



УДК 556.5

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.28>

## Специфика использования ADCP в период ледостава

С. В. Бузмаков, А. В. Южно, А. А. Зорина\*

*Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Приведен обзор отечественных и зарубежных методологий производства измерений расхода воды в период ледостава, научных публикаций по тематике, осуществлен анализ используемой приборной базы, представлены результаты сравнительных натурных измерений расходов воды и скоростей течения на реках Обь, Нева и Оредеж. На основании анализа результатов этих измерений и технических аспектов производства работ были сделаны первые выводы об особенностях применения акустических доплеровских профилографов течений в период ледостава, выявлены его основные преимущества и недостатки относительно традиционных средств измерения. Впервые была произведена численная оценка точности экстраполяции скоростей течения программным обеспечением ADCP в верхней части эпюра с помощью учащенных сравнительных измерений в подледной части потока, находящейся в «мертвой зоне» профилирования по каналу скорости.

**Ключевые слова:** измерение ADCP, расход воды, скорость течения, ледостав, гидрометрическая вертушка, сравнительные наблюдения.

---

**Для цитирования:** Бузмаков С. В., Южно А. В., Зорина А. А. Специфика использования ADCP в период ледостава // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 39. С. 28–44. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.28>

---

Original article

## Water Discharge Measurement by ADCP During Freeze-up Period

S. V. Buzmakov, A. V. Iukhno, A. A. Zorina\*

*State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russian Federation*

**Abstract.** As a part of the modernization of the national hydrological network, a large number of ADCPs were delivered to the stream-gaging stations of the Roshydromet and, as a rule, used only during the open channel period. At the same time, the measurement of water discharge during the freeze-up period has always been a laborious, technically complex task, and using ADCPs during this period can optimize the measurement procedure. The article presents the issues of the features of ADCPs using on the national hydrological network of Roshydromet, the existing instrument and methodological base for measuring water discharge under the ice cover with ADCP. Either, the results of comparative field measurements of water discharge and velocities on the Ob, Neva and Oredezh rivers were considered. These rivers cover a wide range of hydrodynamic conditions: the Ob is a typical large river, with an average flow velocity is about 0.30 m/s, and a maximum depth about 20 m; the Neva is a unique large river, with a high average flow velocity value is about 0.8 m/s and a maximum depth not exceeding 11 m; the Oredezh river is a typical small river with mean flow velocity about 0.2 m/s

and depths of not more than 1.5 m. In the experiments, ADCP Teledyne RiverRay and SonTek M9 were used, and comparative measurements were performed by the mechanical current meter and electromagnetic flow velocity device “Poseidon-1”. On the basis of these experiments first conclusions were drawn about the features of the ADCP application during the freeze-up period. Thus, the authors found that it is most effective to use ADCPs on medium and large rivers - labor and time costs are significantly lower than using conventional methods for measuring water flow, and the measurement accuracy is comparable. At the same time, the article notes a number of significant weak points, most of which boil down to the thesis that the measurement of water discharges using ADCP under ice involves the use of a large number of technically complex and expensive equipment, and the failure of at least one element leads to the inability to complete the measurement. Special attention is paid to the main technical aspects of working with devices, as well as with specialized software. Therefore, it is always recommended to have a spare standard measuring instrument in extra. The main technical aspects of working with devices as well as with specialized software are also discussed in more detail in the body of the article.

**Keywords:** water discharge measurement, flow velocity, freeze-up, ADCP, mechanical current meter, comparative measurements.

**For citation:** Buzmakov S. V., Iukhno A. V., Zorina A. A. Water Discharge Measurement by ADCP During Freeze-up Period. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2022, vol. 39, pp. 28-44. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.28> (in Russian)

## Введение

На сети гидрологических станций и постов Росгидромета появилось большое количество акустических доплеровских профилографов течений (ADCP). По состоянию на конец 2021 г. их количество составляло 197 единиц, представленных фирмами Teledyne RD, SonTek, «Элерон», Ott. На данный момент они используются для измерений преимущественно в теплое время года, тогда как в зимний период приборы не задействуются. Хотя в ряде зарубежных стран профилографы фирм Teledyne RD и SonTek широко применяются и в период ледостава. Использованию ADCP в зимних условиях в Российской Федерации препятствует отсутствие официально утвержденной методики измерения и боязнь гидрометров потерять дорогостоящее оборудование. Основная цель данной статьи – показать преимущества и недостатки использования ADCP для измерения расхода воды в период ледостава и описать основные особенности.

## Методологическая основа

Если методика измерения расхода воды гидрометрической вертушкой давно разработана и испытана<sup>1</sup>, то по применению профилографов методических рекомендаций практически нет. Единственным исключением является

---

<sup>1</sup> Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2. Гидрометеорологические наблюдения на постах. Ч. 2. Гидрологические наблюдения на постах. Л.: Гидрометеоздат, 1975. С. 133–139; Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Ч. 2. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л.: Гидрометеоздат, 1978. С. 131–133; РД 52.08.163-88. Дополнение к Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Ч. 1. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 12–14.

РД 52.08.767-2012<sup>2</sup>, которая была разработана на основе программного обеспечения лишь одного производителя приборов (Teledyne RD) и не включает в себя алгоритм измерений в период ледостава.

В США и Канаде профилографы широко применяются для подледных измерений скоростей течений, разработана методическая база [Campbell, 2015]. В Руководстве [Campbell, 2015] описан процесс измерения расхода воды в условиях ледостава от стадии подготовки оборудования к измерениям и производства всех необходимых предварительных процедур до непосредственных практических рекомендаций по работе оборудования и программного обеспечения профилографов основных моделей (RiverSurveyor S5, M9 и Teledyne RD RiverRay, Rio Grande, River и Stream Pro). Несомненно, это Руководство [Там же] является основным из нормативно регламентирующих документов, описывающим процесс измерения расходов воды с помощью ADCP подо льдом, и может стать прототипом для будущего отечественного аналога.

В настоящее время двумя ведущими производителями профилографов разработано специализированное программное обеспечение (ПО) для обработки результатов измерения расходов воды подо льдом. Для SonTek это RiverSurveyor Stationary Live (далее RSSL) [Xylem brand instructions ... , 2018], а для Teledyne RDI – Section by Section Pro (далее SxS Pro) [Teledyne RD instructions ... , 2015]. С его помощью в автоматическом режиме происходит экстраполяция скоростей течения за пределы промерных вертикалей, рассчитываются площади между ними и частные расходы воды с дальнейшим суммированием. Производитель Rowe, стремительно набирающий позиции на рынке ADCP, пока не имеет таких программных средств, но, по заверению разработчиков, они находятся в стадии апробации.

### **Обзор научных публикаций и материалов**

Вопросу подледных измерений с помощью ADCP посвящено ограниченное число исследований. Такие условия для производства гидрологических работ наблюдаются только в Канаде, США, России, Норвегии, Финляндии, Швеции и лишь эпизодически в ряде других стран.

В [Guay, Choquette, Durand, 2012] на основе анализа данных измерений расходов воды в период ледостава за 5 лет на одном из постов Гидрологической службой США (USGS) выдвинут тезис, что применение ADCP является «...ключевым элементом в повышении качества данных зимних гидрометрических измерений». Позже он подтвердился в расчетах группы американских ученых, приведенных в их исчерпывающем исследовании [Computing under-ice discharge ... , 2018].

Целый ряд исследований посвящен применению горизонтальных ADCP. И если для целей измерения расхода воды такой тип профилографов имеет ряд существенных ограничений, то для изучения процессов ледообразования [Marko, Fissel, Jasek, 2010; Banks, Brandon, Garthwaite, 2006] и транспорта

---

<sup>2</sup> РД 52.08.767-2012 Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами Stream Pro и Rio Grande // СПб. : ФГБУ «ГГИ», 2012. 63 с.

наносов в эстуариях рек [Spatiotemporal changes ... , 2018] и легкоразмываемых песчаных руслах [Measuring suspended sediment ... , 2019] его использование более целесообразно. Подобный мониторинг характеристик твердого стока в режиме реального времени и в условиях ледостава возможно вести только с помощью ADCP.

### Материалы и методы исследования

Измерение расходов воды производилось согласно Руководству [Campbell, 2015], а также с опорой на опыт использования ADCP Геологической службой США, систематизированный на тематическом форуме [USGS Hydroacoustic Forum ... , 2021] и в специализированном подкасте [USGS Podcast: Common ... , 2021]. Согласно данной методике датчик ADCP (трансдюсер) должен погружаться в воду под лед (ниже внутренней кромки льда или шуги) для того, чтобы ледяной покров или шуга не препятствовали расхождению лучей от датчика в водную среду (рис. 1).

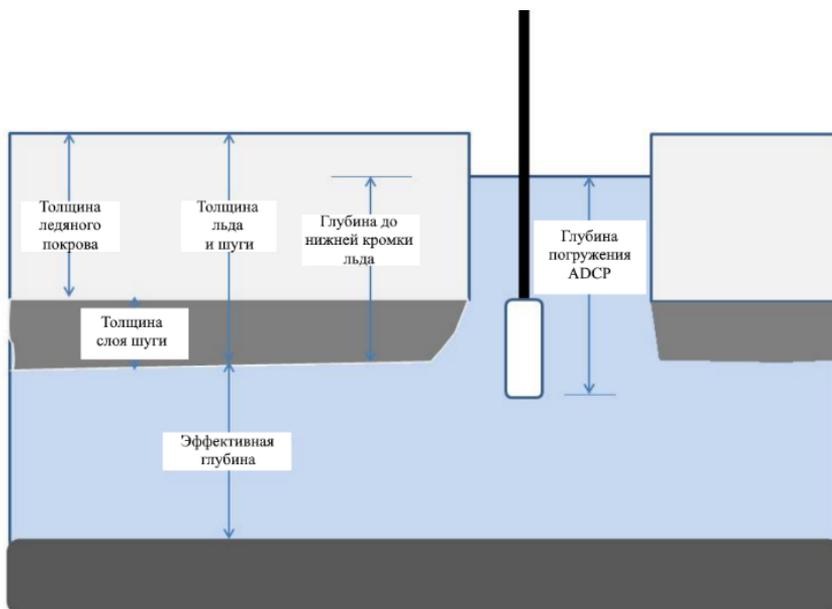


Рис. 1. Схема измерения ADCP подо льдом [Campbell, 2015]

Чтобы опустить профилограф под лед, нужно иметь штангу необходимой длины (превышающей максимальную толщину ледяного покрова) с жесткими креплениями для датчика. Во всех датчиках ADCP имеются отверстия с резьбовой насечкой для крепления винтами. Помимо жесткого крепления, также желательно обвязать крепление профилографа страховочной веревкой, на случай если сама штанга выскользнет из рук гидрометра во время измерения. Штанга должна быть изготовлена из цветных немагнитных металлов (титан, алюминий) или пластика для исключения воздействия на компас ADCP. На

штангу можно также закрепить пузырьковый ватерпас для лучшего горизонтирования прибора в воде. Датчик должен соединяться с полевым компьютером только при помощи кабеля напрямую или через модуль питания и связи. Использование канала связи Bluetooth под водой не рекомендуется.

Измерение расхода воды, как и при использовании гидрометрической вертушки, начинается с разметки скоростных и промерных вертикалей. Поскольку габаритные размеры профилографа с креплением меньше, чем у вертушки с хвостом, вполне достаточно обычного бура диаметром шнека в 10 дюймов. При этом отпадает необходимость в выпиливании или высверливании больших майн, как делается при опускании вертушки на тросе с грузом, а все промерные вертикали можно считать скоростными.

Перед началом измерения необходимо опустить трансдьюсер ADCP в холодную воду для температурной акклиматизации примерно на 30 мин (время, рекомендованное Руководством [Campbell, 2015]), очистить края лунок от зазубрин и прочих шероховатостей поверхности льда, способных повредить кабель, и только затем начать производство измерений.

Измерения начинаются с ориентирования (позиционирования) профилографа в потоке. ADCP фирмы Teledyne вводятся в поток так, чтобы третий луч (цифровые обозначения находятся на корпусе трансдьюсера) был направлен по течению (рис. 2, а), ADCP фирмы SonTek позиционируются вводом значения азимутального угла гидрометрического створа (рис. 2, б).

Правильность позиционирования оказывает непосредственное влияние на результат расчета расхода воды, так как ПО рассчитывает составляющую скорости потока относительно третьего луча (либо используемого азимутального угла). В постобработке для обоих ПО есть возможность задания иного азимутального угла или направления третьего луча ADCP и пересчета значения расхода воды, но лишь для всех промерных вертикалей в совокупности. Это может привести к большим погрешностям, так как в большинстве случаев отклонения скорости от нормали носят разнонаправленный характер.

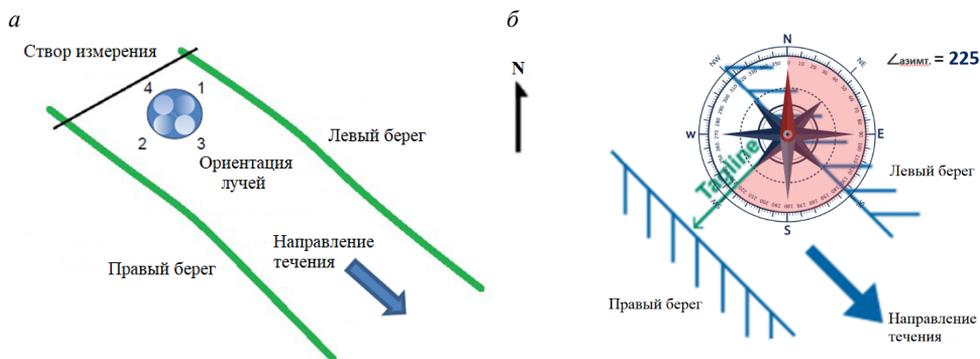


Рис. 2. Позиционирование ADCP под ледяным покровом:  
а – для профилографов фирмы Teledyne RD; б – для профилографов SonTek

Измерения проводятся последовательно от одной лунки (скоростной вертикали) к другой. Датчик опускается ниже внутренней кромки льда, после чего начинается посылка и сбор пингов (ансамблей). Всего должно поступить 30 действительных ансамблей, как правило, это происходит за 40 с измерений. В зависимости от условий среды, типа профилографа, метода осреднения скорости и ориентирования прибора, а также программного обеспечения время измерения может увеличиваться. Обязательно фиксируется глубина погружения датчика, а также толщина ледяного покрова и слоя шуги. Рабочая глубина определяется самим профилографом. Во время измерения необходимо контролировать отношение «сигнал – шум», отклонения направлений вектора скорости от нормали – ПО позволяет либо отклонить, либо принять результаты измерения на вертикали после прохождения всех действительных ансамблей.

Первичный акустический преобразователь (трансдюсер) между измерениями на скоростных вертикалях, как правило, помещается в ведро с водой. Модуль питания и связи прячут под одежду или устанавливают в обогреваемый контейнер (переносную термосумку). Требования по минимальной температуре эксплуатации для профилографов ведущих производителей (SonTek, Teledyne и Rowe Tech) устанавливаются по температуре хранения (по сути, переноса между вертикалями) на отметках  $-10$ ,  $-20$  и  $-30$  °C соответственно, при этом не установлено градаций отдельно для трансдюсера и блока связи. Это автоматически означает, что при соблюдении двух условий переноса оборудования между лунками, приведенных выше, охлаждение трансдюсера и блока связи до этих значений происходить не будет даже при самых низких температурах – до  $-35$  °C. Примеры использования ADCP при таких температурах встречаются в отзывах пользователей ADCP, поступающих в ЛПП ГГИ [ФГБУ «ГГИ». Лаборатория ... , 2021] и форум USGS [USGS Hydroacoustic Forum ... , 2021].

Также в руководствах по эксплуатации указано, что хранение прибора при температуре ниже минимальной установленной в течение продолжительного времени (свыше 30 мин) может привести к неотвратимой поломке прибора, поэтому неукоснительное выполнение условий термической эксплуатации ADCP является залогом его корректного функционирования.

После того как измерения на всех скоростных вертикалях выполнены, программное обеспечение само рассчитывает расход воды. Если в ходе измерений были внесены некорректные расстояния, данные позиционирования или неверные коэффициенты, в режиме постобработки данные ошибки могут быть исправлены, расход воды автоматически пересчитается.

### **Приборная база**

Основными производителями профилографов на мировом и отечественном рынке являются три компании – SonTek, Teledyne RD и Rowe Tech. Единственный отечественный профилограф течений «Арго» не имеет специализированного ПО для работы в подледном режиме, поэтому не рассматривается

в данном исследовании. Цены на базовый комплект (без плавсредств) варьируются от 45 500 до 55 500 евро. Если же добавить к этому плот или самоуправляемую лодку, комплект GPS, то цена такого комплекта будет в 1,5–2,5 раза выше. Стоит отметить и высокую стоимость комплектующих. Так, например, один стандартный кабель для профилографа RiverRay может стоить 1250 евро, что диктует необходимость бережного отношения и продуманного механизма крепления профилографа к штанге, защищающего кабель как от перегибов, так и от механических повреждений.

Что касается специализированного крепежа профилографов и штанг, то на рынке присутствует единичное предложение от американской фирмы HyQuest Solutions [Marko, Fissel, Jasek, 2010]. Комплект стоимостью около 2600 евро включает в себя крепления для StreamPro, RiverRay, RiverSurveyor M9/S5, вертушки Redback RB1, саму 4-секционную штангу с общей длиной 2 м, ориентирующую насадку, переносные сумку и кейс. Также возможно заказать крепления для каждого из профилографов в отдельности у производителей, но финансовая целесообразность такого решения весьма сомнительна. Самостоятельное изготовление такого универсального крепления с отверстиями сразу под все типы профилографов является недорогостоящей и довольно простой с технической точки зрения операцией.

Технически все описываемые профилографы позволяют измерять скорости течения в диапазоне от  $-5$  до  $5$  м/с с возможностью его расширения до  $20$  м/с, этот параметр идентичен для всех основных моделей ADCP. Погрешность измерения скорости для высокочастотных профилографов (более  $2000$  кГц) составляет  $1\% \pm 2$  мм/с, для средне- и низкочастотных ( $300$ – $1200$  кГц)  $0,25\% \pm 2$  мм/с, по заверениям производителей.

Диаметр трансдюсера у самых мелкогабаритных моделей (Teledyne StreamPro, SonTek RS5) составляет  $3,89$  и  $5,85$  см соответственно. Тогда как средне- и низкочастотные модели имеют диаметр от  $12,8$  (SonTek M9/S5) до  $22,6$  см (Teledyne RioGrande).

### **Объекты исследования**

В основе исследования лежат единичные сравнительные измерения скорости течения и расходов воды устройствами различных типов, проведенные на реках Нева, Обь и Оредеж в зимний сезон 2020–2021 гг.

*Гидрометрический створ на р. Неве* располагался в поселке имени Свердлова. Ширина русла –  $300$  м, средняя скорость течения –  $0,80$  м/с, максимальная глубина –  $10,7$  м, толщина ледяного покрова –  $0,43$  м, шуга отсутствует, температура воздуха в день измерения  $-2\dots-4$  °С. Измерение скорости течения гидрометрической вертушкой и электромагнитным датчиком ИСВП «Посейдон-1» производилось с троса на 13 скоростных вертикалях в 72 точках. Профилографами RiverRay и RiverSurveyor M9 измерено 13 скоростных вертикалей. Расчет расхода осуществлялся в программах RSSL и SxS Pro методом «секций».

*Измерения на р. Оби* проводилось в трех створах – протоках Вартовская и Чехлоней, а также в контрольном створе в  $350$  м ниже слияния этих рукавов.

Общее количество скоростных вертикалей – 46. Ширина русла в контрольном створе – 787 м, максимальная глубина – 20,3 м, максимальная толщина льда – 1,13 м, средняя скорость течения – 0,31 м/с, шуга наблюдалась лишь на одной прибрежной вертикали одного из створов, температура воздуха в день измерения –1...–3 °С. Профилограф RiverSurveyor M9 также опускался в лунки на специализированной штанге под нижнюю кромку льда. Расчет расхода производился в программе RSSL методом «секций».

*Измерение расхода воды на р. Оредеж* выполнялось в створе выше бывшего пешеходного моста на базе практик РГГМУ. Ширина русла – 16,4 м, максимальная глубина – 1,53 м, толщина ледяного покрова – 0,26 м, средняя скорость течения – 0,18 м/с, шуга отсутствует, температура воздуха на момент измерения колебалась от –3 до –13 °С. На створе было разбито 8 скоростных вертикалей, на каждой из них измерялась скорость течения с помощью трех средств измерения: вертушки гидрометрической ГР-21М1, электромагнитного измерителя скорости водного потока ИСВП «Посейдон-1» и ADCP RiverRay. Расчет расхода производился в программе SxS Pro методом «секций».

#### Анализ результатов сравнительных полевых исследований

На Неве в створе поселка имени Свердлова, где производились измерения скоростей течения четырьмя средствами измерений (СИ), в конечном итоге получены сопоставимые результаты. Максимальное относительное расхождение между ними составило 11,1 % (между ГР-21М1 и ADCP RiverRay). Для всех остальных средств измерения расхождение не превысило 5 %, что позволяет сделать предположение о систематической ошибке в сторону занижения значений скоростей течения профилографом RiverRay для данного измерения. Причиной этого может быть большая разница в векторах направлений нормальной и истинной скорости потока на скоростных вертикалях. Данный вопрос требует дальнейшего изучения. В табл. 1 представлены итоговые результаты измерений.

Таблица 1

Сравнение значений расходов воды, полученных на р. Неве различными СИ

| Параметр                      | ГР-21М1 | Посейдон-1 | RiverRay |          | М9     |          |
|-------------------------------|---------|------------|----------|----------|--------|----------|
|                               |         |            | Прямой   | Обратный | Прямой | Обратный |
| $F$ , м <sup>2</sup>          | 2340    | 2340       | 2467     | 2423     | 2444   | 2435     |
| $V_{\text{ср}}$ , м/с         | 0,815   | 0,817      | 0,712    | 0,676    | 0,835  | 0,762    |
| $Q$ , м <sup>3</sup> /с       | 1909    | 1914       | 1756     | 1638     | 2041   | 1857     |
| Итого $Q$ , м <sup>3</sup> /с | 1909    | 1914       | 1697     |          | 1949   |          |

Стоит отметить и разницу в продолжительности измерения тем или иным СИ расхода воды. Так, совокупно на измерение расхода воды профилографом ушел 1 ч 35 мин (прямой и обратный ход), тогда как измерение вертушкой многоточечным способом заняло порядка 6 ч. Переход от многоточечного к основному методу измерения позволил бы сократить время примерно на 2 ч. Тем не менее производительность измерения расхода воды с помощью ADCP все равно остается существенной.

На рис. 3 представлен поперечный профиль русла реки с распределением разностей в измеренных скоростях течения различными датчиками. Основные различия наблюдаются в придонном слое. Если отклонение значений по ADCP можно объяснить отсутствием непосредственных измерений в придонной «слепой зоне», то отклонение данных электромагнитного датчика и гидрометрической вертушки не имеет однозначной трактовки. По мнению авторов, это явление может быть объяснено тем, что косоструйность течения вблизи дна выше, что увеличивает погрешность обоих средств измерения. Также у дна сконцентрировано наибольшее количество речных наносов, которые могут занижать показания скорости, полученные гидрометрической вертушкой.

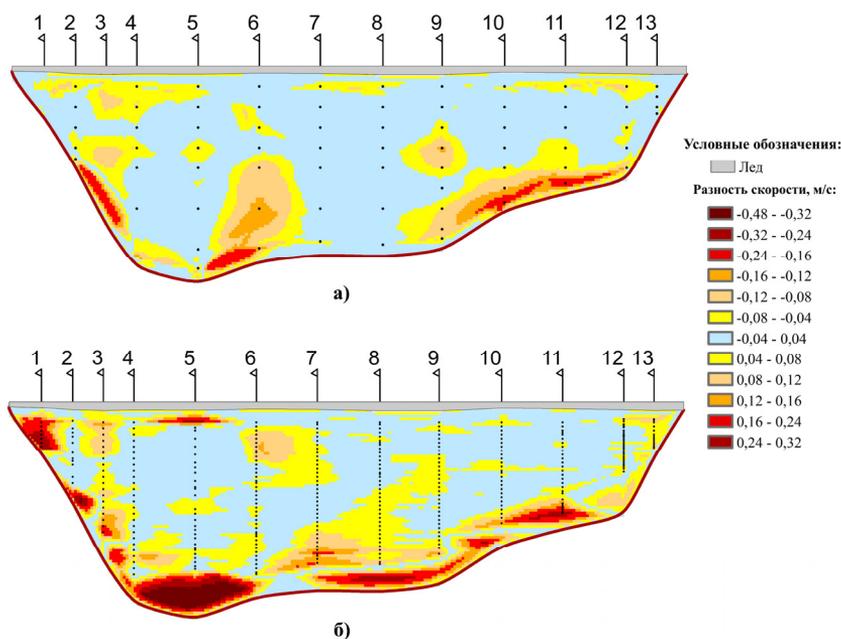


Рис. 3. Отклонения измеренных скоростей течения для р. Невы – в створе поселка имени Свердлова между: а – ГР21-М1 и «Посейдон-1», б – ГР21-М1 и RiverSurveyor M9

Эпюры скоростей (рис. 4) также имеют сходный, местами полностью идентичный характер как на стрежне, так и у берегов. В прибрежной зоне с более низкими значениями скоростей течения заметна разница в оценке скоростей течения, но на общем результате измеренного расхода это почти не сказывается.

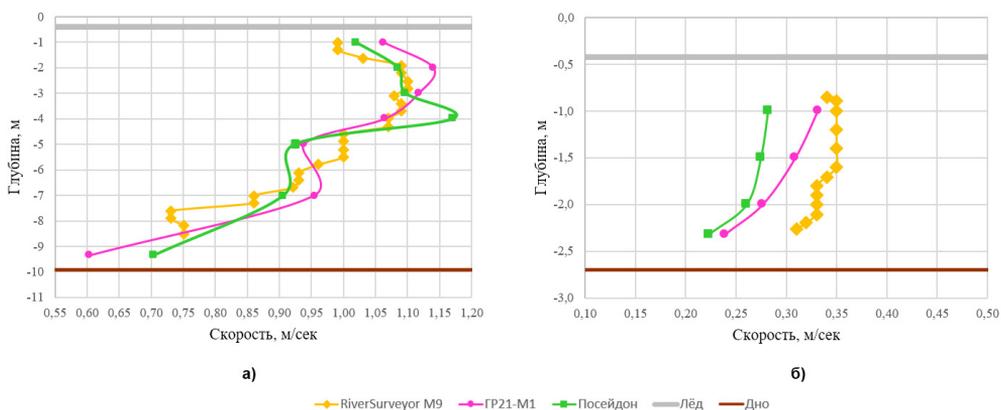


Рис. 4. Распределение скоростей течения по глубине на скоростной вертикали:  
 а – № 4, б – № 13 для р. Невы – поселка имени Свердлова

В ходе полевых испытаний на р. Оби возникали проблемы различного генезиса, одной из которых был отказ внутренней памяти профилографа вследствие непредвиденных сбоев и отключения ноутбука в процессе измерения. При этом в памяти ПО сохраняются измерения на предыдущей от момента отключения вертикали, но многократное повторение сбоя может привести к ошибке чтения внутренней карты памяти прибора. Проблема решилась форматированием внутренней карты памяти с помощью специального меню в ПО RSSL. Также необходимо предупреждать попадание влаги на незащищенные элементы ноутбука (разъемы, входы), следить за его зарядом.

Задание азимутального угла створа для данного типа профилографа определяет точность регистрируемых значений скоростей течения (при неправильном задании угла значения могут быть отрицательными). Азимутальный угол может быть введен и после измерений, а скорости при этом пересчитываются автоматически, но только для всех вертикалей в совокупности.

Отрицательные температуры воздуха приводят к быстрому разряду внешнего аккумулятора при производстве работ. В связи с этим всегда необходимо иметь запасные внешние источники питания и корректные зарядные устройства к ним.

Прямой и обратный ход измерения в створе р. Обь – слияние удалось выполнить всего за 86 мин (пример измерения в ПО RSSL на рис. 5). Результаты измерения расходов воды приведены в табл. 2.

Сумма расходов по протокам отлична от расхода воды после их слияния на 3,99 %, разница между прямыми и обратными ходами не превышает 5 % для каждого из створов, что говорит о высокой точности произведенных измерений.

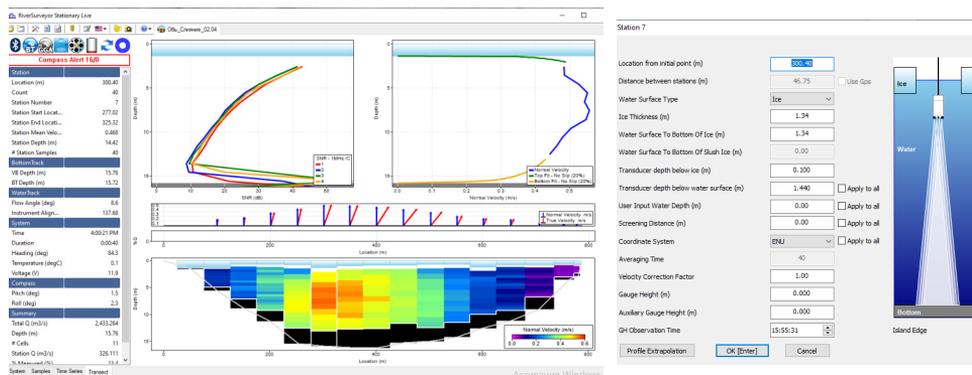


Рис. 5. Поперечный профиль р. Обь – слияние и пример основных меню ПО RSSL с характеристиками измеренного расхода воды

Таблица 2

Результаты измерения расходов воды на р. Оби

| Створ   | Расход воды, м <sup>3</sup> /с | Площадь сечения, м <sup>2</sup> | Глубина, м |       | Скорость течения, м/с |       |       | Ширина русла, м |
|---|--------------------------------|---------------------------------|------------|-------|-----------------------|-------|-------|-----------------|
|   |                                |                                 | Средн.     | Макс. | Средн.                | Мин.  | Макс. |                 |
| Прямой ход (от уреза правого берега к урезу левого)   |                                |                                 |            |       |                       |       |       |                 |
| 1. Вартовская   | 1070                           | 4615                            | 11,7       | 20,0  | 0,23                  | -0,02 | 0,34  | 396             |
| 2. Чехлоней   | 1225                           | 3182                            | 10,9       | 16,7  | 0,38                  | -0,08 | 0,67  | 297             |
| 3. Обь (слияние)                                      | 2435                           | 7935                            | 10,0       | 16,2  | 0,31                  | 0,05  | 0,56  | 787             |
| Обратный ход (от уреза левого берега к урезу правого) |                                |                                 |            |       |                       |       |       |                 |
| 1. Вартовская   | 1080                           | 4619                            | 11,9       | 20,0  | 0,23                  | 0,04  | 0,35  | 396             |
| 2. Чехлоней   | 1200                           | 3175                            | 10,4       | 16,7  | 0,39                  | -0,08 | 0,63  | 297             |
| 3. Обь (слияние)                                      | 2320                           | 7930                            | 10,2       | 16,3  | 0,29                  | 0,04  | 0,55  | 787             |

Дополнительно был проведен эксперимент по оценке точности экстраполяции верхней части эпюр скоростей течения с помощью ADCP. «Мертвая зона» профилирования по каналу скорости (где скорости не измеряются, а экстраполируются) в верхней части эпюры, ограниченная на рис. 5 зеленой линией, для ADCP в створе протоки Вартовской составляла 7 % от общей площади сечения (табл. 3). ПО RSSL автоматически экстраполирует скорости в верхней части эпюр. Для того чтобы убедиться в правильности данной экстраполяции, дополнительно были проведены сравнительные измерения ИСВП «Посейдон» в верхнем 3-метровом слое. При последующей постобработке в ПО RSSL верхняя часть эпюр по профилографу приводилась к значениям по «Посейдону» с помощью экстраполяционных коэффициентов –  $k$  (угловой коэффициент линейной функции экстраполирования) и  $B$  (процент используемых в расчете ячеек).

Таблица 3

Пересчет частных и общего расходов воды после правки эпюр скоростей течения в их верхней части для измерения расхода воды протоки Вартовской

| № скоростной вертикали | Расстояние от левого берега, м | Глубина $h$ , м          |                  |                         | Параметры экстраполяции в ПО |                                  | Частные расходы воды $Q$ , м <sup>3</sup> /с |                                   | $\Delta Q$ |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|------------|
|                        |                                |                          |                  |                         | $k$                          | Число используемых ячеек $B$ , % | $Q_{\text{экстр. ADCP}}$                     | $Q_{\text{испр. по «Посейдону»}}$ |            |
|                        |                                | $h_{\text{экстр. верх}}$ | $h_{\text{общ}}$ | $h_{\text{экстр. низ}}$ |                              |                                  |  |                                   |            |
| 1                      | 391                            | 0,19                     | 2,61             | 0,40                    | 0,22                         | 10                               | 0,58   | 0,57                              | 1,56       |
| 2                      | 379                            | 0,77                     | 6,47             | 1,47                    | 0,50                         | 45                               | 11,4   | 11,1                              | 3,04       |
| 3                      | 356                            | 0,78                     | 12,2             | 2,75                    | 0,35                         | 1                                | 55,0   | 54,8                              | 0,37       |
| 4                      | 327                            | 1,12                     | 12,2             | 3,75                    | 0,12                         | 15                               | 116  | 116                               | -0,09      |
| 5                      | 302                            | 0,75                     | 20,0             | 3,50                    | 0,20                         | 8                                | 147  | 148                               | -0,55      |
| 6                      | 274                            | 0,77                     | 19,8             | 4,29                    | 0,27                         | 25                               | 132  | 131                               | 1,05       |
| 7                      | 248                            | 1,17                     | 18,9             | 3,40                    | 0,12                         | 10                               | 122  | 122                               | -0,33      |
| 8                      | 221                            | 1,29                     | 17,1             | 4,05                    | 0,18                         | 10                               | 110  | 110                               | 0,11       |
| 9                      | 194                            | 1,26                     | 15,6             | 3,58                    | 0,26                         | 15                               | 101  | 99,5                              | 0,98       |
| 10                     | 168                            | 1,27                     | 14,5             | 3,52                    | 0,19                         | 5                                | 91,7   | 91,3                              | 0,47       |
| 11                     | 141                            | 1,26                     | 12,2             | 3,09                    | 0,26                         | 10                               | 71,5   | 71,0                              | 0,76       |
| 12                     | 113                            | 0,78                     | 9,61             | 2,11                    | 0,29                         | 15                               | 53,3   | 52,7                              | 1,10       |
| 13                     | 87                             | 0,75                     | 8,07             | 1,57                    | 0,37                         | 10                               | 34,6   | 33,7                              | 2,34       |
| 14                     | 62                             | 0,76                     | 6,75             | 1,75                    | 0,60                         | 5                                | 26,3   | 25,1                              | 4,41       |
| 15                     | 35                             | 0,29                     | 3,78             | 0,48                    | 0,35                         | 10                               | 11,6   | 11,3                              | 2,68       |
|                        |                                |                          |                  |                         |                              | $\Sigma$                         | 1084   | 1078                              | 0,52       |

Таким образом, для протоки Вартовской была пересчитана каждая из скоростных эпюр, получены новые частные (на вертикали) и общий расходы воды (табл. 3). Максимальная разница для расходов на вертикали составила 4,41 %, минимальная – 0,09 %, в среднем – 1,32 %. Для общего расхода разница составила всего 0,52 % (1084 м<sup>3</sup>/с до пересчета и 1078 м<sup>3</sup>/с – после). Характерной можно считать верхнюю часть эпюры № 14 на створе р. Обь – протока Вартовская (рис. 6).

Результаты показывают, что, несмотря на довольно значительные «слепые зоны» в верхней (у нижней кромки льда) части потока, экстраполяционные механизмы, заложенные в ПО RSS, позволяют нивелировать их влияние на конечный результат путем грамотной автоматической экстраполяции.

На самой маловодной из изучаемых рек – р. Оредеж расход воды оценивался с помощью трех СИ. Измерения производились при температуре воздуха от –5 до –15 °С. Процесс измерения представлен на рис. 7, а, б, в.

Измерения вертушкой и «Посейдоном» выполнялись детальным способом. Сравнительная характеристика полученных расходов воды приведена в табл. 4.

Расхождение полученных значений расходов воды по «Посейдону» и по ГР-21М1 довольно существенно (16 %) и не укладывается в нормативную точность в 5 %, по ADCP относительно гидрометрической вертушки – 2,36 %.

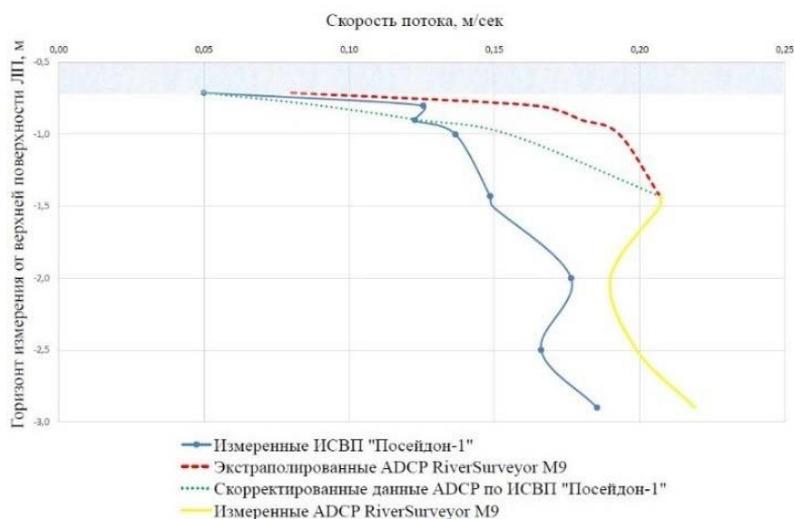


Рис. 6. Верхняя часть эпюры скоростей течения по скоростной вертикали № 14 р. Обь – протока Вартовская

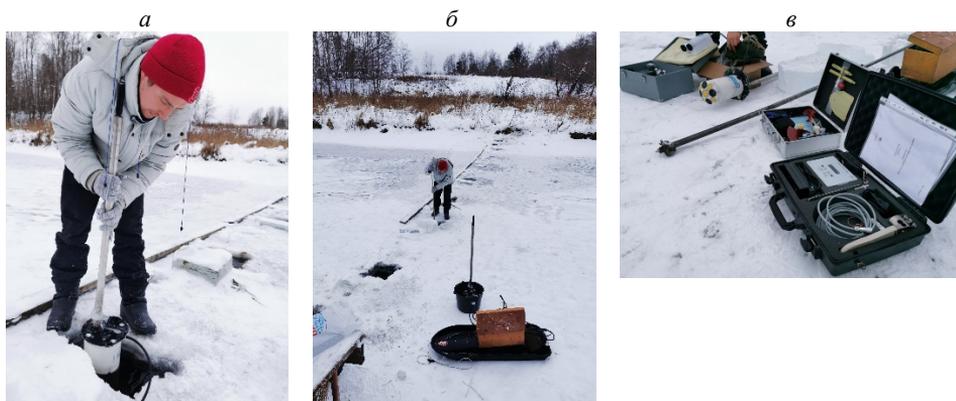


Рис. 7. Процесс измерения расхода воды на р. Оредеж: а – погружение ADCP; б – перенос ADCP между вертикалями; в – инструментальная база

Таблица 4

Сравнение полученных расходов воды на р. Оредеж

| Средство измерения    | $F$ , м <sup>2</sup> | $V_{\text{ср}}$ , м/с | $Q$ , м <sup>3</sup> /с |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| ИСВП ГР21М1           | 13,7                 | 0,155                 | 2,12                    |
| ИСВП «Посейдон-1»     | 13,7                 | 0,130                 | 1,78                    |
| Teledyne RDI RiverRay | 13,2                 | 0,156                 | 2,07                    |

На рис. 8, а, б отображены скоростные эпюры по р. Оредеж на максимальной и средней по глубине скоростных вертикалях.

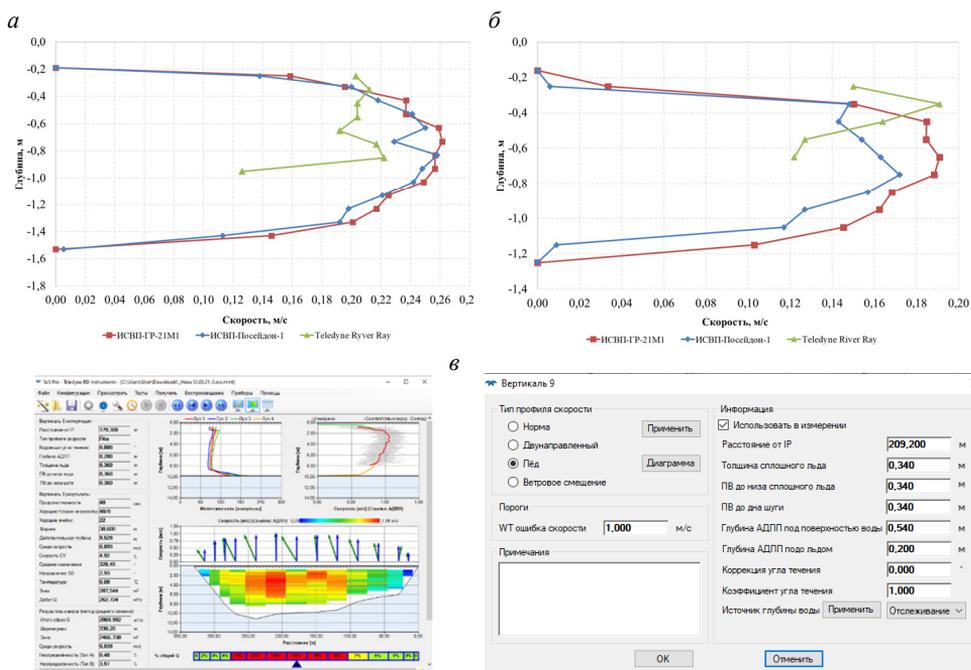


Рис. 8. Скоростные эпюры р. Ореж:

а – скоростная вертикаль № 5 с максимальной глубиной русла; б – скоростная вертикаль № 3 со средней глубиной русла; в – поперечный профиль р. Ореж – пос. Даймище и пример основных меню ПО SxS Pro с характеристиками измеренного расхода воды

Как видно из рисунков, RiverRay имеет «слепую зону» по глубине, которая особенно значительна на малых водотоках. Этим объясняется наименьшая из полученных площадь живого сечения у RiverRay. На всех эпюрах вертушка ГР-21М1 показывала повышенные скорости течения в сравнении с остальными СИ, вследствие этого расход также выше.

## Выводы

Ниже представлены особенности измерения расхода воды в зимних условиях при помощи ADCP в сравнении с классическими измерениями гидрометрической вертушкой.

1. Последовательность действий при измерении расхода воды в период ледостава четко определена. Основные производители профилографов уже выпустили специализированное программное обеспечение для измерений в таких условиях.

2. При соблюдении всех требований к методике измерений точность расчета расхода воды при помощи ADCP сопоставима с точностью вертушечных измерений.

3. Затраты времени на измерение с помощью ADCP значительно ниже. Это проявляется как в ходе самих измерений (меньшее количество точек измерений), подготовительных работ (бурение лунок меньшим диаметром), так и в процессе обработки результатов (расход воды считается автоматически).

4. Трудозатраты ниже. На больших реках отсутствует необходимость в перемещении подсобного оборудования между скоростными вертикалями и опускании датчика с грузом до дна водотока.

5. Наибольшая эффективность применения ADCP достигается при измерении расходов воды во время ледостава на больших реках. На средних реках метод эффективен только при использовании профилографов с малым диапазоном глубины профилирования (Teledyne RD Stream Pro и SonTek RS5). Для малых рек метод не имеет ощутимых преимуществ перед традиционными СИ.

6. Датчик ADCP обязательно должен быть термически акклиматизирован перед началом измерений.

7. Гидрометр должен быть хорошо ознакомлен с методикой работ и интерфейсом программного обеспечения. Рекомендуется проводить обучающие работы на реальных объектах в теплый период года.

8. Повышен риск выхода из строя оборудования. Если устройство гидрометрической вертушки просто и понятно, то исправить ADCP на месте работ не представляется возможным.

9. Не рекомендуется использовать при большом скоплении подо льдом шуги. Прибор трудно будет достать из-под льда.

10. Для измерений необходима специализированная штанга.

11. Всегда необходимо иметь с собой запасной источник питания.

12. Особое внимание стоит уделять обращению с соединительным кабелем ADCP – избегать перегибов, механических повреждений. Стоимость кабеля довольно высока, а производство работ без него невозможно. Необходимыми мерами в связи с этим являются разработка крепления к штанге, предусматривающего свободный выход кабеля на поверхность, обработка стенок лунки от зазубрин и шероховатостей перед началом измерения на вертикали.

13. Помимо основного комплекта оборудования, необходимо наличие надежного защищенного ноутбука, обеспечивающего бесперебойную работу в течение длительного времени (не менее 3 ч) в условиях сильных морозов, повышенной влажности, выпадения осадков в виде снега.

14. Особенности, описанные в п. 8–13, свидетельствуют о том, что измерение расходов воды с помощью ADCP подо льдом сопряжено с использованием большого числа технически сложного и дорогого оборудования, при выходе из строя которого измерить расход воды не удастся. Рекомендуется всегда иметь запасной вариант для измерения расхода воды.

15. Особое внимание стоит уделять особенностям позиционирования прибора в потоке, характерным для того или иного ADCP. Неправильное расположение ADCP в потоке может привести к значительным погрешностям.

### Список литературы

ФГБУ «ГГИ». Лаборатория гидрологических приборов (ЛГП). URL: <http://www.hydrology.ru/ru/structure/laboratoriya-gidrologicheskikh-priborov-lgp> (дата обращения: 12.10.2021).

*Banks C. J., Brandon M. A., Garthwaite P. H.* Measurement of Sea-ice draft using upward-looking ADCP on an autonomous underwater vehicle // *Annals of Glaciology*. 2006. Vol. 44. P. 211–216. <https://doi.org/10.3189/172756406781811871>

Campbell P. Standard operating procedures for under ice discharge measurements using ADCP's // *Water Survey of Canada*, 2015. 45 p.

Computing under-ice discharge: A proof-of-concept using hydroacoustics and the probability concept / J. W. Fulton, M. F. Henneberg, T. J. Mills, M. S. Kohn, B. Epstein, A. E. Hittle, W. C. Damschen, C. D. Laveau, J. M. Lambrecht, W. H. Farmer // *Journal of Hydrology*, 2018. Vol. 562. P. 733–748. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.073>

Guay C., Choquette Y., Durand G. Hydroacoustic Doppler technology: A key element in the improvement of winter hydrometric data quality // *Canadian Water Resources Journal*. 2012. Vol. 37 (1). P. 37–46. <https://doi.org/10.4296/cwrj3701867>

HyQuestSolutions. Under Ice Rod. URL: <https://www.hyquestsolutions.com.au/products/hardware/under-ice-rod> (дата обращения: 17.12.2021).

Marko J. R., Fissel D. B., Jasek M. Acoustic detection of ice and water velocities on the Peace River during the 2008–2009 winter // *Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice*. Lahti (Finland), 2010. 17 p.

Measuring suspended sediment in sand-bedded rivers using down-looking acoustic doppler current profilers / M. Wood, R. Szupiany, J. A. Boldt, T. Straub, M. M. Domanski // *Proceedings of the Joint Federal Interagency Sedimentation and Hydrologic Modeling Conference*. Reno (Nevada), 2019. 15 p.

Spatiotemporal changes in the concentration and composition of suspended particulate matter in front of Hansbreen, a tidewater glacier in Svalbard / M. Moskalik, J. Cwiakala, W. Szczucinski, A. Dominiczak, O. Glowacki, K. Wojtysiak, P. Zagorski // *Oceanologia*. 2018. Vol. 60 (4). P. 446–463. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.03.001>

Teledyne RD instructions and manuals. SxS Pro Software User's Guide. 2015. 132 p.

USGS Hydroacoustic Forum. URL: <https://hydroacoustics.usgs.gov> (дата обращения: 17.09.2021)

USGS Podcast: Common questions when using ADCPs under ice (podcast). URL: <https://hydroacoustics.usgs.gov/training/podcasts/ADCPice/ADCPice.mp4> (дата обращения: 18.09.2021)

Xylem brand instructions and manuals. SonTek RiverSurveyor S5/M9 System Manual. Software Version 4.1. Firmware Version 4.02. 2018. 245 p.

## References

FGBU "GGI". *Laboratoriya gidrologicheskikh priborov (LGP)* [Federal State Budgetary Institution "SHI". Department of Hydrological Instruments (DHI)]. Available at: <http://www.hydrology.ru/ru/structure/laboratoriya-gidrologicheskikh-priborov-lgp> (date of access: 10.12.2021).

Banks C.J., Brandon M.A., Garthwaite P.H. Measurement of Sea-ice draft using upward-looking ADCP on an autonomous underwater vehicle. *Annals of Glaciology*, 2006, vol. 44, pp. 211–216. <https://doi.org/10.3189/172756406781811871>

Campbell P. Standard operating procedures for under ice discharge measurements using ADCP's. *Water Survey of Canada*, 2015, 45 p.

Fulton J.W., Henneberg M.F., Mills T.J., Kohn M.S., Epstein B., Hittle A.E., Damschen W.C., Laveau C.D., Lambrecht J.M., Farmer W.H. Computing under-ice discharge: A proof-of-concept using hydroacoustics and the probability concept. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 562, pp. 733–748. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.073>

Guay C., Choquette Y., Durand G. Hydroacoustic Doppler technology: A key element in the improvement of winter hydrometric data quality. *Canadian Water Resources Journal*, 2012, vol. 37 (1), pp. 37–46. <https://doi.org/10.4296/cwrj3701867>

HyQuestSolutions. Under Ice Rod. Available at: <https://www.hyquestsolutions.com.au/products/hardware/under-ice-rod> (date of access: 12.17.2021).

Marko J.R., Fissel D.B., Jasek M. Acoustic detection of ice and water velocities on the Peace River during the 2008–2009 winter. *Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice*. Lahti (Finland), 2010, 17 p.

Wood M., Szupiany R., Boldt J.A., Straub T., Domanski M.M. Measuring suspended sediment in sand-bedded rivers using down-looking acoustic doppler current profilers. *Proceedings of the Joint Federal Interagency Sedimentation and Hydrologic Modeling Conference*. Reno (Nevada), 2019, 15 p.

Moskalik M., Cwiakala J., Szczucinski W., Dominiczak A., Glowacki O., Wojtysiak K., Zagorski P. Spatiotemporal changes in the concentration and composition of suspended particulate matter in front of Hansbreen, a tidewater glacier in Svalbard. *Oceanologia*, 2018, vol. 60 (4), pp. 446-463. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.03.001>

*Teledyne RD instructions and manuals. SxS Pro Software User's Guide*, 2015, 132 p.

*USGS Hydroacoustic Forum*. Available at: <https://hydroacoustics.usgs.gov> (date of access: 09.17.2021)

*USGS Podcast: Common questions when using ADCPs under ce (podcast)*. Available at: <https://hydroacoustics.usgs.gov/training/podcasts/ADCPIce/ADCPIce.mp4> (date of access: 09.18.2021)

*Xylem brand instructions and manuals. SonTek RiverSurveyor S5/M9 System Manual Software Version 4.1 Firmware Version 4.02*. 2018. 245 p.

#### Сведения об авторах

##### **Бузмаков Сергей Викторович**

научный сотрудник, заведующий,  
лаборатория гидрологических приборов  
Государственный гидрологический  
институт  
Россия, 199004, г. Санкт-Петербург,  
2-я линия Васильевского острова, 23  
e-mail: s.buzmakov@hydrology.ru

##### **Юхно Артем Владимирович**

научный сотрудник  
лаборатория гидрологических приборов  
Государственный гидрологический  
институт  
Россия, 199004, г. Санкт-Петербург,  
2-я линия Васильевского острова, 23  
e-mail: artem-ardene@mail.ru

##### **Зорина Алиса Андреевна**

ведущий инженер  
лаборатория гидрологических приборов  
Государственный гидрологический  
институт  
Россия, 199004, г. Санкт-Петербург,  
2-я линия Васильевского острова, 23  
e-mail: zorinaalisa@mail.ru

#### Information about the authors

##### **Buzmakov Sergei Victorovich**

Research Scientist, Head, Hydrological  
Instruments Laboratory  
State Hydrological Institute  
23, Vasilyevsky Island, 2nd line,  
Saint Petersburg, 199004, Russian Federation  
e-mail: s.buzmakov@hydrology.ru

##### **Iukhno Artem Vladimirovich**

Research Scientist, Hydrological Instruments  
Laboratory  
State Hydrological Institute  
23, Vasilyevsky Island, 2nd line,  
Saint Petersburg, 199004, Russian Federation  
e-mail: artem-ardene@mail.ru

##### **Zorina Alisa Andreevna**

Lead Engineer  
Hydrological Instruments Laboratory  
State Hydrological Institute  
23, Vasilyevsky Island, 2nd line,  
Saint Petersburg, 199004, Russian Federation  
e-mail: zorinaalisa@mail.ru

**Код научной специальности:** 25.00.27

Статья поступила в редакцию **01.02.2022**; одобрена после рецензирования **28.02.2022**; принята к публикации **03.03.2022**  
The article was submitted **February, 1, 2022**; approved after reviewing **February, 28, 2022**; accepted for publication **March, 3, 2022**