

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ИНТЕГРАЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИБОРА ИСТ-1М

**Н.А. Греков, А.Н. Греков,
К.А. Кузьмин, М.А. Насынков**

Морской гидрофизический институт
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

В статье приведены результаты исследования по применимости интеграционного метода измерения скорости течения для рек и морей прибором ИСТ-1М с различными хвостовыми оперениями. Приведены графики вертикальных распределений вектора скорости течения и температуры, полученных при подъеме и опускании прибора.

Введение. Течения в океанах, морях и реках измеряются различными приборами с использованием разнообразных методик.

При этом могут иметь место большие погрешности измерений, а их некорректная оценка может привести к неправильным выводам.

Поэтому, исследователи, занимающиеся анализом результатов измерения течений, должны знать все особенности проведения измерений и обеспечение возможности получения достаточно достоверной оценки погрешности измерений.

Используемый в настоящее время многоточечный метод измерения вертикального распределения скорости течения имеет хорошую для практики точность, но требует больших затрат времени и средств. Совершенствование методов и средств для интеграционных измерений скоростей (без выдержки на горизонтах) направлено на ускорение и уменьшение затрат без существенного снижения точности.

Постановка задачи. При исследовании применимости интеграционного метода важным является вопрос точности измерения. Согласно рекомендациям всемирной организации ISO 5168 – 2005 уровень рекомендуемой точности при измерении скорости течения 2 – 5%,

расхода 5% и зависит от предполагаемого использования измеренных данных, технических характеристик применяемых приборов и других факторов. Точность не может являться постоянной величиной и поэтому имеет гибкий предел. Уровни рекомендуемой точности измерений являются во многих странах национальными стандартами для использования приборов и методов наблюдения [1].

Методика определения расхода воды для рек по скорости и площади уже достаточно освещена в технической литературе, разработаны средства и методы ускоренного метода интеграционного измерения распределения средних скоростей на скоростных вертикалях.

Для стандартизации измерений расхода с применением интеграционного метода для рек и каналов разработаны методики МИ 1759-87 «Скорость-площадь», где в качестве инструмента используется гидрометрическая вертушка. В этом документе отмечается, что использование упомянутых методических указаний обеспечивает суммарную относительную погрешность измерения расхода 6% при длительном способе, 10% при основном способе и 12% при ускоренно-сокращенном способе (интеграционный метод).

Касаясь вопроса используемых инструментальных средств, мы не будем перечислять все разработанные приборы для измерения скорости течения, ограничившись лишь источниками, в которых приводятся достаточно полные данные о них [2 – 12].

Как упоминалось выше, задача наших исследований заключается в исследовании применимости интеграционного метода при использовании прибора ИСТ-1М.

Изложение результатов. Разработанный измеритель скорости течения ИСТ-1М был предложен гидрологам взамен традиционных вертушек. Прибор автоматизирован, потребляет мало энергии, может эксплуатироваться в сложных погодных условиях с большим разбросом температур и давлений.

Технические характеристики прибора ИСТ-1М приведены в работе [13].

Известно, что погрешность измерения скорости в точке

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}, \quad (1)$$

где σ_c – суммарная инструментальная погрешность прибора; σ_n – средняя квадратическая погрешность, связанная с ограниченным временем осреднения скоростей и турбулентностью потока.

Кроме этих погрешностей существует еще и погрешность дискретизации σ_d , величина которой зависит от возможных отклонений осредненных скоростей между точками измерений и от количества самих точек.

Влияние погрешности σ_n на показание вертушки при интеграционном методе детально рассмотрено в работе [14].

Считается вполне допустимым, что время выдержки 60 с обеспечивает некоторый запас точности для условий, например, равнинных рек. Для других условий величина выдержки может быть совсем иной и это требует дальнейших исследований.

Для исследования применимости интеграционного метода измерения было взято два прибора ИСТ-1М с разными хвостовыми оперениями. Эксперимент проводили на океанографической платформе пос. Кацивели. С платформы на кевларовом кабеле опускали измерители течения. Синхронно производилась запись всех измеряемых приборами параметров морской среды с частотой 1 Гц. Измерения приборами проводились по определенному алгоритму. В начале измерений приборы опускались со средней скоростью ~ 10 см/с, при этом через каждый метр погружения прибор выдерживали на горизонтах по времени от 30 с, и в некоторых случаях до 3 мин. На рис. 1а представлен график погружения прибора ИСТ-1М до глубин 18 м с остановками на горизонтах. После погружения прибор без остановок поднимали на поверхность моря со средней скоростью $\sim 0,35$ м/с. График движения прибора при подъеме отображен на рис. 1б. Незначительная неравномерность движения прибора вызвана тем, что подъем

осуществляется без специальной лебедки вручную.

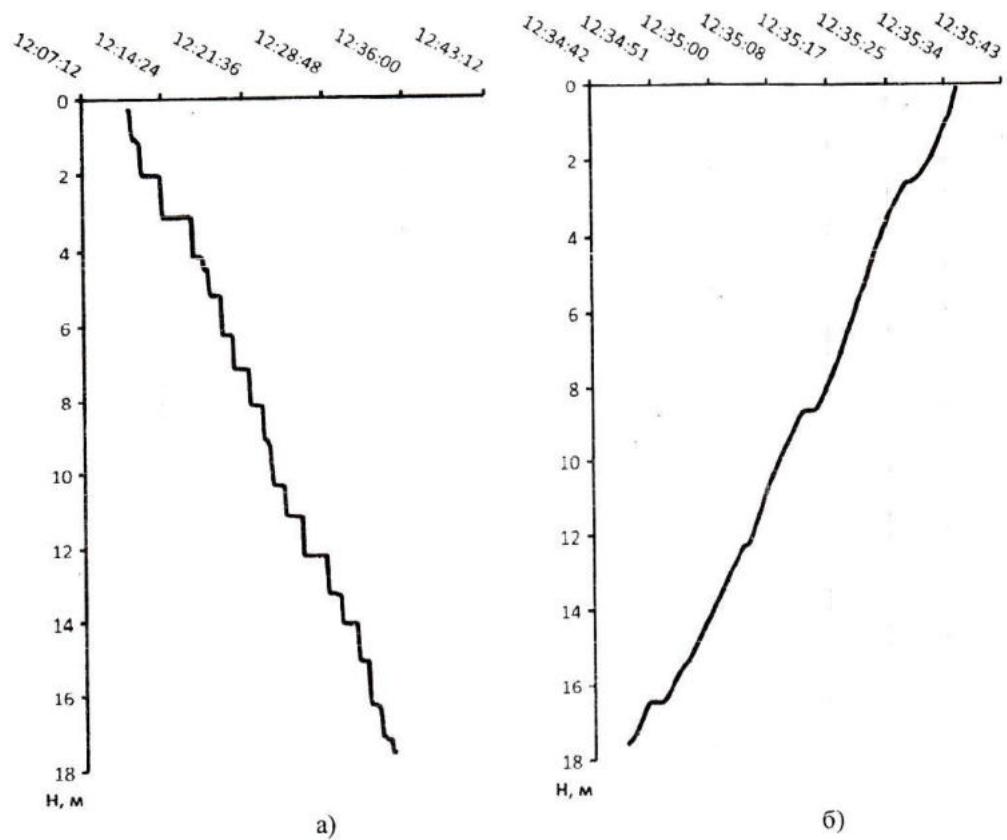
Рассмотрим результаты измерения температуры при погружении и подъеме прибора.

На рис. 2а показан график изменения температуры при заглублении прибора по закону, представленному на рис. 1а. Фактически показаниям измерителя можно доверять, начиная с глубины ~ 1 м. В нашем случае верхним слоем до 1 м можно пренебречь из-за волнения моря в момент проведения измерения. На графике отчетливо видно, что при остановках прибора на горизонтах средняя временная изменчивость по температуре не превышала $0,02^\circ\text{C}$ от температуры, полученной при опускании прибора. График температуры при подъеме прибора показан на рис. 2б. Оба графика хорошо описывают вертикальную структуру температуры, при этом разность отклонения по температуре при опускании и подъеме не превышает $0,02^\circ\text{C}$, что отвечает величинам временной изменчивости на горизонтах. Оценка величины временной изменчивости измеряемых параметров будет дана ниже.

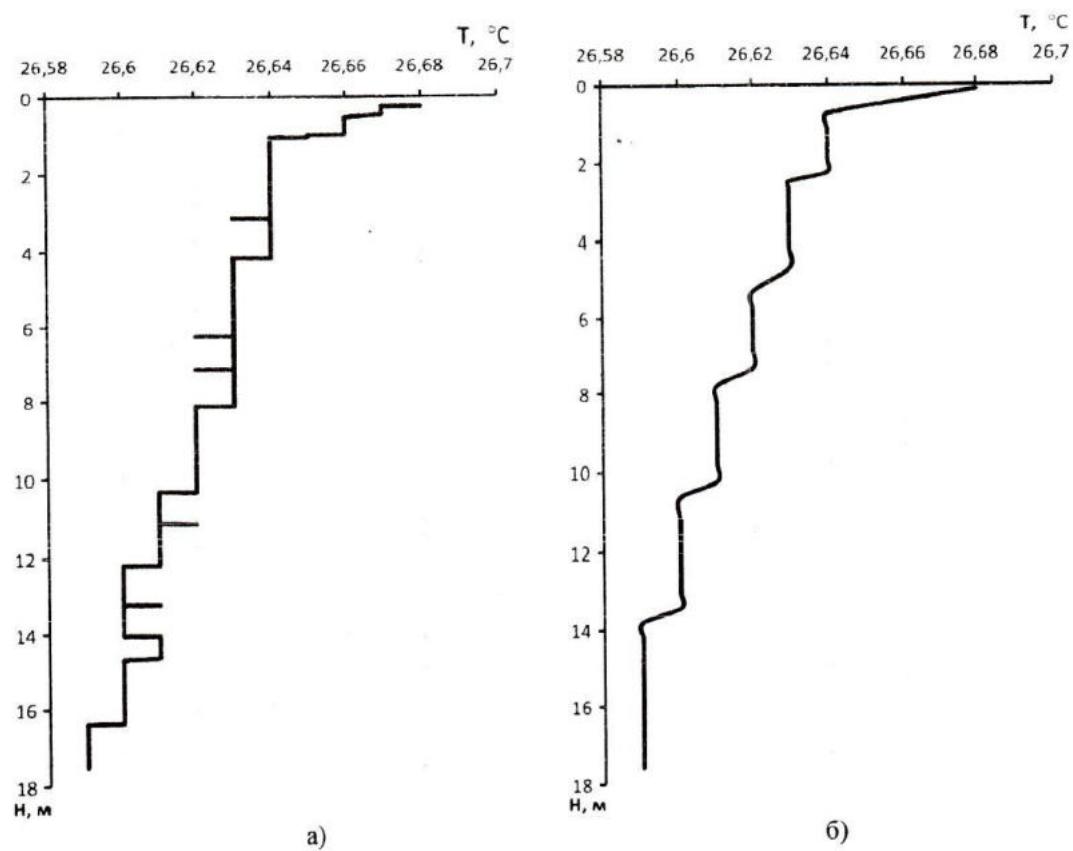
На рис. 3а представлены результаты измерения направления течения при погружении и на рис. 3б – при подъеме. На рис. 3а отчетливо видно вращение прибора при выдержке его на горизонтах. В верхних слоях величина отклонения достигала $\approx \pm 12^\circ$, в нижних слоях $\approx \pm 25^\circ$. Сравнивая вертикальные распределения направления течения при погружении и подъеме, следует отметить, что максимальная величина расхождения между ними и временной изменчивостью направления течения при выдержке на горизонтах не превышает $\pm 25^\circ$.

Рассмотрим графики измерения скорости течения при погружении (рис. 4а) и подъеме (рис. 4б).

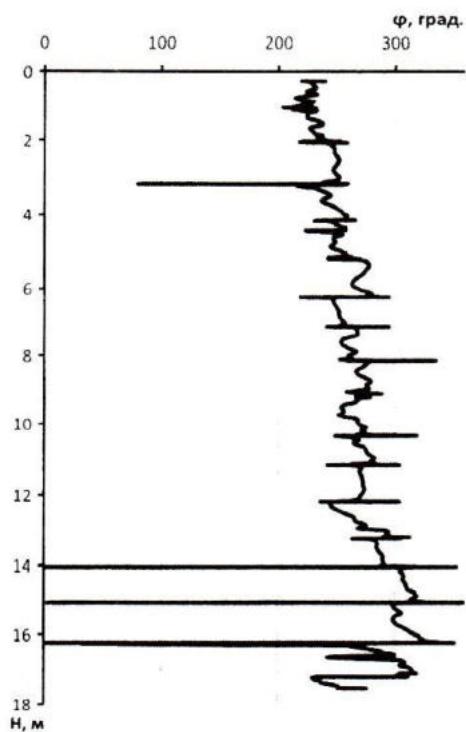
Анализируя график опускания прибора можно отметить следующее. Расхождение между непрерывным профилем скорости и осредненными по времени значениями скорости на горизонтах с дискретностью ~ 1 м не превышает $\pm 0,025$ м/с.



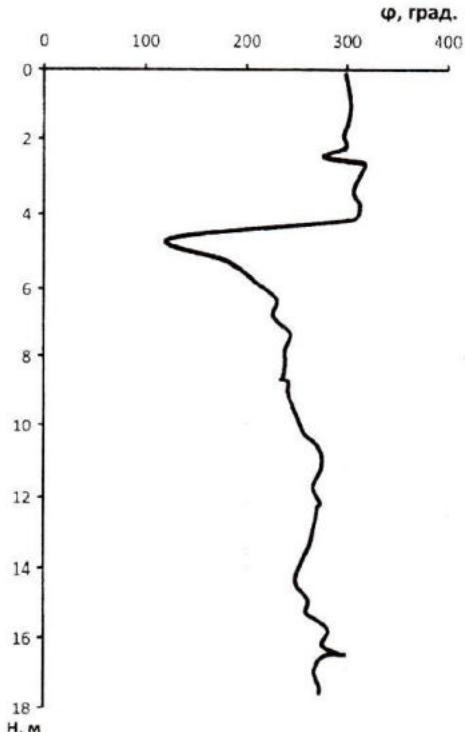
Р и с. 1. График движения прибора в зависимости от времени: при погружении (а) и подъеме (б)



Р и с. 2. Результаты измерений температуры: при погружении прибора (а) и подъеме (б)

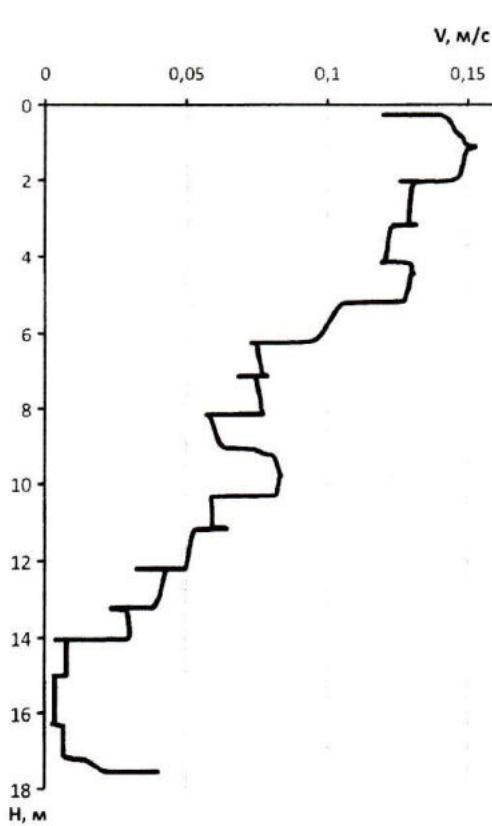


а)

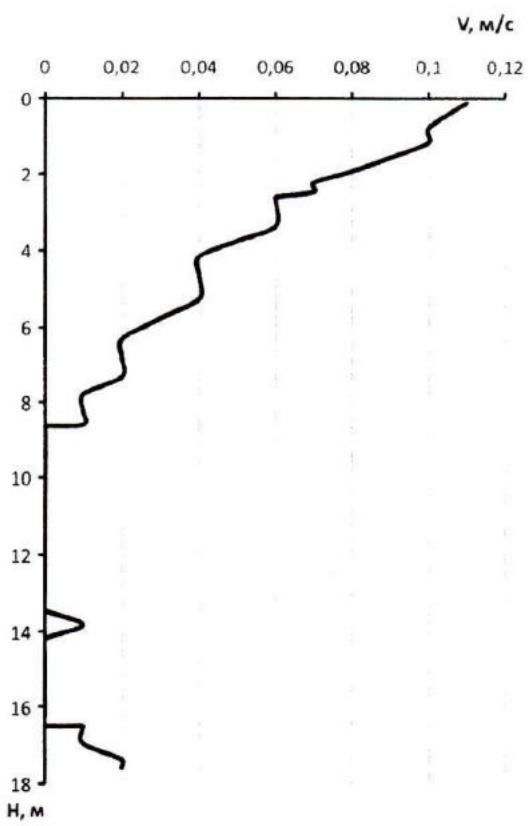


б)

Р и с. 3. Результаты измерений направления: при погружении прибора (а) и подъеме (б)



а)



б)

Р и с. 4. Графики изменения скорости течения в зависимости от глубины: при погружении прибора (а) и подъеме (б)

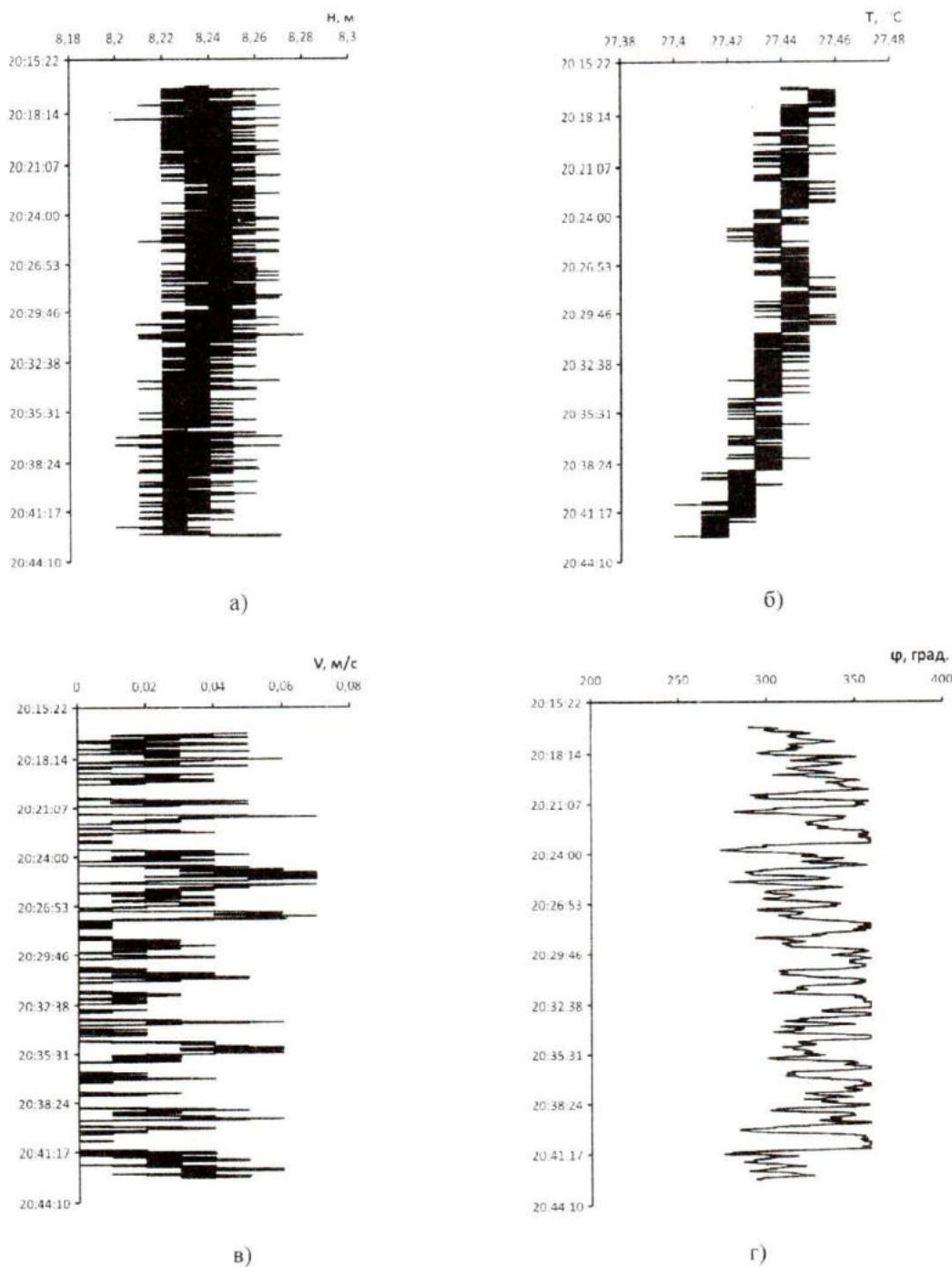


Рис. 5. Графики временной изменчивости измеренных параметров: (а) – глубины; (б) – температуры; (в) – скорости течения; (г) – направления течения на горизонте 8,24 м

Сравнивая между собой графики скорости при спуске и подъеме прибора, можно оценить временную изменчивость профиля скорости течения. В нашем случае эта величина не превышает в среднем $\pm 0,01$ м/с за 30 мин. измерений.

Как отмечалось, для оценки временной изменчивости измеряемых параметров при погружении прибора делались остановки на определенных горизонтах.

Выберем из массива данных, полученных при измерении на горизонтах, горизонт с максимальной величиной изменчивости. В нашем случае можно взять горизонт в районе 8 м. На рис. 5а показан график глубины нахождения прибора при измерении на этом горизонте. Средняя глубина за время измерений была 8,24 м. Как видно из графика, отклонение по глубине от среднего значе-

ния не превышало $\pm 0,03$ м, что характеризует стабильное нахождения прибора на горизонте в течение 25 мин.

На графике температуры (рис. 5б) видно, что только в конце измерения температура воды на горизонте понизилась на $0,03^{\circ}\text{C}$, изменчивость по направлению не превысила $\pm 30^{\circ}$ (рис. 5г). Средняя скорость течения за время измерения на горизонте 8 м (рис. 5в) составила 0,03 м/с с максимальными отклонениями $\pm 0,03$ м/с (рис. 5г).

Аналогичные измерения проводились прибором с крестовидным хвостовиком. В статье не приводятся графики, однако результат таков: из-за крестовидного хвостовика при зондировании возникают колебания прибора в вертикальной плоскости, что приводит к косоструйности и, следовательно, к неконтролируемой погрешности по скорости течения.

В результате проведенного исследования по применимости интеграционного метода измерения при использовании прибором ИСТ-1М можно рекомендовать следующий алгоритм измерений. Вначале прибор опускают со средней скоростью 10 см/с без остановок на необходимую глубину. Непрерывно ведется запись и обработка измеряемых параметров, как функция глубины $V = f(z)$. После достижения необходимой глубины прибор поднимают на поверхность воды со средней скоростью 0,35 м/с.

В реальном масштабе времени определяют разность между двумя профилями скорости с дискретностью по глубине $\sim \Delta = 0,4$ м с учетом допустимой погрешности по скорости ΔV , которую определяет исследователь, и оценивают превышения допуска по формуле

$$\Delta V \leq \Delta V_i = |V_{i1} - V_{i2}|, \quad (2)$$

где V_{i1} – скорость течения при опускании прибора для i -го горизонта; V_{i2} – скорость течения при подъеме прибора для i -го горизонта; ΔV_i – расхождение по скорости между профилями скорости течения для i -го горизонта.

Если погрешность в некоторых точках профиля превышает допустимую погрешность ΔV , то необходимо выполнить дополнительное зондирование и выдержать прибор на тех горизонтах, на которых имеются максимальные расхо-

ждения между профилями скорости при погружении и подъеме прибора.

Выводы. 1. Интеграционная методика измерения скорости течения при использовании прибора ИСТ-1М позволяет значительно сократить время и средства при исследовании.

2. Результаты исследования, проведенные на океанографической платформе, были проверены на многократных зондированиях, что подтверждает их достоверность.

3. При проведении измерения с использованием интеграционного метода необходимо использовать в приборе только плоский вертикальный хвостовик. Крестовидный хвостовик при проведении зондирования дает значительную ошибку, обусловленную вертикальной косоструйностью.

Авторы благодарят инженера О.Ю. Борщёва за оказание помощи в проведении экспериментов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ и города Севастополя в рамках научного проекта № 14-45-01020 «р_юг_a».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Organization for Standardization, 2005: Measurement of Fluid Flow: Estimation of Uncertainty of a Flow-rate Measurement. ISO-5168-2005, Geneva.
2. <http://www.ehoskin.xplorex.com/>
3. [http://www.geneq.com/frames.html/](http://www.geneq.com/frames.html)
4. <http://www.globalw.com/>
5. <http://www.hydraulics.at.ua/>
6. <http://www.hydrobios.de/>
7. <http://www.mkrs.by.ru/>
8. <http://www.ooo-pridor.ru/descriptions/15932/>
9. <http://www.ott-hydrometry.de/>
10. <http://www.rickly.com/>
11. <http://www.td-automatika.ru/catalog-detail.php?ID=14419>
12. <http://www.valeport.co.uk/>
13. Греков Н.А., Греков А.Н., Кузьмин К.А. Технические возможности измерителя скорости и направления течения ИСТ-1М // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2013. – Вып. 19. – С. 40 – 46.
14. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 310 с.