и площадью поверхности S (следовательно, равными коэффициентами теплообмена $\alpha_1 = \alpha_2$), но с разной теплоемкостью справедливы следующие выражения [16]:

$$\theta_n(z, t) = \frac{m_2 c_2 \theta_1(z, t) \theta'_2(z, t) - m_1 c_1 \theta_2(z, t) \theta'_1(z, t)}{m_2 c_2 \theta'_2(z, t) - m_1 c_1 \theta'_1(z, t)}, \quad (9)$$

$$\alpha(z, t) = \frac{m_1 c_1 \theta'_1(z, t) - m_2 c_2 \theta'_2(z, t)}{S [\theta_2(z, t) - \theta_1(z, t)]}. \quad (10)$$

Однако невозможно обеспечить изменчивость среды и трудно изготовить идентичные по форме, но различные по теплоемкости датчики.

При использовании одного пассивного, а другого подогреваемого мощностью $P(t)$ датчика с одинаковыми известными конструктивными параметрами m, c, S справедливы следующие выражения [17]:

$$\theta_n(z, t) = \frac{\theta_1(z, t) \left[\theta'_2(z, t) - \frac{P(z, t)}{mc} \right] - \theta_2(z, t) \theta'_2(z, t)}{\theta'_2(z, t) - \frac{P(z, t)}{mc} - \theta'_1(z, t)}, \quad (11)$$

$$\alpha(z, t) = \frac{mc [\theta'_1(z, t) - \theta'_2(z, t)] + P(t)}{S [\theta_2(z, t) - \theta_1(z, t)]}. \quad (12)$$

Упростим выражение (12). Введем обозначение $\theta_2(z, t) - \theta_1(z, t) = \Delta\theta(z, t)$ и получим для скользящего среднего на интервале τ значение $\alpha(z, t)$:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \alpha(z, t) dt = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{P(z, t)}{S \Delta \theta(z, t)} dt + \frac{mc}{\tau S} \int_{t-\tau}^t \frac{\Delta \theta'(z, t)}{\Delta \theta(z, t)} dt, \quad (13)$$

$$\bar{\alpha}_\tau(z, t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{P(z, t)}{S \Delta \theta(z, t)} dt + \frac{mc}{\tau S} \ln \left| \frac{\Delta \theta(z, t + \tau)}{\Delta \theta(z, t)} \right|. \quad (14)$$

Если $P(z, t)$ – периодическая функция с периодом τ , то $\Delta \theta(z, t)$ – также периодическая функция с периодом τ и $\frac{\Delta \theta(z, t + \tau)}{\Delta \theta(z, t)} = 1$, $\ln 1 = 0$, и для среднего на интервале τ коэффициента теплообмена $\bar{\alpha}_\tau(z, t)$ получим

$$\bar{\alpha}_\tau(z, t) = \frac{1}{S \tau} \int_{t-\tau}^t \frac{P(z, t)}{\Delta \theta(z, t)} dt, \quad (15)$$

где функции $P(z, t)$ и $\Delta \theta(z, t)$ известны и интеграл в выражении (15) берется численно.

Если $P(z, t) = \text{const} = P(z)$ и изменчивость во времени среды мала так, что $\Delta' \theta(z, t) = 0$, то в стационарном режиме

$$\alpha(z) = \frac{P(z)}{S \Delta \theta(z)}. \quad (16)$$

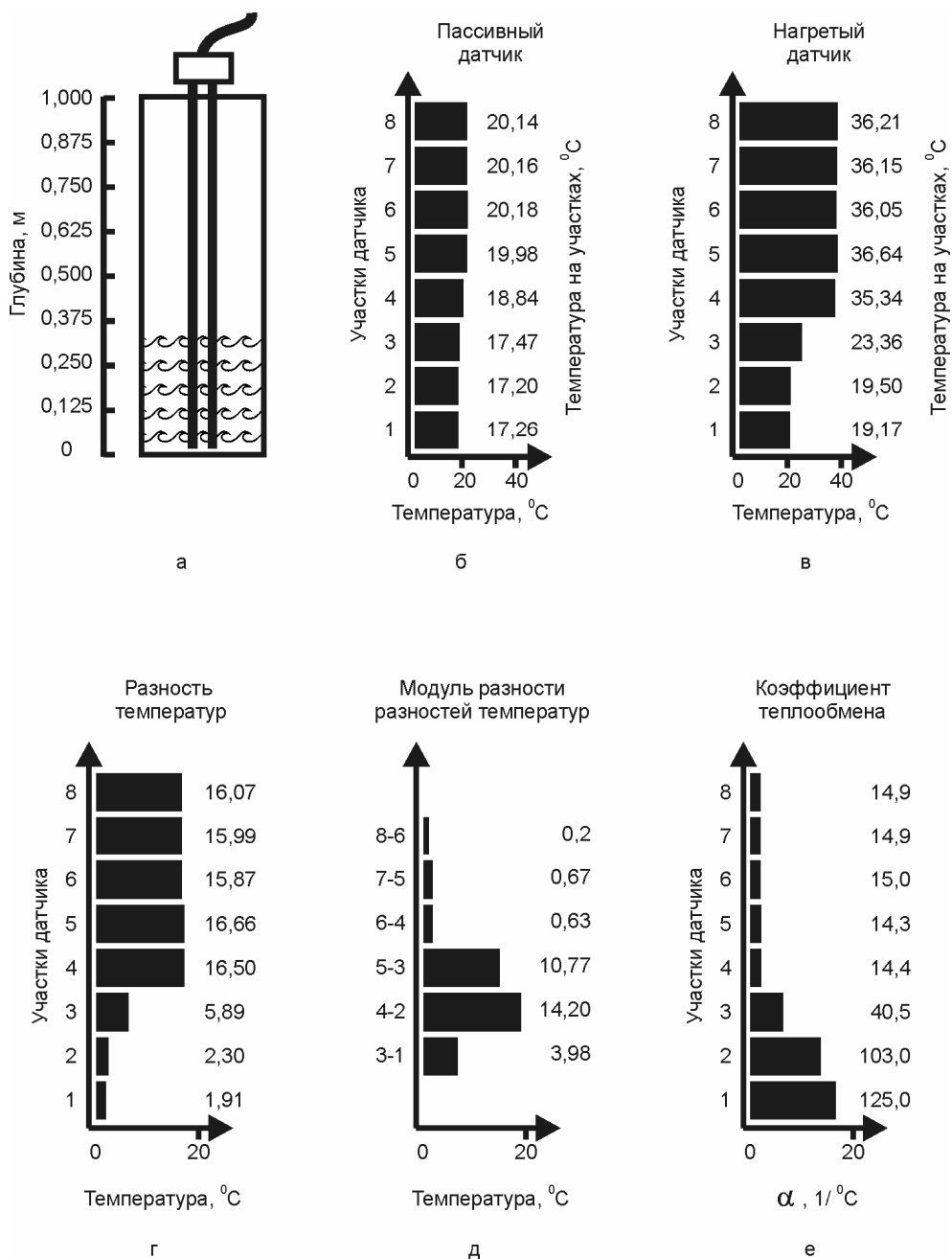
Если термопрофилемер реализован на базе функций Уолша, то профиль $\Delta \theta(z)$ будет представлять собой ступенчатую функцию, ширина ступеньки которой равна шагу Δz функции Уолша, а высота ступеньки равна средней на Δz разности температур $\Delta \bar{\theta}(z)$. Если граница раздела двух сред пересекает z -ю ступеньку, то максимальная разница высот у двух соседних ступенек $(z-1)$ и $(z+1)$ будет равна $\Delta \bar{\theta}(z+1) - \Delta \bar{\theta}(z-1)$. Значение $\Delta \bar{\theta}(z)$ позволяет интерполировать положение границы раздела внутри z -й ступеньки как

$$\frac{\Delta \bar{\theta}(z) - \Delta \bar{\theta}(z-1)}{\Delta \bar{\theta}(z+1) - \Delta \bar{\theta}(z-1)} \Delta z. \quad (17)$$

Если граница раздела является уровнем h , то его значения вычисляются по выражению

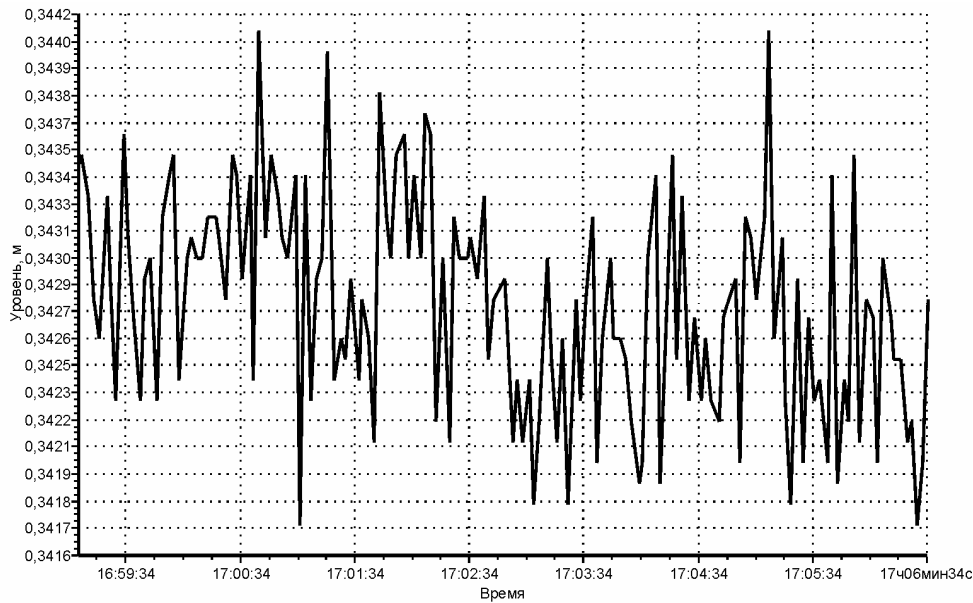
$$h = \Delta z(z-1) + \Delta z \left[\frac{\Delta \bar{\theta}(z) - \Delta \bar{\theta}(z-1)}{\Delta \bar{\theta}(z+1) - \Delta \bar{\theta}(z-1)} \right]. \quad (18)$$

На рис. 2 представлены результаты эксперимента с двумя распределенными термопрофилемерами Уолша длиной по одному метру с пространственным шагом $\Delta z = 0,125$ м. Один датчик пассивный, другой подогревается равномерно общей постоянной мощностью 3 Вт.



Р и с. 2. Результаты эксперимента с распределенным термопрофилемером Уолша: *а* – датчики в сосуде с водой на уровне $h = 0,343$ м; *б* – профиль температуры пассивного датчика $\theta_1(z)$; *в* – профиль температуры нагретого датчика $\theta_2(z)$; *г* – профиль разности температур $\Delta\theta(z) = \theta_2(z) - \theta_1(z)$; *д* – профиль модуля разности разностей температур на соседних участках $\Delta\theta(z+1) - \Delta\theta(z-1)$; *е* – профиль коэффициента теплообмена $\alpha(z)$

Вычисление уровня выполнялось по выражению (18). Измеренный уровень воды в сосуде составил 0,343 м. Колебания реального уровня вместе с инструментальными шумами во времени приведены на рис. 3.



Р и с. 3. Измеренный распределенным термопрофилемером уровень воды во времени

Эксперимент показал, что для конкретного датчика с шагом 0,125 м и мощностью нагрева 3 Вт/м возможно определение уровня (или положения нескольких границ раздела слоев) с погрешностью $\pm 0,1\%$ (± 1 мм).

Если требуется определять границы раздела многослойных сред, то шаг модуляции датчика должен быть меньше предполагаемой толщины слоя.

Профили температуры среды $\theta_n(z, t)$, коэффициента теплообмена $\alpha(z, t)$ и теплоемкости $(mc)(z, t)$. В случае, когда на датчики налипают снег или лед и локально изменяется удельная теплоемкость $(mc)(z)$, ее можно определить при использовании трех идентичных распределенных датчиков с разными мощностями нагрева $P_1(z, t)$, $P_2(z, t)$, $P_3(z, t)$ [19]. При этом справедливы выражения

$$(mc)(z, t) = \frac{[P_3(t) - P_1(t)][\theta_2(t) - \theta_1(t)] - [P_2(t) - P_1(t)][\theta_3(t) - \theta_1(t)]}{[\theta_3(t) - \theta_1(t)][\theta'_2(t) - \theta'_1(t)] - [\theta_2(t) - \theta_1(t)][\theta'_3(t) - \theta'_1(t)]}, \quad (19)$$

$$\alpha(z, t)S = \frac{[P_3(t) - P_1(t)][\theta'_2(t) - \theta'_1(t)] - [P_2(t) - P_1(t)][\theta'_3(t) - \theta'_1(t)]}{[\theta_3(t) - \theta_1(t)][\theta'_2(t) - \theta'_1(t)] - [\theta_2(t) - \theta_1(t)][\theta'_3(t) - \theta'_1(t)]}, \quad (20)$$

$$\theta_n(z, t) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left[\theta_i(z, t) - \frac{mc\theta'_i(t) + P_i(t)}{\alpha(z, t)S} \right]. \quad (21)$$

Профиль температуры среды $\theta_n(z, t)$ вычисляется по (21) как средний по трем профилям $\theta_i(z, t)$ ($i = 1, 2, 3$).

Таким образом, распределенные термопрофиломеры реагируют на изменение различных параметров внешней среды вдоль профиля, что позволяет определять границы сред.

Заключение

1. Из всех существующих технологий с косвенным измерением уровня наиболее корректным и удобным в реализации и эксплуатации является метод с использованием CTD-измерителя.

2. Требованиям идеального измерителя уровня больше других соответствуют *электронные мерные рейки*, реализованные на основе термопрофиломеров. Технологии с их использованием представляются наиболее перспективными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18452-73. Океанология. Уровень моря. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1973. – 5 с.
2. Объединенный стратегический план прибрежного модуля Глобальной системы наблюдений за океаном / Отчет ГСНО № 125; серия информационных документов МОК № 1183. – ЮНЕСКО, 2003.
3. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее / Под ред. В.Н. Еремеева. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – 210 с.
4. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 448 с.
5. Забурдаев В.И., Логвинчук А.Н. О корректности измерений уровня моря в уровнемерных колодцах // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – С. 62 – 64.
6. Греков Н.А., Забурдаев В.И., Клименко А.В. и др. Результаты исследовательских испытаний гидростатического уровнемера ИУМ-1 // Системы контроля окружающей среды / Методические, технические и программные средства. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. – С. 13 – 25.
7. Греков Н.А., Забурдаев В.И., Гайский П.В. и др. Результаты опытной эксплуатации измерителя уровня моря ИУМ-1 // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – С. 53 – 66.
8. Забурдаев В.И., Гайский П.В. Практические формулы взаимосвязи давления и глубины в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 6. – С. 36 – 44.
9. Saunderson P.M. Practical conversion of pressure to depth // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – 11. – P. 573 – 574.
10. Забурдаев В.И., Логвинчук А.Н. Требование к метрологическим характеристикам и алгоритмам обработки данных гидростатических измерителей уровня воды // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2002. – С. 108 – 118.
11. Логвинчук А.Н. Обзор методов и средств измерения уровня моря // Там же. – 2005. – С. 47 – 52.
12. Гайский В.А., Греков Н.А., Гайский П.В. и др. Измеритель уровня моря // Там же. – 2001. – С. 67 – 70.
13. Гайский В.А., Греков Н.А., Гайский П.В. и др. СТД-измеритель уровня моря ИУМ-1 // Там же. – 2003. – С. 5 – 12.

14. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // Морской гидрофизический журнал. – 1999. – № 6. – С. 46 – 76.
15. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Определение положения границ раздела сред с помощью распределенных термопрофилемеров // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – С. 65 – 69.
16. *Патент України № 58633.* Спосіб визначення положення меж розподілу середовищ. Гайський В.О., Гайський П.В. – Опубл. 15.08.2003. Бюл. № 8.
17. *Патент України № 67847.* Спосіб визначення положення меж розподілу середовищ. Гайський В.О., Гайський П.В. – Опубл. 15.07.2004. Бюл. № 7.
18. *Гайский В.А., Егунов Н.Д., Корнюшин Ю.П.* Применение функций Уолша в системах автоматизации научных исследований. – Киев: Наук. думка, 1993. – 210 с.
19. *Патент України № 74904.* Спосіб вимірювання параметрів газів та рідин. Гайський В.О., Гайський П.В. – Опубл. 15.02.2006. Бюл. № 2.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

Материал поступил
в редакцию 25.02.09
После доработки 06.04.09

АНОТАЦІЯ Проводиться аналіз сучасних методів і засобів вимірювання рівня моря і вод суші, дається опис створеного в МГІ НАН України *CTD*-вимірювача рівня моря, формулюються вимоги до ідеального вимірника рівня вод і показується, що таким приладом може бути *електронна мірна рейка* на базі розподілених термопрофілеметрів Уолша.

ABSTRACT Modern methods and means of measurement of sea and land water levels are analyzed. Description of *CTD*-sea level meter developed in MHI NAS of Ukraine is given. Requirements to ideal water level measuring instrument are formulated. It is shown that *electronic sounding stick* based on the distributed Wolsh thermoprofilemeters, can be such a device.