

О ПРИМЕНЕНИИ ИНКЛИНОМЕТРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕЧЕНИЙ В ПРИДОННОМ СЛОЕ И В ТОЛЩЕ МОРЯ

А. К. Амбросимов, А. А. Кондрашов, А. С. Щука, А. О. Корж

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: ambrosimov@ocean.ru*

В работе рассматриваются метрологические особенности применения инклинометров при измерении течений на дне и на буйковых станциях *in situ*. Показаны результаты сравнения синхронных измерений течений с помощью ADCP и инклинометров в натуральных морских условиях Карского моря на дне и в толще моря.

Ключевые слова: инклинометр, ADCP, Карское море, придонные наблюдения, буйковые станции, измерения, сравнение

Введение

Целью настоящего исследования является демонстрация возможности применения приборов инклинометрического типа для использования в океанологических исследованиях. В последние годы в отечественных морских исследованиях возникли проблемы, связанные с использованием западного измерительного оборудования, в том числе доплеровских акустических измерителей течений, из-за высокой стоимости приборов и санкционных ограничений.

Постановки долговременных океанологических станций дают возможность проводить исследования пространственно-временной изменчивости океанологических полей, что особенно важно в период климатических изменений на планете, а отсутствие, задержка и дороговизна акустических приборов затрудняют выполнение этих задач.

Выходом из создавшегося положения может быть разработка и внедрение более простых и дешевых приборов, основанных на других принципах измерений. В работе рассматривается, в частности, инклинометрический метод определения скорости и направления течения – ИИТ (Инклинометрический измеритель течений, в англоязычной литературе TCM – tilt current meter).

Инклинометрический принцип измерения был предложен еще в начале XX века, описан в работе (Pritchard, Burt, 1951) и получил развитие в океанологии вместе с появлением регистраторов, способных осуществлять запись информации в течение продолжительного времени. В качестве регистрирующего устройства в первых моделях использовалась фотокамера с электрически управляемым

затвором, которая с заданным интервалом времени осуществляла фотофиксацию отвеса (Daubin, Scally, Tusting, 1977; Syck, 1974). В дальнейшем для определения угла наклона был применен электронный акселерометр, а для определения направления наклона модуль электронного компаса с регистрацией данных в электронную память. Конструкции упомянутых измерителей были технически сложны и имели высокую стоимость. Ограниченность объема памяти не позволяла вести продолжительную запись при высокой частоте дискретизации.

Дальнейшее развитие инклинометрический измеритель получил относительно недавно (Hansen et al., 2017; Sheremet, 2010) в результате появления дешевых сенсоров ускорения и магнитного поля, выполненных по микроэлектромеханическим технологиям (в англоязычной литературе MEMS). Эти микросхемы нашли широкое применение в портативных устройствах для определения собственной пространственной ориентации, таких, как мобильные телефоны, очки виртуальной реальности и др. Такие сенсоры, как правило, представляют собой интегральную микросхему, в одном корпусе которой объединены компоненты акселерометров и магнитометров. Кроме того, развитию инклинометрических измерителей способствовал бурный рост объема электронных накопителей данных, появление на рынке высокопроизводительных микроконтроллеров и снижение стоимости электронных компонентов в целом. Отметим, что инклинометры, как датчики угла наклона, используются довольно широко в различных отраслях науки и техники. Измерения с помощью приборов такого типа были реализованы и в океанологических исследованиях (Амбросимов, 2023; Амбросимов, Ковалев, 2023; Баранов et al., 2023; Флинт, Поярков, Римский-Корсаков, 2021; Никифоров et al., 2019; Сорохтин et al., 2020; Кравчишина et al., 2022).

Исследования по сравнению данных акустических измерителей течений и измерителей инклинометрического типа проводились ранее. В работах (Баранов и др., 2018; Syck, 1974) для сравнения использовались ИИТ с положительной плавучестью и с применением в своем составе современных сенсоров ускорения и магнитного поля, однако без демпфирующих колебания элементов в своей конструкции. В работе (Syck, 1974) R2 коэффициент детерминации для абсолютных скоростей составил 0.97–0.98, в то время как в работе (Баранов и др., 2018) коэффициент для абсолютных скоростей был 0.8335, а для направления течений – 0.8445, что подтверждает высокую степень корреляции между данными измерений ИИТ и ADCP. Отметим, что эти эксперименты проводились при установке приборов на дно в непосредственной близости друг от друга.

В морских экспериментах по сравнению данных ADCP и ИИТ были использованы: ADCP Sontek Aronaut MD (USA) и ИИТ, разработанный и изготовленный в АО ИО РАН в г. Калининграде под руководством д.ф.-м.н. В. Т. Паки (Пака и др., 2019). Используемые в работе ИИТ отличаются тем, что они не испытывают собственных колебаний в потоке, что существенно увеличивает соотношение полезный сигнал/шум по сравнению с их аналогами. Цель данного исследования – это необходимость дать метрологическую оценку применения инклинометров взамен ADCP при измерениях в натуральных условиях *in situ* на дне и на буйковых станциях в толще моря.

Приборы и методы измерений

Принцип действия инклинометрического прибора основан на отклонении стержня, положительной или отрицательной плавучести, закрепленного концом в нижней (или верхней) точке, под действием набегающего потока воды и регистрации его угла наклона в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Регистрация осуществляется за счет встроенных датчиков: акселерометра и компаса.

Принцип работы ИИТ заключается в пересчете градуировочных кривых – угла наклона тела прибора в потоке и данных магнитного датчика в скорость и направление течения. Представленный в работе ИИТ с помощью короткой цепочки нижним концом крепится к неподвижной в потоке опоре (якорю) или к опоре, закрепленной на линии фала на буйковой океанологической станции в толще моря (рисунок 1), а второй конец при нулевой скорости обтекания принимает вертикальную ориентацию. Верхний конец отклоняется в сторону движения воды в зависимости от силы потока под соответствующим углом к горизонту. По углу наклона к горизонту и географическому направлению плоскости наклона с помощью градуировочных кривых рассчитывается скорость и направление потока.

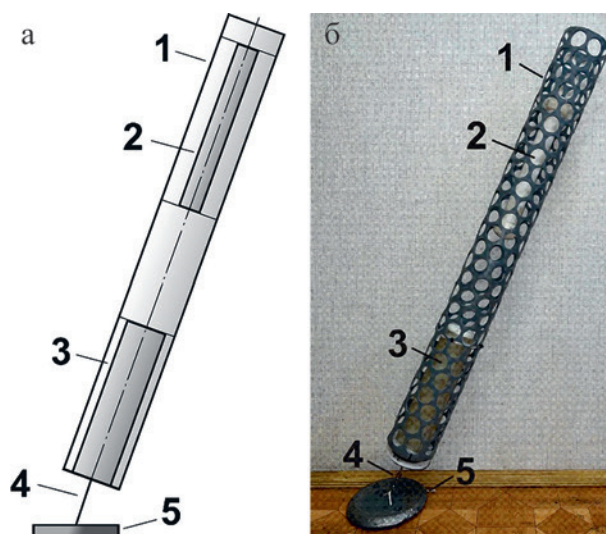


Рис. 1 – Упрощенная схема (а) и фотография инклинометрического измерителя (б):
1 – перфорированная оболочка, 2 – модуль дополнительной плавучести (поплавок),
3 – гермоконтейнер с электроникой, 4 – гибкий подвес (металлическая цепочка),
5 – донный груз (2.5 кг)

Градуировка ИИТ выполняется в бассейне, над поверхностью которого по рельсам перемещается тележка с закрепленными на раме ИИТ. Для получения градуировочных коэффициентов производится серия прогонов тележки над бассейном с известными скоростями. Градуировка магнитного датчика осуществляется на специальном стенде в лабораторных условиях. На рисунке 2 представлены градуировочные кривые для двух партий ИИТ.

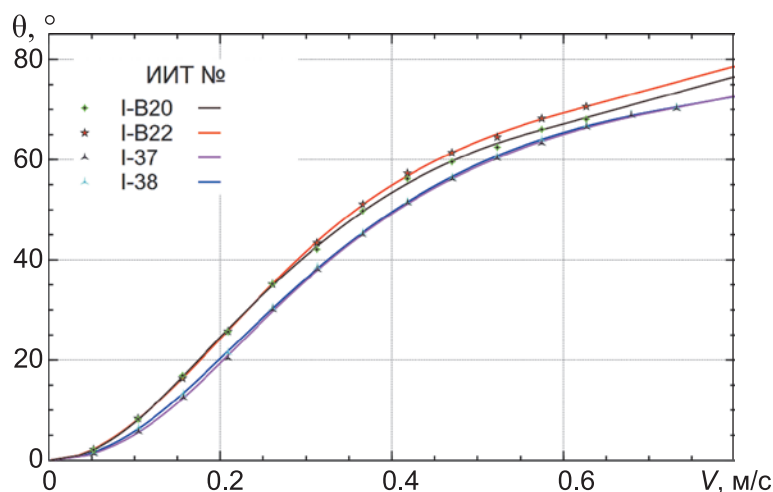


Рис. 2 – Градуировочные кривые для двух партий ИИТ.
По оси X – скорость движения датчиков в бассейне, по оси Y – угол отклонения ИИТ

Различия в градуировочных кривых для однотипных ИИТ связаны с несовершенством ручного изготовления корпусных деталей в лабораторных условиях. Очевидно, что изготовление подобных приборов в промышленных масштабах с применением станков с программным управлением обеспечит большую схожесть их массогабаритных свойств, а значит и характеристик. В нашем случае используются индивидуальные коэффициенты для каждого конкретного ИИТ.

Нелинейный характер зависимости угла отклонения ИИТ от скорости набегающего потока воды приводит к возникновению значительных ошибок при последующем определении скорости на краях диапазона угла отклонения. Исходя из возрастающей погрешности измерений с увеличением скорости течения для представленной конструкции ИИТ, можно рекомендовать рабочий диапазон измеряемых скоростей 3–56 см/с, при этом относительная погрешность измерения скорости находится в диапазоне 3–15 %. Погрешность определения скорости возрастает с увеличением скорости потока и как следствие наклоном тела прибора; так, для скоростей, выходящих за этот диапазон, она может увеличиться (Пака и др., 2019).

Ограниченность диапазона скорости является недостатком инклинометрического измерителя. Однако внесение изменений в конструкцию прибора, например, изменение плавучести, позволяет применять ИИТ с положительной плавучестью для меньших или больших скоростей. Кроме того, значительная погрешность для малых скоростей ИИТ нивелируется существенной чувствительностью, зависящей от разрешения применяемой микросхемы акселерометров и составляющей сотые доли градуса его наклона.

Создание одинаковых условий для сравнения приборов, разработанных на разных принципах, в натуральных морских условиях довольно сложно – разные постоянные времени приборов, разные объемы осреднения воды и невозможность создания одинаковых внешних условий. В работе предлагаются два способа оценки метрологии приборов – это сравнение показаний двух ИИТ между собой в морской среде с

примерно одинаковыми условиями измерения течений и второй – это измерение двумя рядом закрепленными приборами в толще моря на линии заякоренной буйковой станции.

Конструктивно ИИТ построен по модульному принципу (рисунок 1). Каркасом модульной сборки является цилиндрическая оболочка, изготовленная из трубы ПВХ с перфорированными стенками. Внутри оболочки соосно размещены приборный модуль – гермоконтейнер с постоянной положительной плавучестью и модуль плавучести – дополнительный поплавок, необходимый для регулировки сил плавучести. Подвижная часть прибора прикреплена с помощью подвеса к тяжелому неподвижному грузу – платформе. В качестве подвеса используется короткая металлическая цепочка, состоящая из нескольких звеньев, позволяющая телу маятника отклоняться от вертикали на угол до $60\text{--}70^\circ$ в любом азимутальном направлении без соприкосновения с платформой. Массивные элементы находятся внутри гермоконтейнера. Все элементы сборки, за исключением подвеса, выполнены из материалов с плотностью, близкой к плотности воды.

Основой электронного блока является восьмиразрядный микроконтроллер ATMEGA328p (производства Microchip Technology). В качестве чувствительного элемента применена микросхема LSM303DLHC (ST Microelectronics), совмещающая в одном корпусе три компонента акселерометра и три компонента магнитометра. В нашем случае используются наиболее чувствительные диапазоны измерения, составляющие для ускорения $\pm 2g$ и ± 1.3 Гаусса для магнитного поля. Выбор данной микросхемы обусловлен ее доступностью, малой стоимостью и малым током потребления. Функции часов реального времени и календаря выполняет микросхема DS3231SN (Analog Devices), в которой для повышения точности применена термокомпенсация частоты задающего кварцевого генератора. Термистор в составе микросхемы часов реального времени предоставляет температуру ее корпуса с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$ и разрешением 0.25°C . Микроконтроллер выполняет функции опроса датчиков и часов реального времени по заложенной в него программе с последующей записью данных на электронную карту памяти формата microSD. Электропитание обеспечивается шестью щелочными элементами типоразмера AA, напряжение которых понижается посредством импульсного регулятора до необходимого значения. Такая схема обеспечивает продолжительность работы прибора в течение двух месяцев в непрерывном режиме и до шести месяцев с периодическим нахождением в спящем.

Сравнение характеристик ИИТ и ADCP показало, что приборы обладают как преимуществами, так и недостатками друг перед другом. Так, у ADCP Sontek-MD высокая частота наблюдений, это абсолютный прибор, не требующий калибровки, сигнал не зависит от обрастания прибора в воде, имеет отлаженное программное обеспечение, его недостатки – в нашем варианте ADCP невозможно применить для придонных наблюдений, высокая стоимость, осреднение скорости и направления течения по большому объему воды и, в условиях санкций, недоступны для приобретения. ИИТ это довольно дешевый в изготовлении прибор, позволяет производить

измерения с постоянного времени 1–2 сек, при этом течение прибор измеряет в значительно меньшем объеме, и наблюдения можно вести непосредственно в придонном слое. Технические характеристики приборов Sontek Argonaut MD и ИИТ представлены в таблицах 1 и 2.

Табл. 1 – Технические характеристики измерителя течений Sontek Argonaut MD

Параметр	Значение
Максимальная глубина погружения (измерения), м	600
Рабочая частота, МГц	1.5
Диапазон измеряемой скорости, м/с	0–6
Разрешающая способность, см/с	0.1
Точность единичного измерения, см/с	± 0.5
Величина мертвой зоны, м	0.35
Объем воды, в котором проводится измерение, м ³	16
Максимальная частота опроса, Гц	1 Гц
Точность определения направления	± 2°
Рабочая температура, °С	–5°...+40°
Автономность, мес	12

Табл. 2 – Технические характеристики ИИТ

Параметр	Значение
Максимальная глубина погружения (измерения), м	800
Диапазон измеряемой скорости, м/с	0.03 – 0.56
Разрешающая способность, см/с	< 0.1
Максимальная относительная погрешность	3–15%
Точность определения направления	± 10°
Максимальная частота опроса, Гц	5 Гц
Рабочая температура, °С	–5°...+40°
Автономность, мес	6

Определение характеристик течения при образовании дрейфов на дне Карского моря

Одной из наиболее подходящих сфер применения ИИТ являются придонные наблюдения, где нет, как правило, рывков скоростей и турбулентности из-за небольших скоростей течения. К таким сферам исследований относится изучение контуритовых дрейфов в Карском море. Контуритовые дрейфы образуются в результате аккумуляции осадочного материала, переносимого придонными (контурными) течениями. На морском дне эти осадочные тела отчетливо выделяются по своей приуроченности к определенным структурным элементам дна, морфологии, строению, особенностям

осадконакопления и встречаются в различных обстановках придонной среды, значительно варьируя по своим размерам и мощностям (Faugères et al., 1999; Rebesco et al., 2008). Контуритовые дрифты известны во многих районах Мирового океана, но в Карском море эти образования были впервые обнаружены при анализе батиметрических и сейсмоакустических съемок, полученных в 41-ом и 49-ом рейсах НИС «Академик Николай Страхов» в 2019 и 2020 гг. (Отчет о работах в 41-м рейсе АНС, 2019; Отчет о работах в 49-м рейсе АНС, 2020). Поэтому одной из целей этой работы в 89-ом рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (рисунок 3а) была оценка метрологической достоверности придонных измерений скорости и направления течения с помощью ИИТ и определение динамических характеристик придонных течений, при которых происходит образование дрифтов в Карском море (Faugères et al., 1999; Rebesco et al., 2008).

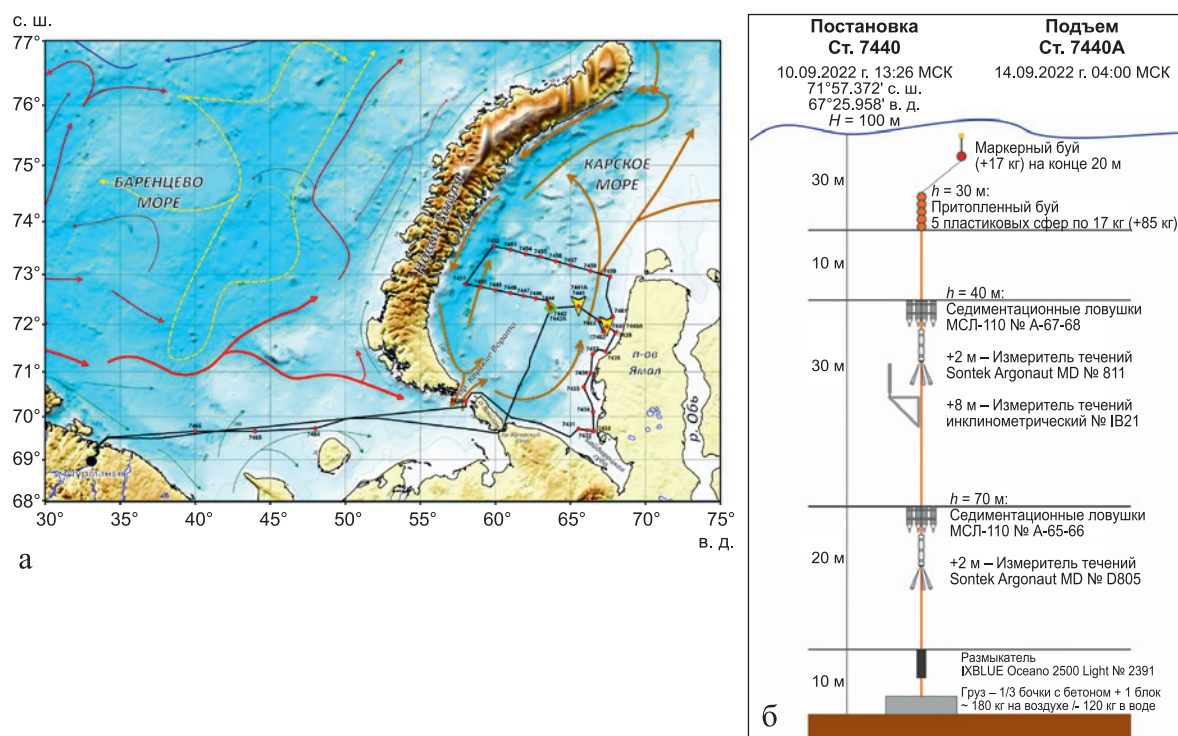


Рис. 3 – Карта работ (а) и схема буйковой станции (б). Желтыми стрелками показаны места постановок ПБС

Станция ПБС-7442А (рисунок 3б) была установлена в районе дрифта в сентябре 2022 г. на глубине 123 м и укомплектована двумя ИИТ, расположенными на расстоянии 10 м друг от друга на дне моря, для измерения придонных течений. На рисунке 4 представлены временная изменчивость модуля скорости течения и направления по данным ИИТ I-37 и I-38. Показания приборов практически идентичны, максимальные значения скоростей переноса составляют около 20 см/с. На рисунке 4 заметно проявляется 12-часовая приливная ритмика придонных течений.

Сравнение прогрессивно-векторных диаграмм течения (рисунок 5), полученных за 86 часов наблюдений двумя ИИТ I-37 и I-38, показало, что изменчивость

направлений течения у них несколько различна, что связано с физическими особенностями обтекания приборов, рельефом дна, линейной разнесенностью на дне на расстоянии 10 м, а также большой постоянной времени, так как прибор ограниченно реагирует на высокочастотную пульсацию скорости потока (Амбросимов, 2023; Амбросимов, 2024). Перенос вод в эксперименте происходил в СВ направлении, при этом суммарный перенос относительно измерителя I-37 составил 17821 м, а географический (от начальной до конечной точки измерений) – 10229 м, для измерителя I-38 эти значения были равны 15398 м и 8992 м, а средние скорости – 5.6 и 4.9 см/с. Эти скорости соответствуют общей картине осадконакопления на дрейфах. Полученные расхождения между суммарными переносами обоих ИИТ укладываются в ошибку калибровки приборов.

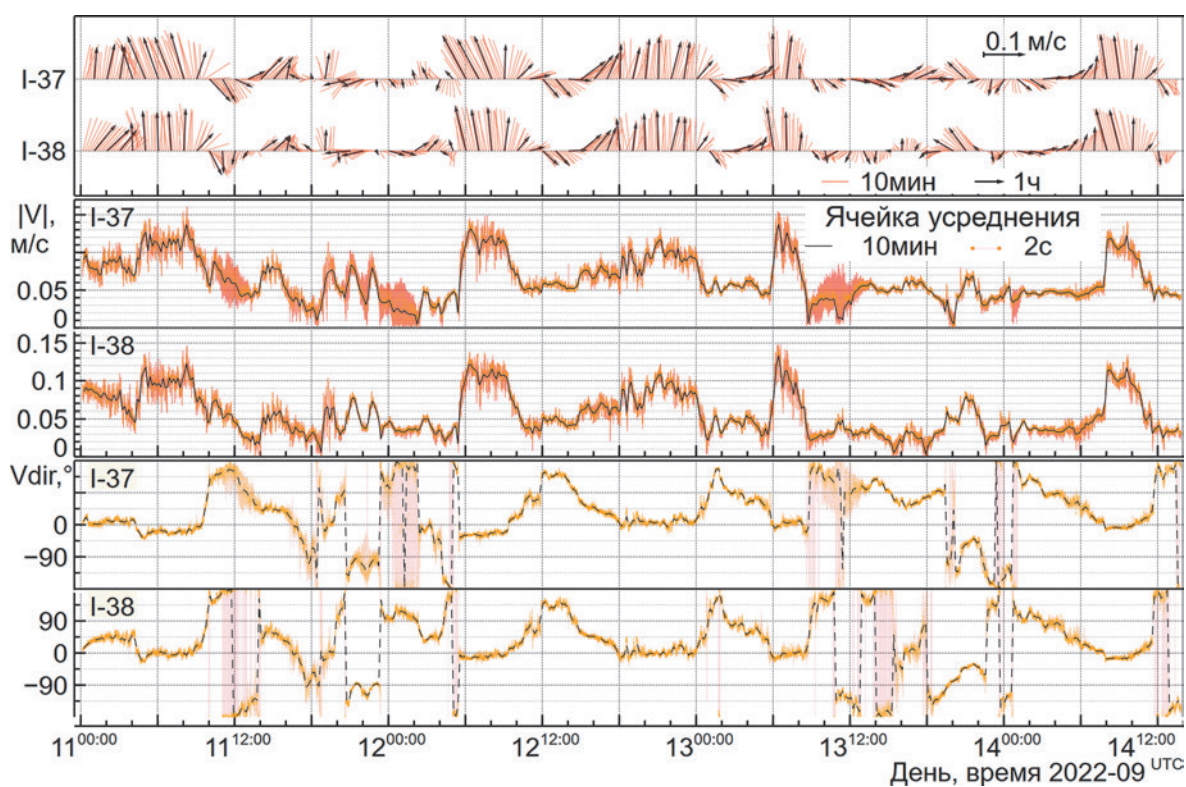


Рис. 4 – Временная изменчивость придонного модуля скорости и направления течения по данным инклинометров I-37 и I-38, установленных на дне на расстоянии 10 м друг от друга на ст. 7442 (координаты станции: 72°20.031' с. ш., 63°41.084' в. д.).

Сверху – представление в векторной форме; ниже представлены изменчивости модуля скорости ($|V|$) и направления ($Vdir^\circ$)

Для модуля скорости двух придонных измерителей определен коэффициент корреляции Пирсона, который составил 0.88, в то время как круговой коэффициент корреляции для направления равен 0.747.

По данным проведенного анализа скоростей и направлений переноса вод обоими ИИТ, можно считать, что ИИТ могут вполне успешно применяться при изучении низкочастотных и стационарных процессов.

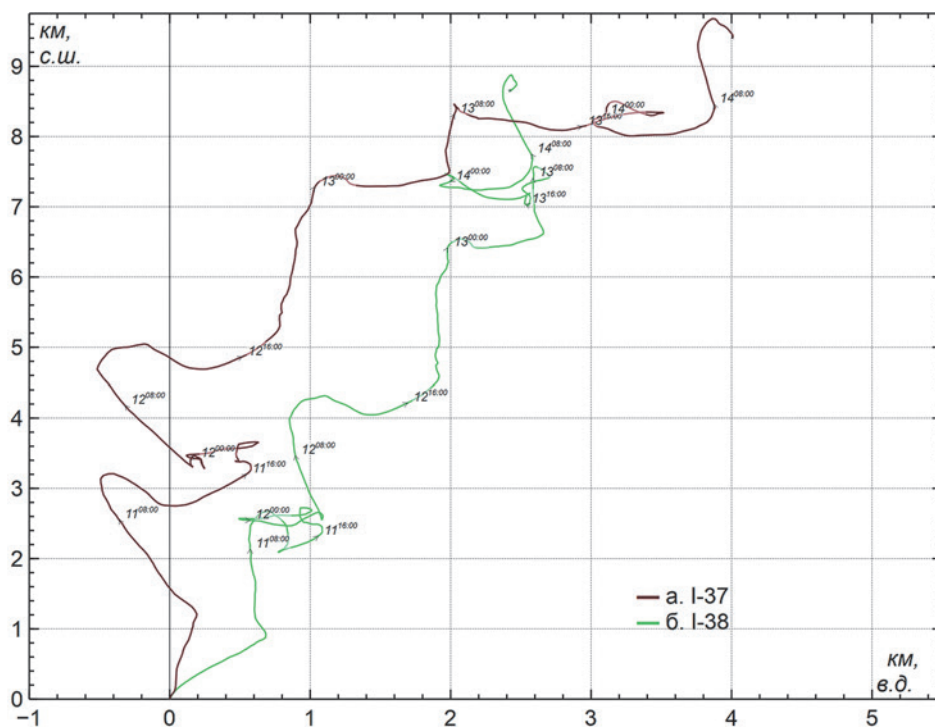


Рис. 5 – Прогрессивно-векторные диаграммы течений на ст. 7442А для двух ИИТ в придонном слое. Глубина постановки – 123 м, расстояние между ИИТ – 10 м, данные скорректированы по магнитному склонению

Эксперимент по сравнению данных ADCP и инклинометров при измерениях *in situ* на буйковых станциях в толще Карского моря

Эксперимент по измерению течений в натуральных морских условиях на буйковых станциях *in situ* был проведен в 89-1 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» с 10 по 14 сентября 2022 г. в ЮЗ части Карского моря. В эксперименте сравнивались показания ADCP Sontek и ИИТ при измерениях в толще моря. На глубинах 100 и 105 м были установлены две притопленные буйковые станции в координатах: ст. 7440 – 71.957 с. ш., 67.433 в. д. и ст. 7441 – 72.3669 с. ш., 65.433 в. д., на которых на горизонтах 45 м были установлены ADCP Sontek Argonaut MD № 811 и № 804, а на горизонтах 50 м были установлены ИИТ I-B21 и I-B22. Оба ИИТ одним концом крепились к треугольным рамам, которые были укреплены на линии фала, соединяющего якорный груз и буй (рисунок 36). Расстояние между станциями составляло около 180 км. Наблюдения на обеих станциях были проведены в течение 86 часов.

На рисунках 6 и 7 представлена изменчивость течения, полученная с помощью ADCP и ИИТ на близких горизонтах. Горизонты наблюдений обоих приборов отличались на 5 м, что связано с методикой измерений этими приборами. ADCP измеряет течение на удалении от себя 2–7 м в объеме около 16 м³, поэтому считалось, что ИИТ находится в центре объема вод, где течение измеряется ADCP. На рисунке 8 представлены для сравнения прогрессивно-векторные диаграммы течений.

На рисунках 6 и 7 наблюдаются полусуточные изменчивости течений, связанные с приливными полусуточными волнами. Анализ данных течений и прогрессивно-векторных диаграмм, полученных с помощью ADCP и ИИТ на ПБС-7440 и 7441 за 86 часов наблюдений, показал (рисунки 6 и 7), что величины скоростей и направлений течений у ADCP и ИИТ заметно отличаются. Если для обоих измерителей на ПБС-7440 диаграммы похожи и расхождение в скоростях течения доходило до 10 %, то для данных измерителей ПБС-7441 расхождение были значительно выше (Амбросимов, Ковалев, 2023; Амбросимов, 2024). Отметим, что ПБС-7441 отстояла на 180 км северо-западнее от ПБС-7440 и по данным ADCP ПБС-7441 находилась на острие взаимодействия вод Ямальского и западной ветви Обь-Енисейского течений, то есть в зоне высокой турбулентности. А поскольку постоянная времени у ИИТ довольно большая (1–2 с), отслеживать турбулентность он будет с большой погрешностью.

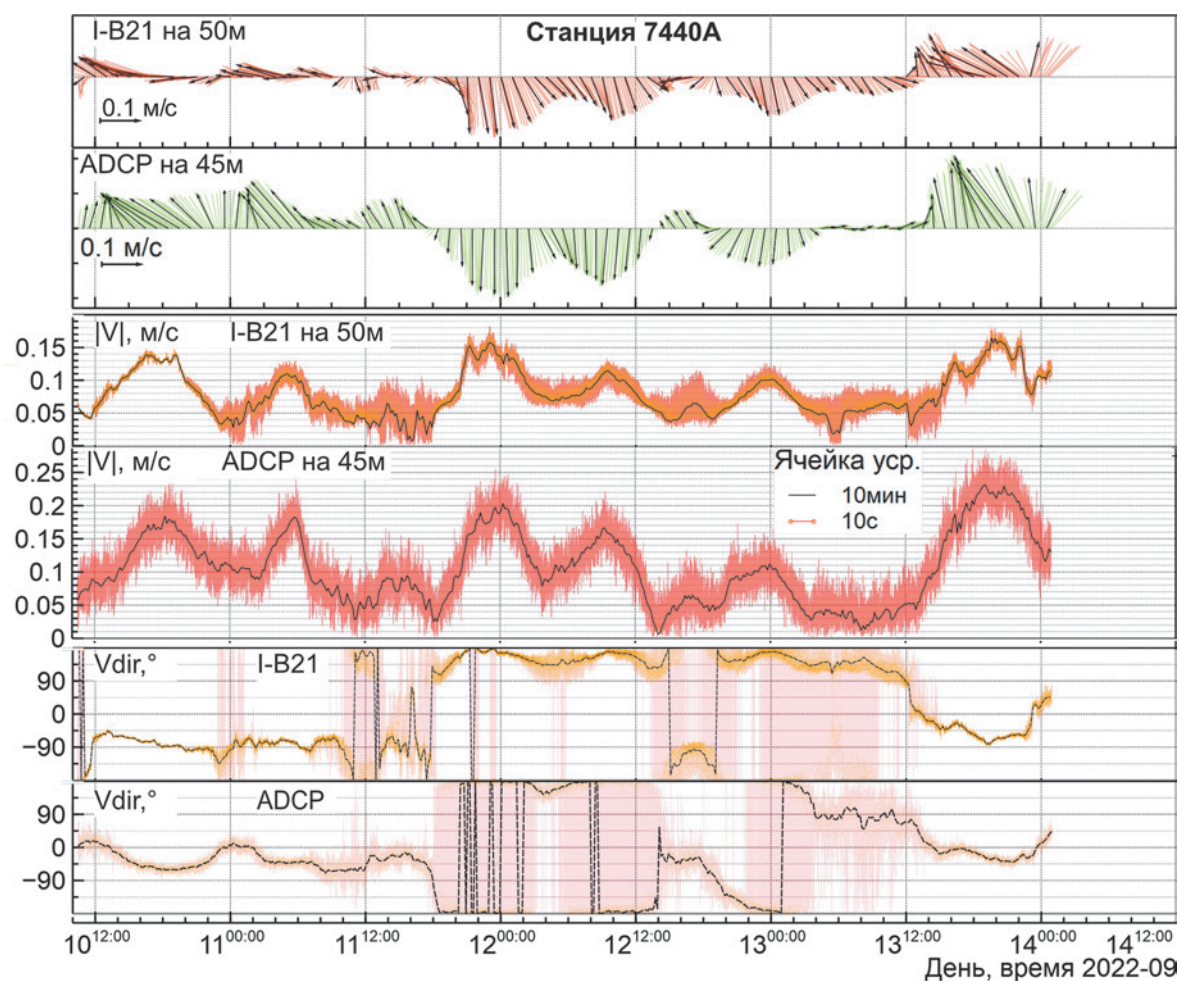


Рис. 6 – Временная изменчивость модуля скорости и направления течения по данным инклинометров I-B21 и ADCP № 811, установленных в толще воды на ст. 7440. Сверху – представление в векторной форме; ниже представлены изменчивости модуля скорости ($|V|$) и направления (V_{dir}°)

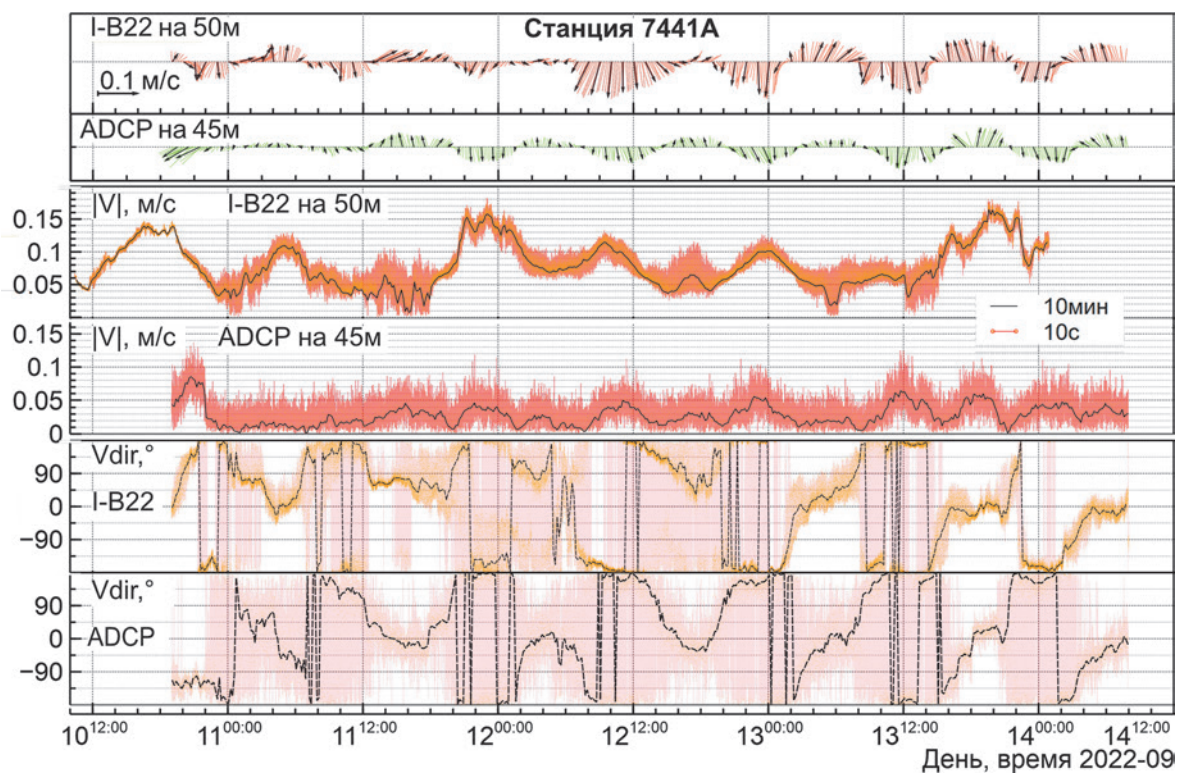


Рис. 7 – Временная изменчивость модуля скорости и направления течения по данным инклинометров I-B22 и ADCP № 804, установленных в толще воды на ст. 7441. Сверху – представление в векторной форме; ниже представлены изменчивости модуля скорости ($|V|$) и направления ($Vdir^\circ$)

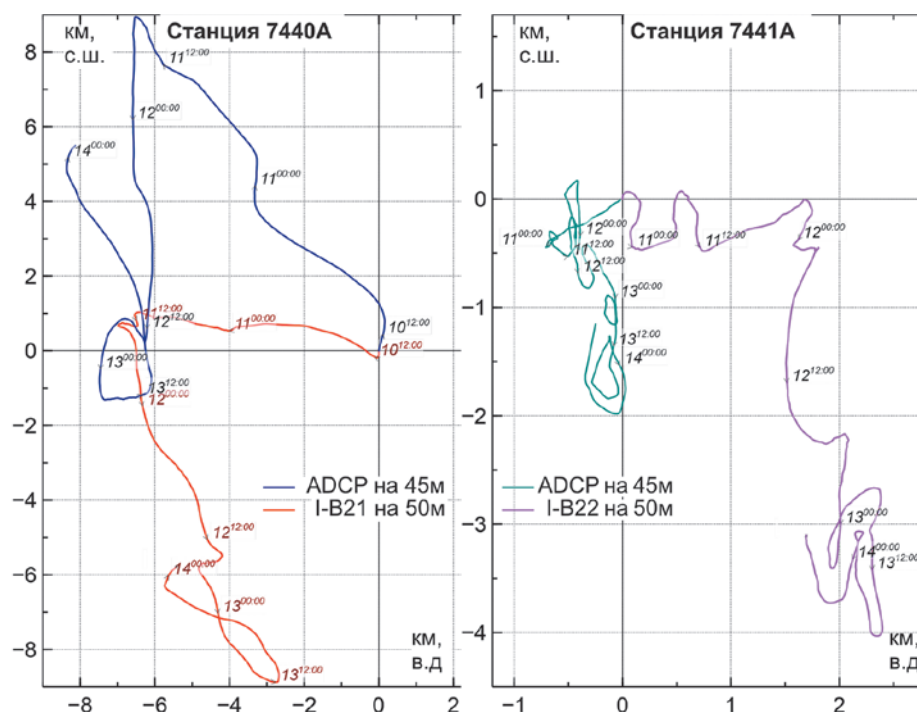


Рис. 8 – Прогрессивно-векторные диаграммы течений за 86 часов наблюдений, полученные при помощи ADCP и ИИТ на горизонте 50 м. Слева – для ст. 7440, справа – для ст. 7441

Задачу сравнения данных, полученных приборами разного типа, осложняет сильная зашумленность сигнала ADCP в наших условиях, связанная в первую очередь с высокой чистотой вод в районе исследования. Для нормальной работы ADCP требуется наличие в воде взвеси или воздушных пузырьков. Кроме того, будет влиять и разная дискретность получения данных. Акустический ADCP производит одно измерение раз в 10 секунд, в то время как ИИТ предоставляет данные с частотой 5 Гц. Для ст. 7740 среднееквадратическое отклонение модуля скорости без усреднения составило: для ADCP – 0.0555, для ИИТ – 0.0344. Для ст. 7741 среднееквадратическое отклонение модуля скорости – 0.0192 и 0.0197 соответственно. Если для станции ст. 7741 значения примерно равны, то для другой пары приборов значение для ADCP выше, что отображает зашумленность его сигнала. Кроме этого ADCP измеряет среднее течение в объеме воды около 16 м³, а ИИТ – в нескольких дм³.

Количественно оценена схожесть данных приборов двух типов. Корреляция определена при разных усреднениях и представлена в таблице 3.

Табл. 3 – Коэффициенты корреляции ADCP и ИИТ при разном усреднении данных

Параметр	Усреднение данных	ст. 7740	ст. 7741
Коэффициент корреляции модулей скорости	Без усреднения	0.803	0.237
	10 минут	0.858	0.397
	1 час	0.87	0.436
Круговой коэффициент корреляции направления	Без усреднения	0.501	-0.179
	10 минут	0.466	-0.217
	1 час	0.553	-0.0229

Используя пятиминутные выборки изменчивости течения по данным ИИТ, можно оценить поведение приборов на буйрепе по сравнению с аналогичными приборами, установленными в придонном слое на неподвижном якоре (рисунок 9). Очевидно, что элементы буйковой станции будут подвержены колебаниям под действием набегающего потока, которые будут передаваться посредством гибкого подвеса непосредственно на ИИТ, зашумляя полезный сигнал.

Высокочастотная изменчивость придонных ИИТ носит непериодический характер и может быть объяснена действием придонной турбулентности на поведение прибора. ИИТ, размещенные на буйрепе, испытывали периодические колебания с периодом ~4.4–8.6 с и амплитудой, соответствующей скорости течения до ~7 см/с. Период колебаний и их амплитуда зависели от скорости набегающего потока и направления его прихода, что может быть объяснено сложным режимом обтекания элементов конструкции буйковой станции, на что дополнительно указывает наличие цуговой структуры таких колебаний. Очевидно, что данные с ИИТ, полученные при установке их на буйковых станциях, должны быть подвергнуты осреднению при обработке. На рисунке 10 представлена спектральная плотность для четырех использовавшихся в эксперименте ИИТ. Хорошо заметны пики, соответствующие ~0.2 Гц для ИИТ, размещенных на буйрепе по сравнению с ИИТ в придонном слое.

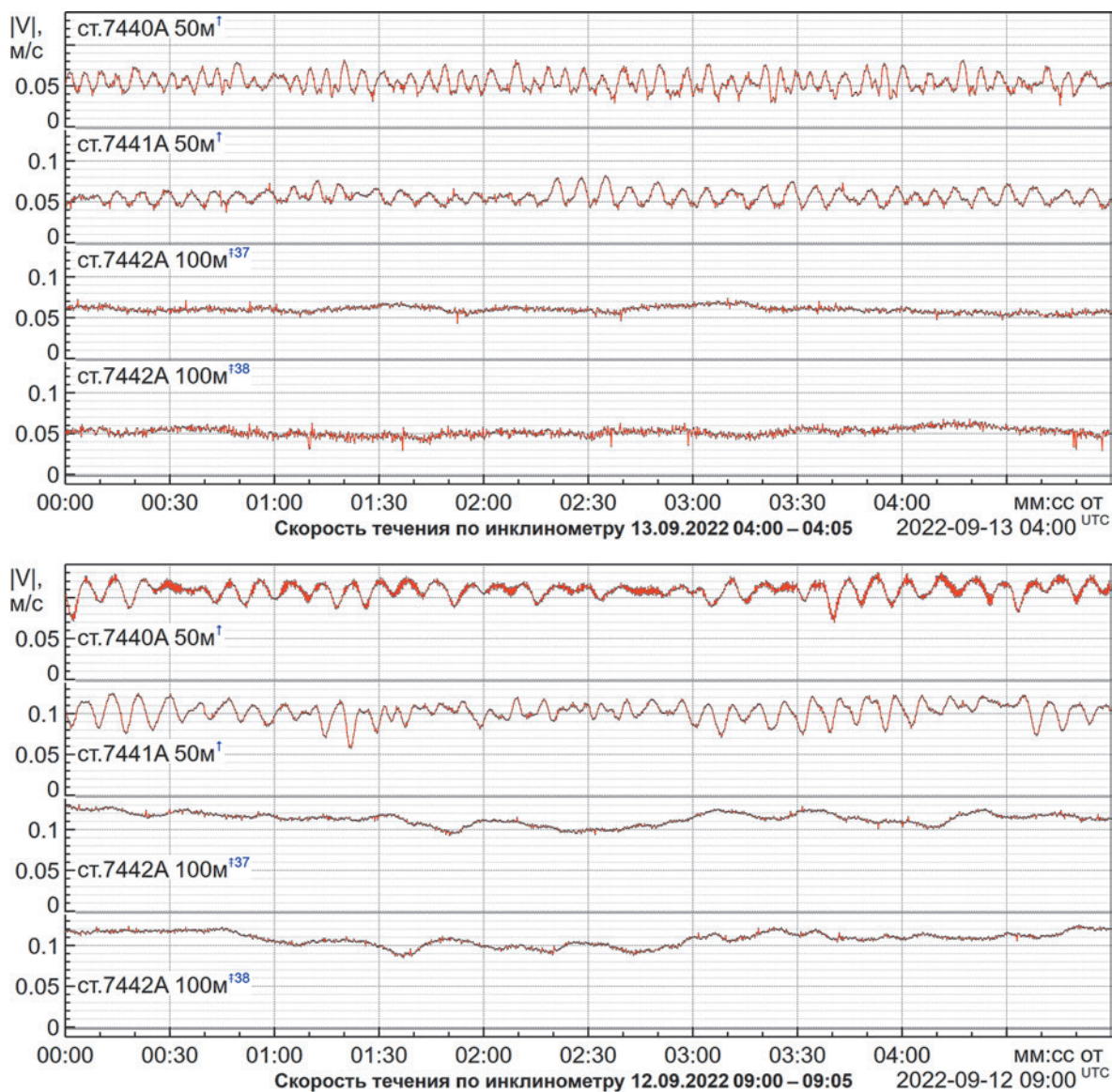


Рис. 9 – Пятиминутные выборки сигналов инклинометрических измерителей: верхняя группа – модули скорости течения при средней скорости движения воды около 5 см/с, нижняя группа – при скорости около 10 см/с

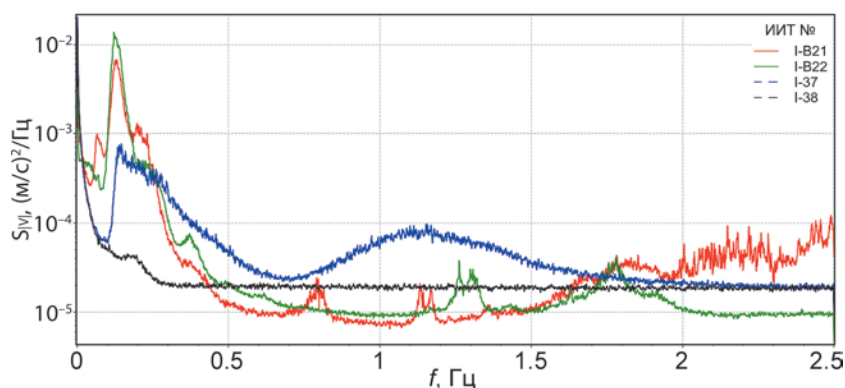


Рис. 10 – Спектральная плотность, полученная для модулей скорости аналоговых ИИТ, размещенных в придонном слое (I-37, I-38) и на буйрепе (I-B21, I-B22)

Заключение

Измерения течений с помощью ИИТ показало, что приборы такого типа вполне успешно могут применяться при стационарных течениях и на дне. При изучении турбулентных процессов и течений с высокой изменчивостью скоростей и направлений течения ошибки измерений могут превышать указанный выше диапазон ошибок.

При наклонах тела ИИТ на углы более 60° , возникающие под воздействием значительных скоростей набегающего потока, погрешности измерений скорости течения могут достигать 15 и более процентов.

Исследование поведения ИИТ на буйрепе показало подверженность прибора такого типа колебаниям, передающимся от элементов конструкции станции. Приборы испытывали периодические колебания с периодом $\sim 4.4\text{--}8.6$ с и амплитудой, соответствующей скорости течения до ~ 7 см/с. Применение таких данных требует осреднения на минутных и более интервалах при последующей обработке.

Высокие значения корреляции модулей скорости течения и направления (0.88 и 0.747 соответственно) для ИИТ, установленных в придонном слое в непосредственной близости друг от друга, может говорить о качестве получаемых с них данных. Корреляция модулей скорости течения и направления для ИИТ и ADCP в толще воды различна для двух станций. В то время как для ст. 7740 можно говорить о высокой схожести данных (значения коэффициента корреляции для модуля скорости 0.87, направления – 0.533), для ст. 7741 видны различия (значения коэффициента корреляции для модуля скорости 0.436, направления – -0.0229), которые, однако, можно объяснить сложной турбулентной структурой течения в месте постановки и ее изменчивостью в зависимости от глубины.

Относительно высокие погрешности измерений при экстремальных наклонах тела прибора и высоких скоростях потока не умаляют достоинств инклинометрических приборов – простого и недорогого прибора, позволяющего с успехом производить измерения как в толще воды, так и, что особенно важно, непосредственно в придонном слое. За счет низкой стоимости возможно проведение измерений с использованием кластера из нескольких таких приборов.

Для уменьшения погрешности возможно изготовление приборов, рассчитанных на измерение как меньших, так и больших ожидаемых скоростей. Изменение положения плавучести также позволяет ограниченно менять диапазон измеряемых течений, однако требует дополнительной градуировки в опытном бассейне.

Дальнейшее развитие испытанной конструкции инклинометрического измерителя течений может заключаться в добавлении в его конструкцию датчика температуры с большей точностью, и, что самое главное, с уменьшенной постоянной времени. В нашей модели ИИТ информацию о температуре воды предоставляет термистор, встроенный в микросхему часов реального времени, размещенную на печатной плате внутри герметичного корпуса. Какой-либо термоинтерфейс с внешней средой отсутствует, за счет чего постоянная времени такого измерителя температуры составляет десятки минут. Однако, даже настолько большая постоянная времени может дать

информацию о поступлении новых водных масс при смене направления течения с соответствующей задержкой. Для уменьшения постоянной времени измерения температуры необходимо разместить корпус датчика непосредственно в измеряемой среде при минимизации его размеров. Перспективно в качестве чувствительного элемента использовать малогабаритный цифровой интегральный датчик температуры, например, в виде микросхемы TMP117 (Texas Instruments) или аналогичный, обеспечивающий точность измерения $\pm 0.1\text{--}0.2$ °C и разрешение 0.007 °C. Преимуществом применения упомянутой микросхемы являются и компактные размеры ее корпуса, составляющие всего $2\times 2\times 0.8$ мм, что позволит достичь постоянной времени в единицы секунд при размещении ее внутри запаянной с одной стороны тонкостенной трубки.

Добавление в конструкцию датчика давления позволит определять моментную глубину измерителя при размещении его на буйрепе в толще воды, с учетом того, что буйреп может быть подвержен наклону под действием набегающего потока. Применение такого модернизированного прибора на небольшой глубине может предоставить информацию о параметрах поверхностных волн за счет гидростатического метода измерения.

Отметим, что модернизированный инклинометрический измеритель с добавлением в конструкцию датчика давления и датчика температуры с большей точностью и уменьшенной постоянной времени уже изготовлен и испытывается АО ИО РАН.

Опыт работы с ИИТ в натуральных условиях показывает, что прибор вполне подходит для измерения течений для большинства океанологических условий, кроме мелкомасштабной турбулентности, когда пространственные масштабы пульсаций меньше размеров прибора и временные – меньше 0.5 с.

Благодарности. Подготовка инклинометрических измерителей и обработка натуральных данных была выполнена в рамках Государственного задания АО РАН № FMWE-2024-0025. Экспедиционные работы выполнены в рамках климатического эксперимента 2022 г. в рейсе 89-1 НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Список литературы

1. Амбросимов А. К. О придонных течениях на дрефте в Южно-Карском осадочном бассейне // Научтехиздат. Экологические системы и приборы. 2023. № 12. С. 41–46.
2. Амбросимов А. К. Экспериментальное изучение процесса вторжения вод западной ветви обь-енисейского течения в юго-западную часть Карского моря // Международная конференция «Проблемы экоинформатики». МНТОРЭС им. А. С. Попова. М., 2024.
3. Амбросимов А. К., Ковалев Г. А. О мезомасштабных колебаниях Ямальского течения // Научтехиздат. Экологические системы и приборы. 2023. № 12. С. 47–53.
4. Баранов Б. В., Амбросимов А. К., Мороз Е. А., Мутовкин А. Д., Сухих Е. А., Дозорова К. А. Позднечетвертичные контуритовые дрефты на шельфе Карского моря // ДАН, Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 2. С. 102–108.
5. Баранов В. И., Очередник В. В., Зацепин А. Г., Куклев С. Б., Машура В. В. Предварительные результаты натуральных испытаний измерителя скорости придонного течения в

- прибрежной зоне моря // Научно-практический электронный журнал «Аллея Науки». 2018. № 5 (21).
6. Пака В. Т., Набатов В. Н., Кондрашов А. А., Корж А. О., Подуфалов А. П., Облеухов С. Д., Голенко М. Н., Щука С. А. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений // Океанологические исследования. Т. 47. № 2. 2019. С. 220–229. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).13](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).13).
 7. Отчет о работах в 41-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (25 июня – 9 августа 2019 г.) ИО РАН. Москва, 2019. 156 с.
 8. Отчет о работах в 49-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (18 августа – 7 сентября 2020 г.) ИО РАН. Москва, 2020. 134 с.
 9. Отчет 89-1-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» // Москва. ИО РАН, 2022.
 10. Отчет 93-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» // Москва. ИО РАН, 2024.
 11. Отчет 96-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» // Москва. ИО РАН, 2024.
 12. Флинт М. В., Поярков С. Г., Римский-Корсаков Н. А., Мирошников А. Ю. Экосистемы морей сибирской Арктики – 2020 (81-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. С. 412–417. <https://doi.org/10.31857/S0030157421020040>.
 13. Daubin S., Scally D., Tusting R. Measurement of deep ocean currents using recording inclinometers // OCEANS'77 Conference Record. IEEE, 1977. С. 712–717. <https://doi.org/10.1109/oceans.1977.1154327>.
 14. Faugères J. C., Stow D. A. V., Imbert P., Viana A. Seismic features diagnostic of contourite drifts // Marine Geology. 1999. 162. P. 1–38.
 15. Hansen A. B., Carstensen S., Christensen D. F., Aagaard T. Performance of a tilt current meter in the surf zone // Coastal Dynamics. 2017. No. 218. P. 944–954.
 16. Hendricks T. Use of inclinometer current meters in weak currents, “OCEANS '85 – Ocean Engineering and the Environment”, San Diego, CA, USA, 1985. P. 742–748. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1985.1160197>.
 17. Kjelldorff M., Kuttenukeuler J., Kirchner N., Krützfeldt J., Sundberg M. Water current measurements using oceanographic bottom lander LoTUS. Applied Ocean Research. 2020. Vol. 94. 101982. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101982>.
 18. Lowell N. S., Walsh D. R., Pohlman J. W. A comparison of tilt current meters and an acoustic doppler current meter in vineyard sound, Massachusetts, “2015 IEEE/OES Eleventh Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM)”. St. Petersburg, FL, USA, 2015. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/CWTM.2015.7098135>.
 19. Pritchard D. W., Burt W. V. An inexpensive and rapid technique for obtaining current profiles in estuarine waters // Journal of Marine Research. 1951. Vol. 10. P. 180–189.
 20. Rebesco M., Camerlengi A. (eds.) Contourites. Developments in Sedimentology. 2008. Vol. 60. Elsevier B. V., ISSN 0070-4571. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(08\)00215-X](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)00215-X).
 21. Sheremet V. A. SeaHorse tilt current meter: inexpensive near bottom current measurements based on drag principle with coastal applications // Eos Transactions American Geophysical Union. Ocean Sci. Meet. 2010. Vol. 91. No. 26. Abstract PO25C13.
 22. Syck J. Profiles of near-bottom currents using an inclinometer array. Ocean '74–IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment. 1974. <https://doi.org/10.1109/oceans.1974.1161446>.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024, одобрена к печати 10.03.2025.

Для цитирования: Амбросимов А. К., Кондрашов А. А., Щука С. А., Корж А. О. О применении инклинометров при измерении течений в придонном слое и в толще моря // Океанологические исследования. 2025. № 53 (1). С. 187–204. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(1\).9](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(1).9).

ON THE USE OF INCLINOMETERS IN MEASURING CURRENTS ON THE BOTTOM AND IN THE SEA THICKNESS

A. K. Ambrosimov, A. A. Kondrashov, A. S. Shchuka, A. O. Korzh

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: ambrosimov@ocean.ru*

The paper considers the metrological features of the use of inclinometers in measuring currents at the bottom and at buoy stations in situ. The results of a comparison of synchronous measurements of currents using ADCP and inclinometers in full-scale marine conditions of the Kara Sea at the bottom and in the sea column are shown.

Keywords: inclinometer, ADCP, Kara Sea, bottom observations, buoy stations, measurements, comparison

Acknowledgments: Preparation of inclinometric measuring instruments and processing of in-kind data was carried out within the framework of the State Assignment of the RAS No. FMWE-2024-0025. Expeditionary work was carried out within the framework of the 2022 climate experiment in cruise 89-1 of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”.

References

1. Ambrosimov, A. K., 2023: On bottom currents on the drift in the South Kara sedimentary basin. Nauchtekhizdat. *Ecological systems and devices*, **12**, 41–46.
2. Ambrosimov, A. K., 2024: *Experimental study of the process of invasion of water of the Western branch of the Ob-Yenisei current into the southwestern part of the Kara sea*. International Conference problems of ecoinformatics. MNTORES named after A. S. Popov. Moscow.
3. Ambrosimov, A. K. and G. A. Kovalev, 2023: On mesoscale oscillations of the Yamal Current. Nauchtekhizdat. *Ecological systems and devices*, **12**, 47–53.
4. Baranov, B. V., A. K. Ambrosimov, E. A. Moroz, A. D. Mutovkin, E. A. Sukhikh, and K. A. Dozorova, 2023: Late Quaternary contourite drifts on the shelf of the Kara Sea. *DAN, Earth sciences*, **511** (2), 102–108.
5. Baranov, V. I., V. V. Ocherednik, A. G. Zatsepin, S. B. Kuklev, and V. V. Mashura, 2018: Preliminary results of full-scale tests of a bottom current velocity meter in the coastal zone of the sea. *Scientific and practical electronic journal “Alley of Science”*, **5** (21).
6. Paka, V. T., V. N. Nabatov, A. A. Kondrashov, A. O. Korzh, A. P. Podufalov, S. D. Obbleukhov, M. N. Golenko, and S. A. Shchuka, 2019: On the improvement of the inclinometric meter of the velocity of bottom currents. *Oceanological studies*, **47** (2), 220–229, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).13](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).13).
7. *Report on the work during the 41st cruise of the R/V “Akademik Nikolay Strakhov”* (June 25 – August 9, 2019) IO RAS, Moscow, 2019, 156 p.
8. *Report on the work during the 49th cruise of the R/V “Akademik Nikolay Strakhov”* (August 18 – September 7, 2020) IO RAS, Moscow, 2020, 134 p.
9. *Report on the 89-1st cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”*. Moscow, IO RAS, 2022.

10. *Report on the 93rd cruise of the R/V "Akademik Mstislav Keldysh"*. Moscow, IO RAS, 2024.
11. *Report on the 96th cruise of the R/V "Akademik Mstislav Keldysh"*. Moscow, IO RAS, 2024.
12. Flint, M. V., S. G. Poyarkov, N. A. Rimsky-Korsakov, and A. Yu. Miroshnikov, 2021: Ecosystems of the Siberian Arctic Seas – 2020 (81st voyage of the research vessel "Akademik Mstislav Keldysh"). *Oceanology*, **61** (2), 412–417, <https://doi.org/10.31857/S0030157421020040>.
13. Daubin, S., D. Scally, and R. Tusting, 1977: *Measurement of deep ocean currents using recording inclinometers*. OCEANS'77 Conference Record, IEEE, 712–717, <https://doi.org/10.1109/oceans.1977.1154327>.
14. Faugères, J. C., D. A. V. Stow, P. Imbert, and A. Viana, 1999: Seismic features diagnostic of contourite drifts. *Marine Geology*, **162**, 1–38.
15. Hansen, A. B., S. Carstensen, D. F. Christensen, and T. Aagaard, 2017: Performance of a tilt current meter in the surf zone. *Coastal Dynamics*, **218**, 944–954.
16. Hendricks, T., 1985: *Use of inclinometer current meters in weak currents*. OCEANS '85 – Ocean Engineering and the Environment, San Diego, CA, USA, 742–748, <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1985.1160197>.
17. Kjelldorff, M., J. Kutteneuler, N. Kirchner, J. Krützfeldt, and M. Sundberg, 2020: Water current measurements using oceanographic bottom lander LoTUS, *Applied Ocean Research*, **94**, 101982, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101982>.
18. Lowell, N. S., D. R. Walsh, and J. W. Pohlman, 2015: *A comparison of tilt current meters and an acoustic doppler current meter in vineyard sound, Massachusetts*. 2015 IEEE/OES Eleventh Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM), St. Petersburg, FL, USA, 1–7, <https://doi.org/10.1109/CWTM.2015.7098135>.
19. Pritchard, D. W. and W. V. Burt, 1951: An inexpensive and rapid technique for obtaining current profiles in estuarine waters. *Journal of Marine Research*, **10**, 180–189.
20. Rebesco, M. and A. Camerlengi (eds.), 2008: *Contourites. Developments in Sedimentology*. **60**, Elsevier B. V., ISSN 0070-4571, [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(08\)00215-X](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)00215-X).
21. Sheremet, V. A., 2010: SeaHorse tilt current meter: inexpensive near bottom current measurements based on drag principle with coastal applications. *Eos Transactions American Geophysical Union. Ocean Sci. Meet*, **91** (26), Abstract PO25C13.
22. Syck, J., 1974: *Profiles of near-bottom currents using an inclinometer array*. Ocean '74 – IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment. <https://doi.org/10.1109/oceans.1974.1161446>.

Submitted 02.10.2024, accepted 10.03.2025.

For citation: Ambrosimov, A. K., A. A. Kondrashov, A. S. Shchuka, and A. O. Korzh, 2025: On the use of inclinometers in measuring currents on the bottom and in the sea thickness. *Journal of Oceanological Research*, **53** (1), 187–204, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(1\).9](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(1).9).