

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО УРОВНEMЕРА ИУМ - 1

**Н.А.Греков, В.И.Забурдаев, А.В.Клименко,  
А.Н.Логвинчук, В.Ж.Мишуров, М.Н.Пеньков**

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: [oaoi@alfa.mhi.iuf.net](mailto:oaoi@alfa.mhi.iuf.net)

*В статье приводятся результаты лабораторных испытаний гидростатического измерителя уровня моря, содержащего каналы измерения давления, температуры и относительной электропроводимости, в части оценки вида градуировочных характеристик, диапазона измерения по каждому каналу, разрешающей способности, функций влияния пониженной и повышенной температуры на метрологические характеристики прибора, а также предварительные результаты опытной эксплуатации уровнемера в штатных морских условиях.*

**Введение.** Измерение уровня моря является одной из главных задач гидрометеорологических наблюдений, так как изменение уровня является следствием изменчивости гидрологических и метеорологических процессов в самом море или в атмосфере над ним. В последние годы особенно важной стала проблема калибровки аэрокосмических средств, обеспечивающих дистанционное измерение уровня моря для изучения глобальных процессов в океанах и морях, влияющих на изменчивость погоды и климата. Для этой цели необходимо иметь высокоточные (реперные) измерители уровня, стационарно установленные в характерных точках береговых линий или в акватории морей и океанов. Поэтому задача создания и внедрения вместо устаревшего оборудования высокоточных отечественных измерителей уровня в настоящее время становится весьма актуальной.

Гидростатические измерители уровня получили широкое распространение благодаря своей простоте. Однако отсутствие контроля за плотностью морской воды (см., например, [1]) не позволяет измерить уровень с погрешностью менее  $\pm 3\%$  при требуемых ( $0,1 \div 0,2\%$ ). Выполненный в работе [2] анализ допустимых погрешностей измерения гидростатического давления, плотности, температуры, солености, а также алгоритмов

обработки информации накладывает жесткие требования к точности измерения этих параметров.

В настоящей работе приводятся краткая методика и результаты исследовательских испытаний каналов измерения давления, температуры, электропроводимости (солености) измерителя уровня ИУМ-1 на соответствие этим требованиям.

**Объект, цель, объем и методика испытаний.** Гидростатический измеритель уровня моря ИУМ – 1 разработан, изготовлен и испытан в отделе автоматизации океанографических исследований (ОАОИ) Морского гидрофизического института НАН Украины по заданию Государственной гидрометеорологической службы министерства экологии и природных ресурсов Украины.

Подробное описание измерителя уровня и его технические характеристики приведены в работе [3].

На лабораторном этапе исследовательских испытаний проводилась проверка выбранных технических решений измерителя уровня на соответствие требованиям технического задания в части оценки диапазона измерений, вида градуировочных характеристик, разрешающей способности по каналам измерения давления, относительной электропроводимости, температуры и оценки дополнительных температурных погрешностей для учета при алгоритмической коррекции в процессе первичной обработки информации.

На этапе натурных (морских) испытаний проводилась оценка эксплуатационных показателей измерителя в период постановок в штатные колодцы для регистрации изменчивости уровня моря на Павловском мысе в г. Севастополе и на морском экспериментальном полигоне МГИ НАНУ в п. Кацивели (вблизи Симеиза).

Диапазон измерений гидростатического давления, вид градуировочной характеристики и разрешающая способность канала измерения давления проверялись с помощью установки, показанной на рис.1. Гидростатическое давление вычислялось по высоте водяного столба с помощью уравнения гидростатики

$$P_s = 10^{-4} \cdot H_s \cdot \bar{\rho} \cdot g, \quad (1)$$

где  $P_s$  - устанавливаемое гидростатическое давление, дбар ( $1 \text{ дбар} = 10^4 \text{ Па}$ );  $H_s$  - высота водяного столба от уровня входного

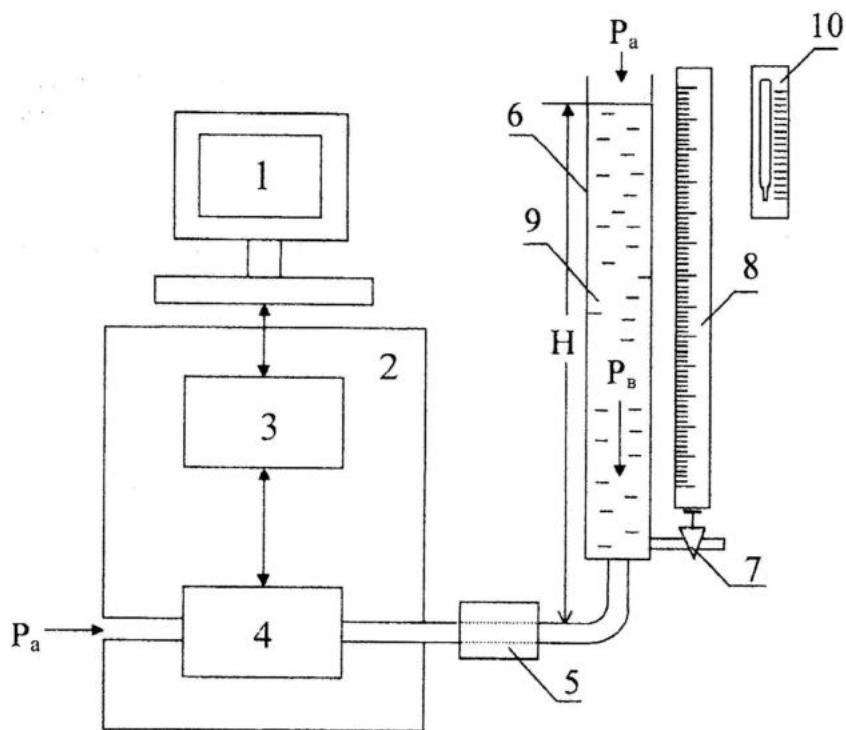


Рис. 1 - Установка для градуировки канала измерения давления

1- ПЭВМ; 2 - уровнемер; 3 - приемный блок уровнемера; 4 - погружной блок уровнемера; 5 - соединительная муфта; 6 - напорный цилиндр; 7 - сливной кран; 8 - мерная линейка; 9 - вода; 10 - термометр;  $P_a$  - атмосферное давление, дбар;  $P_b$  - давление водяного столба;  $H$  - высота водяного столба.

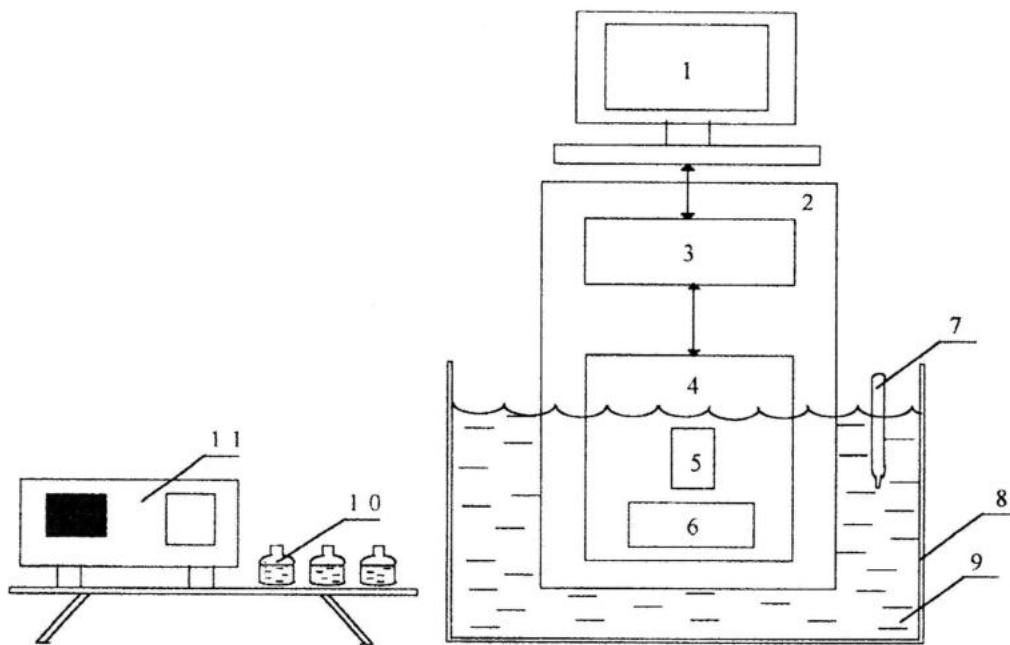


Рис. 2 - Установка для градуировки канала измерения относительной электропроводимости

1 - ПЭВМ; 2 - уровнемер; 3 - приемный блок уровнемера; 4 - погружной блок уровнемера; 5 - датчик температуры; 6 - контактный датчик электропроводимости уровнемера; 7 - контрольный термометр; 8 - градуировочный бак; 9 - рабочий раствор; 10 - отобранные пробы воды; 11 - лабораторный солемер.

патрубка датчика давления, м;  $\bar{\rho}$  - средняя плотность воды в напорном цилиндре, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения в месте нахождения установки, м/с<sup>2</sup>.

Плотность пресной воды, заливаемой в напорный цилиндр, вычислялась по уравнению состояния УС-1980 [4] для атмосферного давления по данным температуры при солености, равной нулю.

Высота столба отсчитывалась по мерной линейке с погрешностью  $\pm 0,001$  м.

Вид градуировочной характеристики давался в полиномиальной форме

$$P = a_0 + a_1 \cdot N_p + a_2 \cdot N_p^2 + \dots + a_n \cdot N_p^n, \quad (2)$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n$  - градуировочные коэффициенты, вычисляемые по методу наименьших квадратов по массивам исходных данных устанавливаемых значений давления  $P_{usm}$  и цифровых отсчетов канала измерения  $N_p$  уровнямера.

Разрешающая способность (порог чувствительности) оценивалась по формуле

$$\gamma_p = \left| \frac{dP}{dN_p} \right| \cdot |\Delta N_p|, \quad (3)$$

где  $\frac{dP}{dN_p}$  - производная по давлению градуировочной характеристики (2);  $\Delta N_p$  - нестабильность выходного кода канала измерения давления в единицах наименьшего разряда при фиксированном входном давлении.

Оценка вида градуировочной характеристики, диапазона измерений и разрешающей способности по каналу измерения относительной электропроводимости производилась с помощью установки, показанной на рис. 2.

Изменение относительной электропроводимости в градуировочном баке осуществлялось посредством последовательного разведения исходной морской воды с соленостью  $S = 17,33$  пресной водой. Соленость рабочего раствора измерялась лабораторным солемером типа ГМ-65. Конкретное значение относительной электропроводимости проб вычислялось в соответствии со шкалой практической солености ШПС - 1978 по солености и температуре рабочего раствора [5].

Оценка вида градуировочной характеристики, диапазона измерений и разрешающей способности канала измерения относительной электропроводимости производилась аналогично выше рассмотренной методике оценок этих характеристик по каналу измерения давления.

При испытаниях на воздействие пониженной и повышенной температуры на показания канала измерения электропроводимости штатный датчик электропроводимости был заменен эквивалентом (имитатором), как это показано на рис. 3. Это позволило определить дополнительную температурную погрешность измерителя электропроводимости, вызванную температурной нестабильностью только электронной схемы канала (без первичного преобразователя - четырехэлектродной контактной ячейки). Дополнительная температурная погрешность собственно датчика электропроводимости, зависящая от изменчивости геометрической постоянной, определялась расчётным путём по температурному коэффициенту оргстекла, из которого сделан датчик

$$\frac{\Delta k_R}{k_R} = \alpha_R \cdot \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2} \quad (4)$$

где  $k_R$  - геометрическая постоянная датчика;  $\Delta k_R$  - абсолютное изменение геометрической постоянной датчика;  $\alpha_R$  - температурный коэффициент линейного расширения оргстекла;  $t_{\max}, t_{\min}$  - максимальное и минимальное значение рабочей температуры.

В связи с тем, что в качестве штатного измерителя температуры в уровнямере выбрана микросхема типа DS1624, с выхода которой снимается информация в цифровой форме непосредственно в градусах Цельсия, экспериментальная оценка градуировочной характеристики, диапазона измерений и разрешающей способности не производилась. Все данные были взяты из паспорта на микросхему. Испытания были направлены на исследование индивидуального отклонения показаний температуры микросхемой DS1624 от показаний образцового термометра в рабочем диапазоне температуры от  $-2$  до  $30^{\circ}\text{C}$ . После этого находилась формула связи реальной температуры  $t$  с показаниями температуры микросхемой DS 1624  $t_{DS}$

$$t = t_{DS} + (b_0 + b_1 \cdot t_{DS} + b_2 \cdot t_{DS}^2 + \dots + b_n \cdot t_{DS}^n), \quad (5)$$

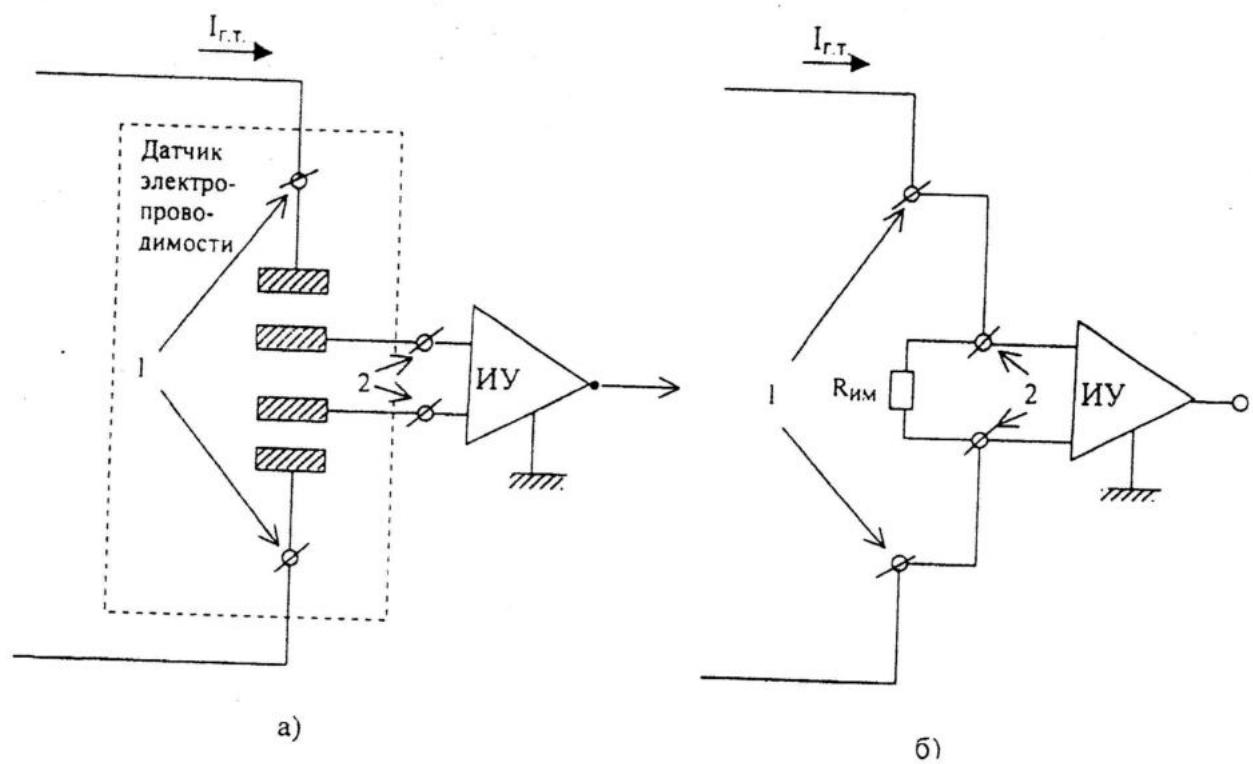


Рис. 3 - Штатная схема включения датчика электропроводимости (а) и схема включения (б) имитатора датчика электропроводимости  $R_{им}$  (датчик электропроводимости снят); 1 - контакты токовых электродов датчика; 2 - контакты потенциальных электродов датчика.

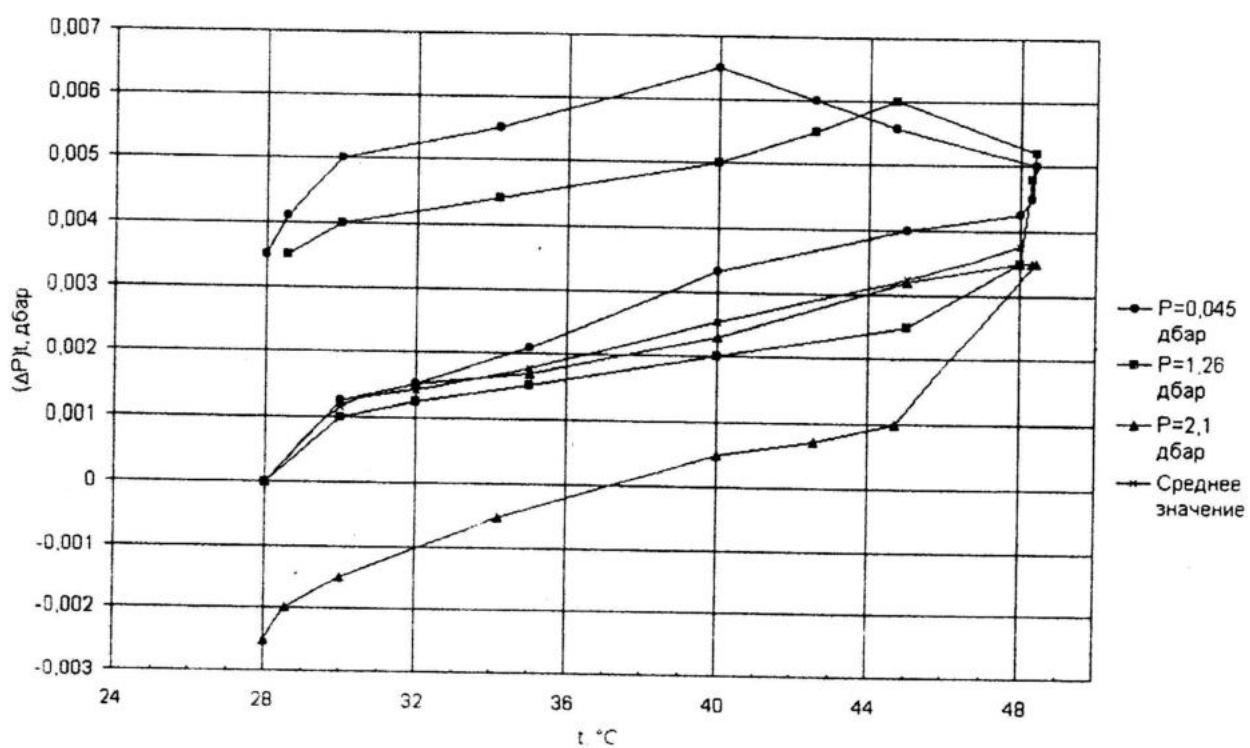


Рис.4 – Зависимость отклонения показаний измерителя давления от температуры

где  $b_0, b_1, \dots, b_n$  – коэффициенты полинома поправки к показаниям температуры микросхемой DS 1624, находящиеся по методу наименьших квадратов по величинам экспериментально найденной поправки для конкретных значений  $t_{DS}$ .

Воздействие пониженной и повышенной температуры на показания измерительных каналов уровнемера, на работоспособность запоминающего устройства, а также на прохождение команд управления, информации с блока приёмного на блок погружной и наоборот и на работоспособность устройств визуальной индикации в приёмном блоке проверялось при одновременном помещении приёмного и погружного блоков в камеру тепла (температура  $45 \pm 50 {}^{\circ}\text{C}$ ) и в камеру холода (температура минус  $(16-20) {}^{\circ}\text{C}$ ). При этом информация записывалась с помощью ПЭВМ как на переходных этапах изменения температуры от комнатной до максимальной (или минимальной), от максимальной (или минимальной) до комнатной, а также на этапах установившейся максимальной и минимальной температуры.

По результатам испытаний вычислялся относительный температурный коэффициент изменчивости показаний по каналам измерения давления, относительной электропроводимости и контроля напряжения питания по формуле

$$(T.K.)_i = \frac{(A_t)_i - (A_m)_i}{A_{d,i}} \cdot \frac{1}{t - t_u}, \quad (6)$$

где  $(T.K.)_i$  – температурный коэффициент любого измерительного канала;  $(A_t)_i, (A_m)_i$  – показания любого измерительного канала при повышенной и пони-

Таблица 1 - Допустимые погрешности измерительных каналов и вычислительных алгоритмов измерителя уровня моря

Погрешности измерения			Погрешность определения ускорения свободного падения, %	Погрешность алгоритмов вычисления	
по каналу давления, %	по каналу температуры, ${}^{\circ}\text{C}$	по каналу относительной электропроводимости		солёности, е.п.с.	плотности, $\text{kg/m}^3$
$\pm 0,12$	$\pm 0,3$	$\pm 0,066$	$\pm 0,12$	$\pm 0,38$	$\pm 0,62$

женной температуре  $t$  и при температуре  $t_u$  перед началом повышения или понижения температуры соответственно;  $A_{d,i}$  – диапазон измерения показаний по любому измерительному каналу, оговоренный техническим заданием.

Оценка ожидаемых значений температурных погрешностей в любом канале производилась по формулам:

для абсолютных погрешностей

$$(\Delta A_t)_i = \frac{(A_t)_i - (A_m)_i}{t - t_u} \cdot \Delta t_p, \quad (7)$$

для относительных погрешностей в любом канале (в процентах)

$$(\delta_t)_i = 100 \cdot (T.K.)_i \cdot \Delta t_p, \quad (8)$$

$$\text{где } \Delta t_p = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} \quad (9)$$

$t_{\max} = +30 {}^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\min} = -2 {}^{\circ}\text{C}$  – максимальная и минимальная температура в рабочих условиях эксплуатации.

В таблице 1 приведены допустимые суммарные погрешности измерительных каналов давления, температуры и относительной электропроводимости, а также погрешности определения ускорения свободного падения и алгоритмов вычисления солёности, плотности, заимствованные из работы [2] и обеспечивающие заданную в техническом задании допустимую погрешность измерения уровня моря при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  не более 0,2 % при изменении уровня моря от 0 до 2 м.

**Результаты испытаний.** В таблице 2 приведен массив экспериментальных данных, полученных при исследовании функции преобразования канала измерения давления. Установливаемое давление вычислялось с помощью формулы (1) по высоте водяного столба и средней плотности  $\bar{\rho}_a = 997,14 \text{ кг/м}^3$  при окружающей температуре  $t_{окр} = 25^\circ\text{C}$ . Погрешность измерения температуры с помощью внешнего термометра 10 (см. рис. 1) не превышала  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ , что позволило определить плотность с погрешностью не более  $\pm 0,06 \text{ кг/м}^3$  [4], а давление столба жидкости - с погрешностью не более  $\pm 0,06 \%$ .

Градуировочная характеристика определялась отдельно для случаев возрастания и убывания давления. При этом был обнаружен

барический гистерезис с максимальной шириной петли  $(\Delta P)_r = 0,005 \text{ дбар}$  в эквиваленте давления. В табл. 2 приведены экспериментальные данные, полученные при возрастающем давлении.

Градуировочная характеристика канала давления имеет вид

$$P = a_1 + 5,06602 \cdot 10^{-4} \cdot N_p + 4,2191 \cdot 10^{-9} \cdot N_p^2 - 4 \cdot 10^{-13} \cdot N_p^3, \quad (10)$$

где  $a_1 = 0,013696$  - для случая монотонного возрастания давления;  $a_2 = 0,008696$  - для случая монотонного убывания давления;  $a_3 = 0,011196$  - для единой характеристики для обоих направлений изменения давления.

Таблица 2 - Результаты испытаний измерительного канала давления в нормальных условиях ( $t_{\text{раб}} = t_{\text{тр}} = 25^\circ\text{C}$ ) при возрастании давления

Высота столба, $H_i, \text{ м}$	Установленное давление, $P_{\text{уст},i}, \text{ дбар}$	Показание канала в коде, $N_{p,i}, \text{ ед.}$	Показание канала в давлении, $P_i, \text{ дбар}$	$\Delta P_i = P_i - P_{\text{уст},i}, \text{ дбар}$	$\delta_{p,i}, \%$
0,045	0,0440	$59 \pm 1$	0,04360	-0,00040	-0,02
0,675	0,66064	$1269 \pm 1$	0,66255	+0,00191	+0,095
1,255	1,2274	$2356 \pm 1$	1,22554	-0,00185	-0,092
1,575	1,54030	$2960 \pm 1$	1,53983	-0,00047	-0,023
1,848	1,80730	$3474 \pm 1$	1,80778	+0,00048	+0,024
1,860	1,81910	$3496 \pm 1$	1,81925	+0,00015	+0,007
2,100	2,05380	$3947 \pm 1$	2,05439	+0,00059	+0,030

Оценки среднего квадратического отклонения погрешности аппроксимации градуировочной характеристики канала измерения давления при монотонном возрастании или убывании давления, сделанные по столбцам  $\Delta P_i$  и  $\delta_{p,i}$  табл. 2 составляют: в эквиваленте абсолютной погрешности  $\sigma_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ дбар}$ ; в эквиваленте приведённой относительной погрешности

$$\gamma_p = \frac{\sigma_p}{P_{\max} - P_{\min}} \cdot 100 = 0,06 \%.$$

Погрешность аппроксимации градуировочной характеристики выражением (10) при

доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  при условии нормального закона распределения погрешности для монотонного возрастания и убывания давления составит

$$\Delta P = \pm 2 \cdot \sigma_p = \pm 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ дбар},$$

$\delta_p = \pm 2\gamma_p = \pm 0,12 \%$  в эквиваленте абсолютной и относительной погрешностей соответственно.

Аналогичные оценки погрешности для единой градуировочной характеристики составят

$$(\Delta P)_{\Sigma} = \pm \left( \frac{(\Delta P)_r}{2} + 2 \cdot \delta p \right) = \pm 0,005 \text{ дбар} \quad \text{и}$$

$$(\delta_p)_{\Sigma} = \pm \left( \frac{\Delta P_r}{2 \cdot (P_{\max} - P_{\min})} \cdot 100 + 2\gamma_r \right) = \pm 0,24\%$$

Разрешающая способность измерительного канала в эквиваленте порога чувствительности при монотонном возрастании или убывании давления и постоянной температуре составляет одну единицу наименьшего разряда  $\Delta N_p = 1$ , что в эквиваленте давления соответствует

$$\gamma_p = \left| \frac{dP}{dN_p} \right|_{\max} \cdot |\Delta N_p| = 5,07 \cdot 10^{-4} +$$

$$+ 8,4 \cdot 10^{-9} \cdot N_p - 12 \cdot 10^{-13} \cdot N_p^2 = 0,00052 \text{ дБар.}$$

На рис. 4 приведены графики изменчивости показаний измерителя давления с возрастанием и убыванием температуры, в которых в явной форме отображается температурный гистерезис. Максимальное значение температурного гистерезиса наблюдается при давлении  $P_1 = 0,0045$  дБар и  $P_2 = 1,26$  дБар и достигает  $+0,0035$  дБар. При максимальном давлении ( $P_3 = 2,1$  дБар) гистерезис составляет  $-0,002$  дБар. Средний или номинальный температурный коэффициент при возрастающей температуре для всех трех значений давления составляет

$$\overline{TK}_p = + \frac{(\overline{\Delta P}) \cdot t}{\Delta t} \approx \frac{0,004}{20} = + 2 \cdot 10^{-4} \text{ дБар/}^{\circ}\text{C}.$$

При этом отличие индивидуального температурного коэффициента от среднего может составлять  $\Delta TK_p = \pm 0,25 \cdot 10^{-4}$  дБар/°C для разных значений давления.

Средний температурный коэффициент может быть использован для алгоритмической коррекции температурной погрешности. Индивидуальное отличие температурного коэффициента от среднего значения сравнительно мало и в этой части неисключенная температурная погрешность не превысит величины

$$(\Delta P)_{t,H} \leq \Delta TK_p \cdot \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2} = \\ = \pm 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ дБар.}$$

Однако, гистерезис, проявляющийся при смене знака изменения температуры, в случае его неучета, приводит к дополнительной температурной погрешности, лежащей в пределах от  $-2,5 \cdot 10^{-3}$  дБар до  $+4 \cdot 10^{-3}$  дБар в зависимости от измеряемого давления.

Алгоритмически учесть гистерезис возможно только при длительном монотонном изменении температуры с обязательным знанием временной последовательности отсчетов и "ширины" переходной зоны, когда температурная погрешность с кривой при возрастании температуры переходит на кривую при понижении температуры и наоборот.

Ожидаемая суммарная погрешность  $(\Delta P)_{\Sigma}$  измерения давления, включая погрешность аппроксимации  $\Delta P_{\text{изм.}}$ , неисключенную температурную погрешность  $(\Delta P)_{t,H}$ , погрешность от неисключенного барического  $(\Delta P)_{B,z}$  и температурного  $(\Delta P)_{T,z}$  гистерезисов при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  составит

$$(\Delta P)_{\Sigma} = \\ = \sqrt{(\Delta P_{\text{изм.}})^2 + (\Delta P)_{t,H}^2 + (\Delta P)_{B,z}^2 + (\Delta P)_{T,z}^2} = \\ = \sqrt{(0,0024)^2 + (0,4 \cdot 10^{-3})^2 + (0,005)^2 + (0,004)^2} = \\ = \pm 0,007 \text{ дБар},$$

что в эквиваленте относительной приведенной погрешности соответствует  $(\delta_p)_{\Sigma} = \pm 0,35\%$ .

В табл. 3 приведены исходные данные для градуировки канала измерения относительной электропроводимости.

Градуировочная характеристика по каналу измерения относительной электропроводимости имеет вид

$$R_{\text{изм.}} = 1,4616 - 6,9488 \cdot 10^{-4} \cdot N_R + \\ + 9,972 \cdot 10^{-8} \cdot N_R^2. \quad (11)$$

Таблица 3 – Исходные данные для оценки градуировочной характеристики измерителя электропроводимости

№ п/п	Номер пробы	Сolenость пробы, $S_i$	Температу- ра пробы, $t_{\text{проб.} i}$ , °C	Относительная электропрово- димость пробы, $R_i$	Отсчет показаний в коде, $N_{R,i}$ , ед.	Отсчет пока- заний элек- тропроводи- мости, $R_{\text{изм.} i}$	$\Delta R_i =$ $= R_{\text{изм.} i} - R_i$
1	1	17,33	26,78	0,67978	1408 ± 1	0,68086	+0,00108
2	4	12,133	26,12	0,47965	1981 ± 1	0,47634	-0,00332
3	7	7,56	27,70	0,33660	2540 ± 1	0,33992	+0,00335
4	8	6,24	27,06	0,26686	3100 ± 1	0,26574	-0,00112

Погрешность аппроксимации градуировочной характеристики формулой (11) при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  с учетом распределения Стьюдента составит

$$\Delta R_{\text{изм.}} = \pm l_a(n) \cdot \sigma_R = \pm 8,3 \cdot 10^{-3},$$

где  $l_a(n) = 2,78$  при числе градуировочных точек  $n = 4$  [6].

Ожидаемый диапазон измерений относительной электропроводимости лежит в пределах от  $R_{\text{изм. min}} = 0,27$  при  $N_R = 4095$  до  $R_{\text{изм. max}} = 1,46$  при  $N_R = 0$ . В электрической схеме предусмотрена возможность смещения и расширения диапазона измерений в зависимости от требований.

Порог чувствительности  $\gamma_R$  оценивается при  $\Delta N_R = \pm 1$  ед. (см. табл. 3)

$$\begin{aligned} \gamma_R &= \left| \frac{d(R_{\text{изм.}})}{d(N_R)} \cdot \Delta N_R \right| = \\ &= \left( -6,95 \cdot 10^{-4} + 1,994 \cdot 10^{-7} \cdot N_R \right) \cdot 1, \end{aligned}$$

что соответствует:  $\gamma_R = 7 \cdot 10^{-4}$  при  $N_R = 0$  и  $\gamma_R = 0,75 \cdot 10^{-5}$  при  $N_R = 3100$ . При этом  $N_R = 3100$  взято вместо  $N_R = 4095$  в связи с тем, что в случае существенной нелинейности градуировочной характеристики оценка наименьшего значения пороговой чувствительности должна производиться в крайней точке шкалы, соответствующей наилучшему разрешению и вошедшей в ряд экспериментальных оценок характеристики по методу наименьших квадратов, так как экстраполяция функции за пределы массива экспериментальных данных может привести к большой ошибке.

В табл.4 приведены показания канала измерения электропроводимости в цифровом эквиваленте  $N_R$  в зависимости от температуры окружающей среды при фиксированном значении проводимости (сопротивления) имитатора датчика проводимости (см. рис. 3).

Таблица 4 – Изменение показаний канала измерения относительной проводимости под воздействием пониженной и повышенной температуры

Температура, °C	Показание канала измерения электропроводимости, $N_R$ ед.
+21	2549,5
-19,5	2546
-21,7	2545,5
+20	2548,5
+50	2553
+20,7	2548,5

Температурный коэффициент при понижении температуры от 21 °C до минус 21,7 °C составляет

$$(TK)_R = 3,7 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{°C})^{-1},$$

при изменении от 20 до 50 °C –

$$(TK)_R = 5,9 \text{ °C} \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}.$$

Средний температурный коэффициент в диапазоне -21,7 ÷ 50 °C составит  $4,1 \cdot 10^{-5}$ .

В рабочем диапазоне температур от минус 2 до 35 °C максимальная температурная погрешность в эквиваленте цифрового отсчета составляет

$$\begin{aligned} (\Delta N_R)_t &= \pm [(TK)_R]_{\max} \cdot \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2} \cdot N_R = \\ &= \pm 5,9 \cdot 10^{-5} \cdot 2548 \cdot 18,5 = \pm 2,8 \text{ ед.} \end{aligned},$$

что в единицах относительной проводимости соответствует

$$\begin{aligned} (\Delta R)_t &= \pm \left( \frac{dR}{dt} \right) \cdot (\Delta N_R)_t = \\ &= (6,95 \cdot 10^{-4} + 19,9 \cdot 10^{-8} \cdot N_R) \cdot (\Delta N_R)_t = \\ &= \pm (2 \cdot 10^{-3} \div 2,3 \cdot 10^{-4}) \end{aligned}.$$

Большее значение  $\Delta R$  соответствует максимальной проводимости (минимальному коду  $N_R$ ), меньшее - минимальной проводимости (максимальному коду  $N_R$ ).

Дополнительная относительная температурная погрешность, вызванная изменчивостью геометрической постоянной датчика электропроводимости  $\frac{\Delta K_R}{K_R}$ , может составить

$$\begin{aligned} \frac{\Delta K_R}{K_R} \cdot 100 &= \pm \alpha_t \cdot \frac{(t_{\max} - t_{\min})}{2} \cdot 100 = \\ &= \pm 120 \cdot 10^{-6} \left( \frac{30 - (-2)}{2} \right) \cdot 100 = \pm 0,2 \% \end{aligned},$$

где  $\alpha_t = 120 \cdot 10^{-6} \cdot (\text{°C})^{-1}$  температурный коэффициент линейного расширения оргстекла, из которого изготовлен датчик электропроводимости [7]. В эквиваленте абсолютной погрешности измерения относитель-

ной электропроводимости при  $R_{\max} = 1,46$  дополнительная погрешность  $(\Delta R)_{\text{доп}}$  из-за изменчивости геометрической постоянной датчика будет равна

$$\begin{aligned} (\Delta R)_{\text{доп}} &= \pm R_{\max} \cdot \frac{\Delta K_R}{K_R} = \\ &= \pm 1,46 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = \pm 0,003. \end{aligned}$$

Суммарная погрешность измерения относительной электропроводимости  $(\Delta R)_{\Sigma}$ , включая погрешности аппроксимации  $(\Delta R)_{\text{узн}}$ , дополнительные температурные погрешности  $(\Delta R)_t$ ,  $(\Delta R)_{\text{доп}}$  при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  может достигать

$$\begin{aligned} (\Delta R)_{\Sigma} &= \pm \sqrt{(\Delta R)_{\text{узн}}^2 + (\Delta R)_t^2 + (\Delta R)_{\text{доп}}^2} = \\ &= \pm \sqrt{(8,3 \cdot 10^{-3})^2 + (2 \cdot 10^{-3})^2 + (3 \cdot 10^{-3})^2} = \\ &= \pm 9 \cdot 10^{-3}, \end{aligned}$$

что в 7 раз меньше допустимого значения  $(\Delta R)_{\text{доп}}$  для гидростатического уровнемера с классом точности 0,2 % (см. табл. 1).

В результате сличения измерителя температуры на базе микросхемы DS 1624 с образцовым термометром типа ПТЧ-58 зав. № 4 (допустимая погрешность  $\pm 0,015$  °C) установлено, что в диапазоне температур 0 ÷ 35 °C среднее значение разницы в показаниях составляет  $\Delta t_{\text{DS}} = t_{\text{DS}} - t_{\text{обр.}} = 0,408$  °C.

Для внесения поправки в показания микросхемы DS1624, температура окружающей среды  $t_{\text{узн}}$  может быть вычислена по следующей формуле

$$t_{\text{узн}} = t_{\text{DS}} + \Delta t = t_{\text{DS}} + 0,408. \quad (12)$$

Среднее квадратическое отклонение погрешности измерительного канала температуры составляет  $\sigma_t = 0,028$  °C, что соответствует статической погрешности измерения температуры при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$

$$\Delta t_{\text{узн}} = \pm 2 \cdot \sigma_t = \pm 0,056$$
 °C.

Эта оценка погрешности также оказывается меньше допустимого значения  $(\Delta t_{\text{доп}} \leq 0,3$  °C) для уровнемера с классом точности 0,2 %. Показатель инерции микросхемы DS1624 определялся при опускании ее из

воздуха с температурой 23 °C в охлажденную воду с температурой 1,5 °C. При этом микросхема была герметично и плотно упакована в полихлорвиниловую пленку. С учетом влияния изолирующей пленки показатель инерции оказался равным  $\theta_i \approx 50$  с, что для измерения температуры в колодце, где устанавливается уровнемер с дискретностью отсчетов 1 мин и более, вполне допустимо.

В конечном варианте инерционность микросхемы DS1624 будет определяться ее собственной тепловой инерционностью и инерционностью крышки контейнера погружного устройства, к внутренней поверхности которой она крепится. В связи с этим фактическая инерционность канала измерения температуры уровнемера должна проверяться на каждом образце изделия и вноситься в формуляр для учета ее при алгоритмической коррекции результатов измерений, если в этом будет необходимость.

Порог чувствительности микросхемы DS1624 по температуре определяется ценой единицы наименьшего разряда выходного кода и составляет  $\gamma_t = 0,035$  °C.

**Проверка работоспособности уровнемера в натурных условиях.** Были выполнены две постановки уровнемера: первая - в колодце на Павловском мысе в г. Севастополе продолжительностью 7,5 суток (14.08.02 +21.08.02); вторая - в колодце экспериментального отделения МГИ НАН Украины в поселке Кацивели (близ Симеиза) длительностью 10 суток (02.09.2002 г. – 12.09.2002 г.).

На рис. 5, 6 представлены графики изменчивости во времени температуры и уровня воды в колодце на Павловском мысе (поскольку в колодце находилась пресная вода электропроводимость не регистрировалась).

На рис. 7 показана изменчивость температуры, электропроводимости, солености, плотности и уровня моря в колодце Кацивели.

Температура в колодце на Павловском мысе оказалась значительно ниже температуры воды в море и зависела от температуры дождевых осадков, меняясь в пределах от 16,8 до 16,1 °C. Какой-либо периодической суточной изменчивости температуры обнаружено не было. При одноминутном интервале съема цифровой информации в изменчивости уровня моря прослеживаются суточные и более длинные колебания с амплитудой 12 ± 100 мм, а также устойчивые 52 ± 55 минутные колебания, с амплитудой (7±50)

мм (см. рис. 6).. Аналогичное явление было обнаружено Горячкиным Ю.Н., Зимой В.В., Репетиным Л.Н., Степурой И.И. в 2000-2001 годах в том же колодце с помощью стандартного измерителя уровня моря типа СУМ, но с улучшенным и более быстродействующим устройством съема и регистрации информации (интервал цифрового отсчета – 5 мин.) Физическая сущность этого явления в настоящее время изучается.

В процессе измерений, произведенных в колодце поста наблюдений за уровнем моря в Кацивели (см. рис. 7) была зафиксирована суточная изменчивость температуры с амплитудой (0,25 ± 0,5) °C при монотонном понижении среднесуточной температуры с 22,5 до 21,25 °C. При этом суточных колебаний солености практически не наблюдалось. Однако, с началом дождя 03.09.02 в (12±18) часов соленость в колодце резко упала с 18,3 до 7 и только 04.09.02 в (9±10) часов стала возрастать, установившись на уровне 13-15 в период с 05.09 по 08.09.02 г. В дальнейшем расчет солености и плотности не производился из-за появившейся неисправности в канале измерения относительной электропроводимости.

Уровень моря в течение всех суток 04.09.02 упал на 4 см, а после начала дождя произошло пиковое возрастание уровня на (7±8) см с 4.00 до 18.00 04.09.02 и дальнейшее падение к началу суток 05.09.02 на 8 см. Затем до 24.00 07.09.02 г. уровень понизился еще на 5 см и стал возрастать только с 08.09.02, поднявшись к 11.09.02 на 10 см.

«Зашумленность» кривой изменения уровня моря (по размаху колебаний) составляет 0,3±0,8 см и в значительной мере определяется короткопериодными изменениями уровня воды в колодце, а не шумами измерительных каналов. Порог чувствительности измерителя уровня в основном определяется каналом измерения давления и не превышает (0,05±0,1) см.

**Заключение.** В результате лабораторных и натурных испытаний уровнемера ИУМ-1 установлено, что выбранные технические, алгоритмические решения и элементная база позволяют создать на базе гидростатического измерителя уровня, с учетом изменчивости температуры, солености (минерализации), а, следовательно, и плотности, малогабаритный уровнемер с классом точности 0,35 % (без коррекции погрешности канала давления) и 0,2 % (при алгоритмической коррекции по-

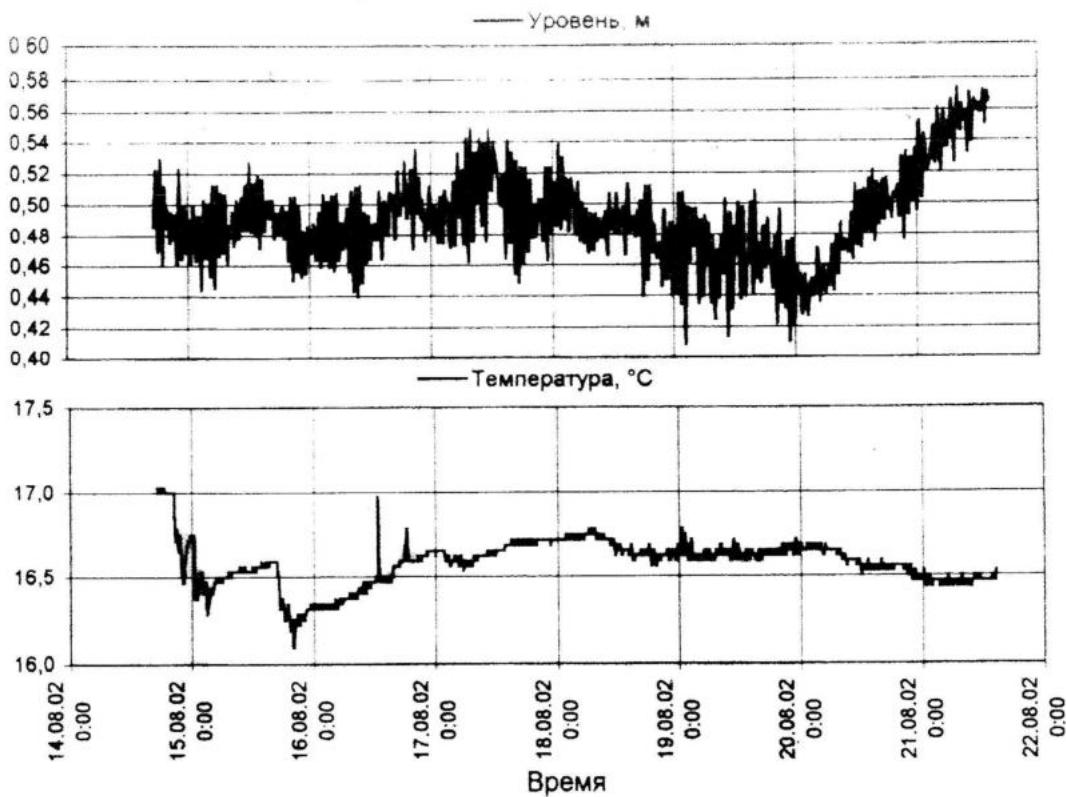


Рис.5 - Изменчивость уровня и температуры в колодце на Павловском мысе с 14.08.02 по 22.08.02.

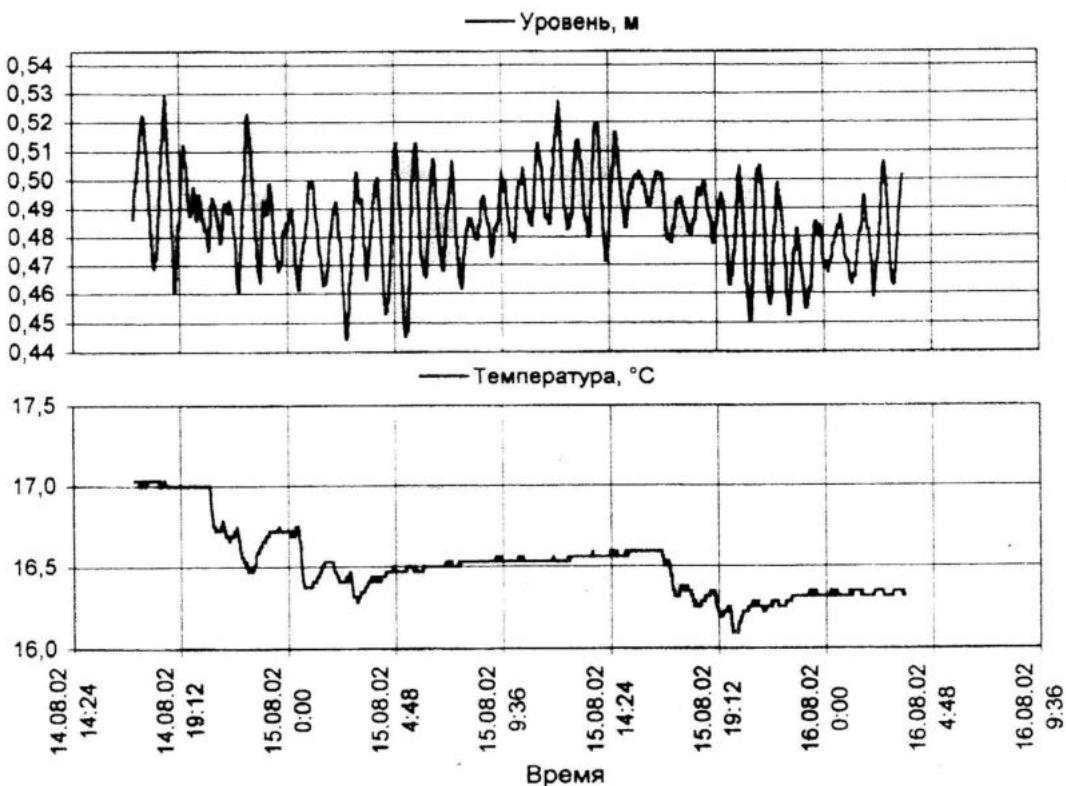


Рис.6 - Изменчивость уровня и температуры в колодце на Павловском мысе с 14.08.02 по 16.08.02.

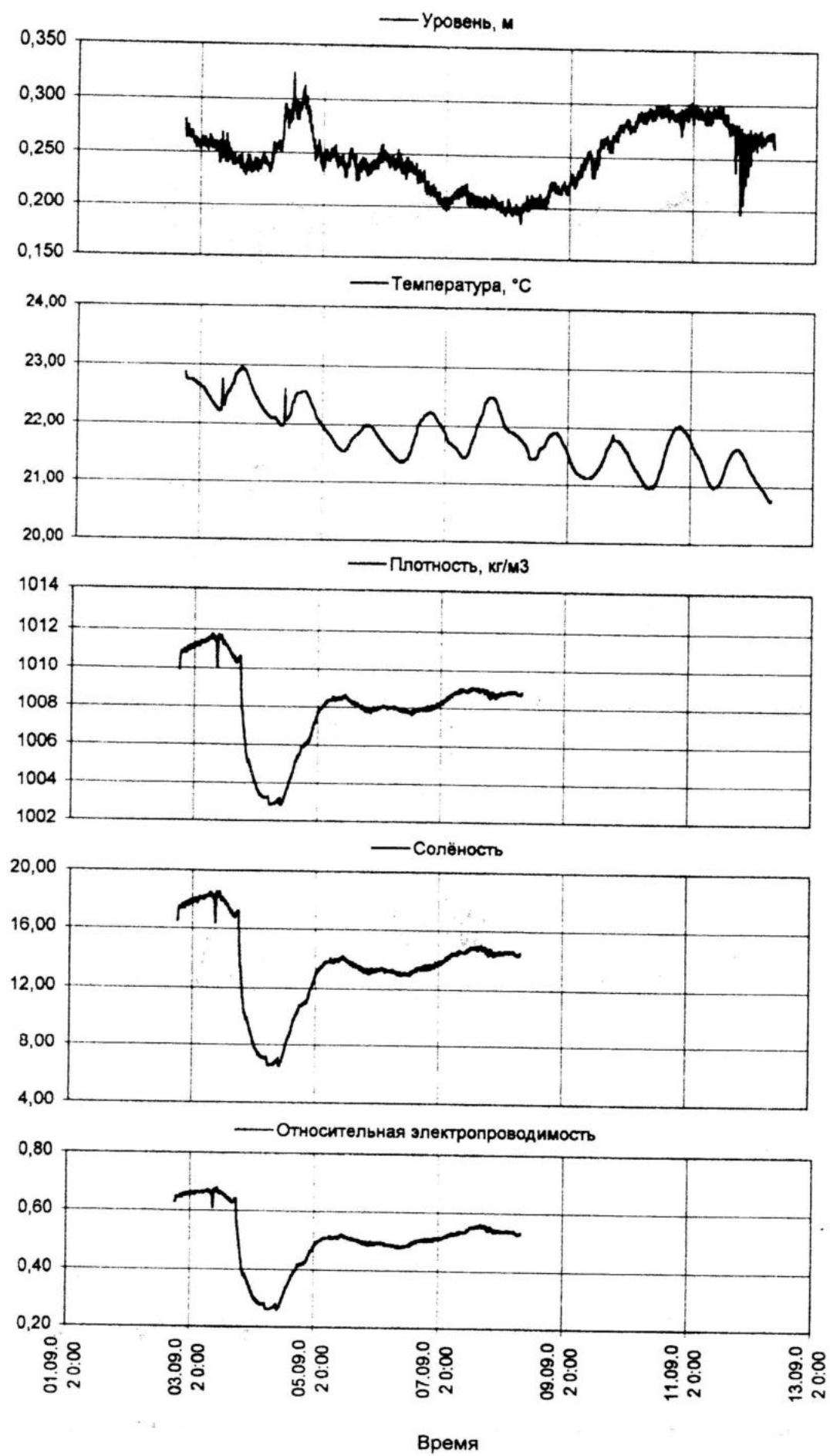


Рис.7 - Изменчивость измеряемых параметров в колодце п.Кацивели с 1.09.02 по 13.09.02

грешности) при изменении уровня в пределах (0÷2) м с одновременным измерением температуры, относительной электропроводимости (солености, минерализации) с погрешностями не более 0,1 °С и 0,01 (0,5 е.п.с.) соответственно при изменении окружающей температуры от минус 2 до 30 °С и солености от 0 до 30 единиц практической солености.

На стадии подготовки к государственным испытаниям опытного образца измерителя уровня необходимо усовершенствовать методику испытаний измерительного канала давления, чтобы наиболее достоверно оценить погрешности от влияния изменчивости окружающей температуры и разработать алгоритм ее коррекции в процессе первичной обработки информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 272 с.
2. Забурдаев В.И., Гайский П.В., Логвинчук А.Н. Требования к метрологическим характеристикам и алгоритмам обработки дан-

ных гидростатических измерителей уровня воды. Системы контроля окружающей среды: Сб. научн. тр./НАН Украины МГИ. – Севастополь, 2002. – С.108-118.

3. Гайский В.А., Греков Н.А., Гайский П.В. и др. СТД-измеритель уровня моря ИУМ-1. Системы контроля окружающей среды: Сб. научн. тр./ НАН Украины. МГИ: - Севастополь, 2003. - С. 5-12.

4. ЮНЕСКО. 1981. Шкала практической солености, 1978 год, и международное уравнение состояния морской воды, 1980 год. Техн. докум. ЮНЕСКО по морским наукам, 36: - 25 с.

5. Калашников П.А. Первичная обработка гидрологической информации. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1985. – 152 с.

6. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». МИ2552-99. ВНИИМ им. Д.И.Менделеев. Санкт-Петербург, 1999. - 26 с.

7. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры. Под ред Р.Г.Варламова. – М.: «Сов. радио», 1972. – С. 124-125.