

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-279-292>

УДК 551.46.0 (465)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА БАЗЕ ЛЕДОВОГО ЛАГЕРЯ В ПЕРИОД ДРЕЙФА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ «СУДНО — ЛЕД»

К.В. ФИЛЬЧУК*, А.Д. ТАРАСЕНКО, Н.А. КУССЕ-ТЮЗ, В.А. МЕРКУЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

*kirill@aari.ru

Резюме

В статье анализируется опыт проведения специальных океанографических наблюдений в ледовом лагере экспериментальной дрейфующей станции, организованной в формате «судно-лед» на первом этапе экспедиции «Трансарктика-2019». Приводятся результаты качественного анализа полученных данных. Отмечаются неудовлетворительные итоги эксперимента, направленного на исследование характеристик внутренних волн. Констатируются действенность и перспективность подхода, реализованного при организации наблюдений на турбулентном кластере. Оценивается возможность использования наработок экспериментального дрейфа в планируемых экспедициях на базе строящейся в настоящее время ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс» (ЛСП-СП).

Ключевые слова: верхний перемешанный слой, внутренние волны, океанографические наблюдения, тепловой баланс, «Трансарктика-2019», турбулентные потоки.

Для цитирования: Фильчук К.В., Тарасенко А.Д., Куссе-Тюз Н.А., Меркулов В.А. Опыт организации океанографических наблюдений на базе ледового лагеря в период дрейфа экспериментальной станции «судно — лед» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 279–292. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-279-292>.

Поступила 22.07.2020

После переработки 4.09.2020

Принята 7.09.2020

THE EXPERIENCE OF OCEANOGRAPHIC OBSERVATIONS IN THE ICE CAMP DURING THE DRIFT OF THE EXPERIMENTAL STATION “VESSEL — ICE”

KIRILL V. FILCHUK*, ANASTASIA D. TARASENKO, NIKITA A. KUSSE-TIUZ,
VIKTOR A. MERKULOV

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

*kirill@aari.ru

Summary

We discuss the experience of conducting special oceanographic observations in the ice camp of the experimental drifting station. In a changing climate the Barents Sea is exposed to an important change in a heat and salt balance and a system of ocean currents. These changes are related to the distribution of the Atlantic waters, surface waters and sea ice, so a drifting station appears to be the best-adapted platform for complex simultaneous measurements of sea water properties and phenomena. The drifting station was organized as a “vessel — ice” camp during the first leg of the “Transarktika-2019” expedition, and the following characteristics were measured: temperature, salinity, ocean currents and turbulence. A detailed description of the experimental station is presented: three sites on ice with CTD-strings, one equipped additionally with ADCP and one site on ice with a turbulent cluster equipped with a 3D velocimeter, ADCP and CTD. The RV “Akademik Tryoshnikov” was another platform for oceanographic measurements. We present some results of a qualitative analysis of the obtained data. The conditions of the experiment are considered as inadequate for studying the characteristics of internal waves, but we state the efficiency and the potential of the developed approach of in situ observations in a turbulent cluster for calculation of fluxes and discuss the obtained from CTD thermal structures. Finally, we evaluate the possibility of application of the obtained experience for future drifting ice camps in the North Pole.

Keywords: heat balance, internal waves, oceanographic observations, “Transarktika-2019”, turbulent flows, upper mixed layer.

For Citation: Filchuk K.V., Tarasenko A.D., Kusse-Tiuz N.A., Merkulov V.A. The experience of oceanographic observations in the ice camp during the drift of the experimental station “vessel — ice”. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 279 — 292. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-279—292>.

Received 22.07.2020

Revised 4.09.2020

Accepted 7.09.2020

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемая в последние годы существенная деградация ледяного покрова на трассе распространения атлантических вод в Арктическом бассейне позволяет предположить существование теплообмена между атлантическими водами и поверхностными слоями океана. Интенсификация зимней термохалинной конвекции вдоль траектории движения атлантических вод, вероятно явившаяся следствием общего сокращения количества многолетнего льда в Арктическом бассейне и повышения температуры поступающих через пролив Фрама атлантических вод, обуславливает выход теплых соленых вод к поверхности океана, что существенно изменяет тепловой баланс верхнего перемешанного слоя [1—3]. Термические экранирующие слои (теплые и холодные), которые, согласно [4, 5], формируются на значительных по площади участках акватории Арктического бассейна, определяют условия стратификации, при которых поверхностный слой оказывается изолированным от прямого воздействия подстилающих атлантических вод. По-видимому, в настоящее время имеют место эпизодические разрывы экранирующих слоев, происходящие в силу каких-то причин (внутренние волны, внутритропикночные вихри, большой вертикальный сдвиг скорости), которые приводят к тому, что поток тепла от атлантических вод достигает непосредственно ледяного покрова, оказывая значительное влияние на процессы таяния и нарастания льда. Проверка данных гипотез может быть осуществлена путем выполнения специальных океанографических исследований в верхнем

слое океана. Для достижения этой цели необходимы натурные измерения параметров тонкой термохалинной структуры, внутренних волн, турбулентных потоков соли, тепла и импульса, сдвигов скорости на различных глубинах, от поверхности до горизонтов 100 — 200 м. Оптимальной обсервационной платформой для такого рода исследований может служить дрейфующее ледяное поле, на котором разворачивается комплекс измерительной аппаратуры. Размещение регистрирующих приборов непосредственно на дрейфующем льду позволяет исключить влияние на состояние изучаемых сред в районе проведения экспериментов протяженного массивного объекта (судна), неизбежно оказывающего возмущающие воздействия в силу значительных геометрических размеров надводной и подводной части, а также выбросов в атмосферу продуктов сгорания топлива и сброса объемов воды, вовлеченных в цикл жизнеобеспечения. Кроме того, использование ледяного поля в качестве платформы предоставляет возможность скомпоновать регистрирующий комплекс в строгом соответствии с планом исследований. К примеру, можно локализовать в одной точке измерения параметров течений и термохалинных характеристик, если речь идет об изучении турбулентных потоков, или, в случае постановки эксперимента по регистрации пространственно-временных характеристик внутренних волн, разнести пункты наблюдений на значительное расстояние. Описанный подход был реализован при проведении океанографических исследований в ледовом лагере, развернутом в ходе экспериментального дрейфа НЭС «Академик Трёшников». Были опробованы методики производства специальных океанографических наблюдений в подледном слое с использованием современной измерительной океанографической техники высокого временного и пространственного разрешения на базе дрейфующей станции, организованной в формате «судно — лед».

Целью данной статьи является описание выполненных экспериментов, предварительный анализ некоторых результатов океанографических наблюдений, оценка применимости предложенных подходов для будущих экспедиций. Комплексный характер экспедиции «Трансарктика-2019, I этап» [6] позволил также оценить перспективы использования результатов высокодискретных синхронных мультидисциплинарных (атмосфера, морской лед, океан) наблюдений, выполняемых на базе ледового лагеря.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Задача исследования пространственной и временной изменчивости характеристик внутренних волн по району дрейфа НЭС «Академик Трёшников» в ходе первого этапа экспедиции «Трансарктика-2019» решалась путем расстановки с дрейфующего льда в трех разнесенных пунктах ледового лагеря измерительных комплексов в составе CTD-регистраторов, размещенных на нескольких горизонтах, — так называемых CTD-«кос». В ледовом лагере были установлены три CTD-«косы». Две «косы» были набраны из приборов производства компании Sea-Bird Electronics, Inc., в одном случае в комплектацию входили два регистратора 37-SM MicroCat C-T Recorder и один регистратор 16plus V2 SeaCAT, во втором — по одному регистратору 37-SM MicroCat C-T Recorder, 37-SM MicroCat C-T-D Recorder и 16plus V2 SeaCAT. Третья «коса» была скомплектована из пяти СТ-зондов производства компании RBR Ltd., двух Concerto и трех XR-420. CTD/СТ-«косы» были установлены в вершинах равностороннего треугольника на расстоянии ~400 м друг от друга. Схема размещения океанографического оборудования в ледовом лагере представлена на рис. 1.

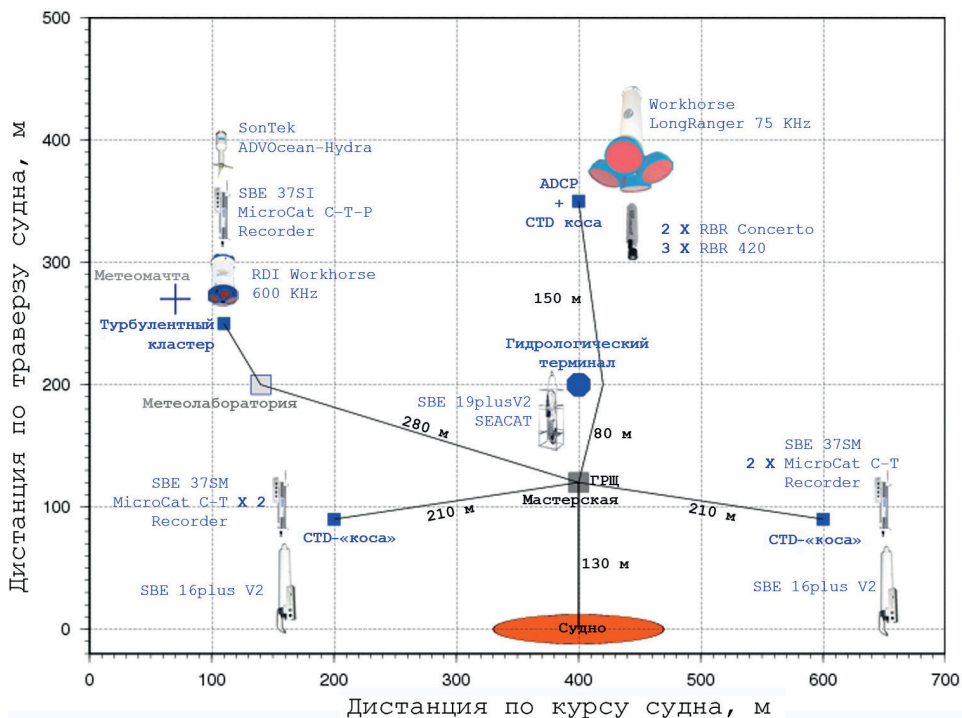


Рис. 1 Схема развешивания океанографического оборудования в ледовом лагере

Fig. 1. Deployment scheme of oceanographic equipment in the ice camp

Для расстановки подледных станций, укомплектованных оборудованием Sea-Bird Electronics, Inc., были подготовлены отдельные майны, которые в целях предотвращения зарастания льдом были накрыты отапливаемыми деревянными коробами, питание к которым было протянуто с судна. СТ-«коса» RBR была размещена в майне профилографа течений WorkHorse LongRanger 75 кГц с использованием элементов его оснастки. Следует отметить, что в комплектации этой «косы» не было ни одного прибора, оснащенного каналом регистрации давления, при планировании ее развешивания предполагалось вывесить профилограф течений на глубине 300 м, а СТ-регистраторы равномерно распределить по линии подвеса, в этом случае профилограф течений отвешивал бы линию, а показания его датчика давления позволили бы восстановить горизонты регистрации температуры и солености. По факту прибор WorkHorse LongRanger 75 кГц был установлен в подледном слое, что было обусловлено невозможностью калибровки магнитного компаса с размещенным внутри корпуса блоком батарей, профилограф был запитан с поверхности через штатный сигнально-силовую кабель длиной 5 м. Чтобы обеспечить близкое к вертикальному положение линии СТ-регистраторов, «коса» была отвешена оконечным грузом, датчики давления на линии отсутствовали. Как будет показано в ходе дальнейшего обсуждения, последнее обстоятельство имело немаловажное значение.

Пункты постановки станций, их комплектация, горизонты размещения регистраторов несколько раз менялись в течение дрейфа, с учетом складывающейся ледовой обстановки, меняющихся батиметрических условий, необходимости пере-

Таблица 1

Сведения о постановке подледных станций в ледовом лагере

Table 1

Information about deployment under-ice stations in the ice camp

Измерительное устройство		Горизонт постановки	Координаты постановки		Дата и время постановки Дата и время снятия	Дискретность Количество измерений
			Координаты снятия			
		Глубина места постановки	Широта, N	Долгота, E		
Комплекс измерителей № 1 (коса)	CTD-регистратор SBE 37-SM s/n 6953	100 м	81° 32,082'	40° 55,316'	04.04.2019 12:00	10 с
		407 м	80° 49,019'	39° 20,245'	23.04.2019 16:03	165 600
		100 м	80° 41,072'	39° 22,771'	25.04.2019 08:00	10 с
		217 м	80° 25,062'	39° 42,270'	28.04.2019 14:06	28 080
	CT-регистратор SBE 37- SM s/n 6958	30 м	81° 32,082'	40° 55,316'	04.04.2019 12:00	10 с
		407 м	80° 49,019'	39° 20,245'	23.04.2019 16:03	165 600
		30 м	80° 41,072'	39° 22,771'	25.04.2019 08:00	10 с
		217 м	80° 25,062'	39° 42,270'	28.04.2019 14:06	28 080
	CTD-регистратор SBE 16 s/n 6328	220 м	81° 32,082'	40° 55,316'	04.04.2019 12:00	10 с
		407 м	80° 49,019'	39° 20,245'	23.04.2019 16:03	165 600
		150 м	80° 41,072'	39° 22,771'	25.04.2019 08:00	10 с
		217 м	80° 25,062'	39° 42,270'	28.04.2019 14:06	28 080
Комплекс измерителей № 2 (коса)	CT-регистратор SBE 37-SM s/n 6959	100 м	81° 32,082'	40° 55,316'	04.04.2019 12:00	10 с
		407 м	80° 44,030'	39° 16,520'	24.04.2019 11:39	172 674
		100 м	80° 41,072'	39° 22,771'	25.04.2019 08:00	10 с
		217 м	80° 24,085'	39° 43,975'	28.04.2019 19:00	29 880
	CT-регистратор SBE 37-SM s/n 6960	30 м	81° 32,082'	40° 55,316'	04.04.2019 12:00	10 с
		407 м	80° 44,030'	39° 16,520'	24.04.2019 11:39	172 674
		30 м	80° 41,072'	39° 22,771'	25.04.2019 08:00	10 с
		217 м	80° 24,085'	39° 43,975'	28.04.2019 19:00	29 880
	CTD-регистратор SBE 16 s/n 6329	220 м	81° 32,082'	40° 55,316'	04.04.2019 12:00	10 с
		407 м	80° 44,030'	39° 16,520'	24.04.2019 11:39	172 674
		150 м	80° 41,072'	39° 22,771'	25.04.2019 08:00	10 с
		217 м	80° 24,085'	39° 43,975'	28.04.2019 19:00	29 880
Комплекс измерителей № 3 (коса)	CT-регистратор RBR XR-420 s/n 14607	30 м	81° 24,223'	38° 42,067'	08.04.2019 00:00	1 мин
		420 м	80° 49,447'	39° 23,157'	23.04.2019 15:23	22 523
	CT-регистратор RBR Concerto s/n 62523	245 м	81° 24,223'	38° 42,067'	08.04.2019 00:00	1 мин
		420 м	81° 04,440'	38° 25,880'	12.04.2019 11:29	6 499
		50 м	81° 04,440'	38° 25,880'	12.04.2019 14:00	1 мин
		200 м	80° 49,447'	39° 23,157'	23.04.2019 15:23	15 923
	CT-регистратор RBR XR-420 s/n 14604	150 м	81° 24,223'	38° 42,067'	08.04.2019 00:00	1 мин
		420 м	80° 49,447'	39° 23,157'	23.04.2019 15:23	22 523
CT-регистратор RBR XR-420 s/n 17152	200 м	81° 24,223'	38° 42,067'	08.04.2019 00:00	1 мин	
	420 м	81° 04,440'	38° 25,880'	12.04.2019 11:29	6 499	
Комплекс измерителей (кластер)	Акустический доплеровский измеритель скорости течений ADVField/Hydra, CTD-регистратор SBE-37-SI, акустический доплеровский профилограф WHS 600	2 м	81° 24,450'	38° 24,500'	14.04.19 00:00	10 с
		364 м	80° 52,135'	39° 27,940'	23.04.19 18:20	74621
		2 м	80° 44,242'	39° 21,194'	24.04.2019 16:00	10 с
		250 м	80° 21,788'	39° 45,086'	29.04.2019 04:13	38961

дислокации лагеря. Подробная информация о пространственном положении станций, горизонтах размещения приборов, временном регламенте регистрации гидрофизических параметров приведена в таблице 1.

Для решения задачи определения характеристик турбулентных потоков соли, тепла и импульса в подледном слое были выполнены наблюдения на измерительном кластере, в котором были интегрированы приборы ADVField/Hydra с датчиком ADVOceanProbe 5 МГц, CTD-регистратор SBE-37-SI MicroCat C-T-P Recorder и профилограф течений TRDI WorkHorse Sentinel 600 кГц. Кластер являлся составной частью многофункционального комплекса, предназначенного для регистрации составляющих теплового баланса и потоков тепла на внешних границах и в толще морского снежно-ледяного покрова. Приборы ADVField/Hydra и SBE-37-SI были жестко зафиксированы на металлической штанге таким образом, чтобы регистрация параметров течений производилась на горизонте размещения блока CTD-датчиков — 1,8 м. К нижнему концу штанги крепился короткий подвес профилографа течений, ориентированного вертикально излучателями вниз. Местоположение установки кластера в ледовом лагере переносилось после раскола базового ледяного поля. Штанга вводилась в специально подготовленные майны и закреплялась в вертикальном положении. Майны выбуривались на участках ровного недеформированного льда, удаленных от торосистых образований, вблизи метеомачты, на которой размещались другие датчики мультипараметрического комплекса.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Качественный анализ временных рядов значений температуры и солёности, полученных работавшими в составе CTD-«кос» регистраторами, позволил выявить флуктуации, характер которых определенно не может отражать временную изменчивость термохалинных параметров на фиксированном горизонте. На рис. 2 *в* представлен временной ход значений температуры на номинальном (т.е. соответствующем разметке линии) горизонте 100 м, зарегистрированный CTD-«косами» SBE, установленными по носу (№ 2, красный) и по корме (№ 1, черный) судна. На рис. 2 *д* представлены аналогичные графики для номинального горизонта 250 м. Если обратиться к временным диаграммам, иллюстрирующим изменение заглубления регистраторов с течением времени (рис. 2 *б*, *з*), становится очевидным, что зафиксированные «косами» флуктуации значений температуры и солёности отражают не конвективные смещения водных слоев с разными термохалинными характеристиками, а уход регистрирующего устройства с номинального горизонта постановки и возвращение на него вследствие изменения скорости дрейфа льда. Данный вывод подтверждается диаграммой (рис. 2 *з*), на которой графики изменения заглубления приборов совмещены с временным ходом скорости дрейфа ледяного поля станции: два параметра флуктуируют в явной противофазе.

Графическое представление экспериментально установленных зависимостей смещения положения регистрирующих элементов CTD-«косы» с номинальных горизонтов постановки от скорости дрейфа несущей платформы (рис. 3) позволяет констатировать, что при скорости дрейфа $> 0,6$ км/ч уход измерительного устройства с горизонта постановки составляет десятки метров и может достигать сотни метров при скорости дрейфа > 1 км/ч. Диапазон колебаний фактического заглубления прибора определяется его положением на линии, чем ближе к поверхности установлен регистратор, тем меньшее влияние на его показания оказывают собственные вертикальные смещения (рис. 2 *а*).

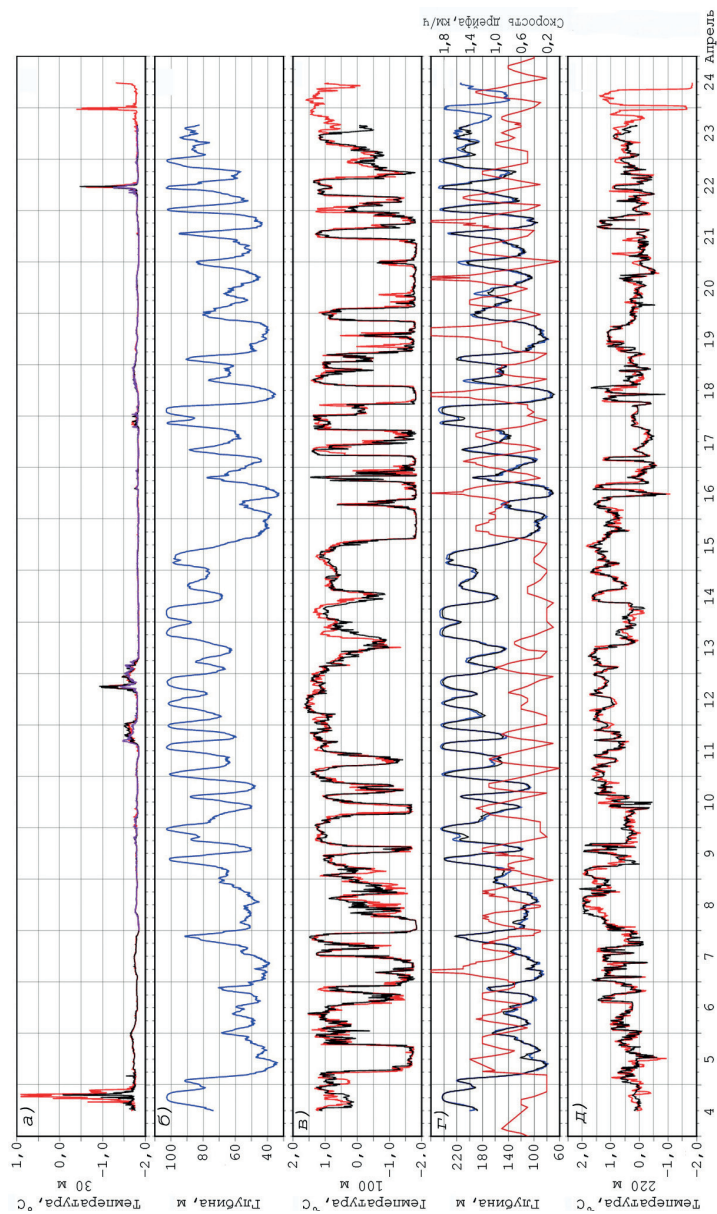


Рис. 2. Временные ряды значений гидрофизических параметров, зарегистрированные CTD-«косами»:

a — температура на верхнем горизонте (черная линия — по данным «косы» № 1, красная — «коса» № 2, фиолетовая — «коса» № 3); *б* — значение среднего горизонта; *в* — температура на среднем горизонте (черный цвет — «коса» № 1, красный цвет — «коса» № 2); *г* — значение нижнего горизонта, совмещенное со скоростью дрейфа (черный «коса» № 1, синий «коса» № 2, красный «коса» № 3); *д* — температура на нижнем горизонте (черный «коса» № 1, красный «коса» № 2)

Fig. 2. Time series of hydrophysic parameters recorded by CTD-strings:

a — temperature at the upper horizon (black line CTD-string 1, red line CTD-string 2, purple line CTD-string 3); *б* — value of the middle horizon; *в* — temperature at the middle horizon (black line CTD-string 1, red line CTD-string 2); *г* — value of the lower horizon, combined with the drift speed (black line CTD-string 1, blue line CTD-string 2, red line drift speed); *д* — temperature at the lower horizon (black line CTD-string 1, red line CTD-string 2)

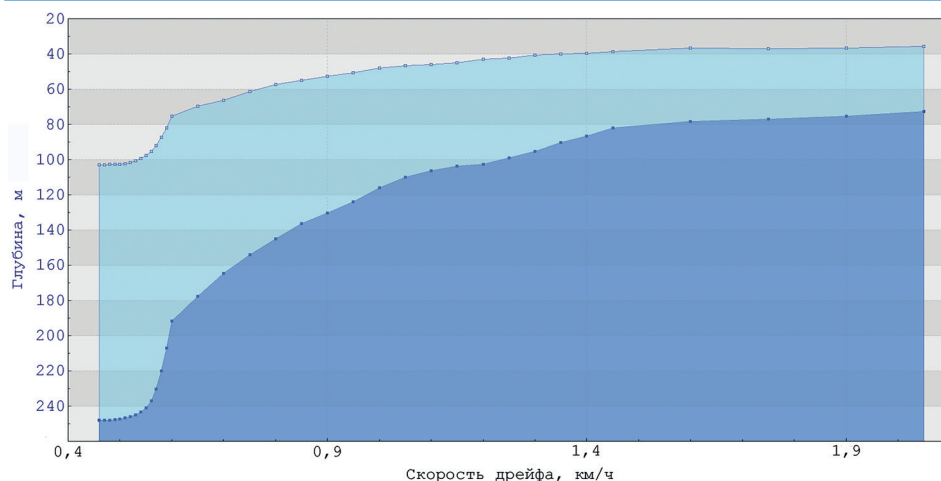


Рис. 3. Экспериментальная зависимость заглубления регистраторов CTD-«кос» от скорости дрейфа: голубой — положение регистратора, закрепленного на 100-м метре линии; синий — положение регистратора, закрепленного на 250-м метре линии

Fig. 3. Experimental dependence of the depth of the CTD-string's recorders on the drift speed: blue — position of the recorder fixed on 100 m of line; dark blue — position of the recorder fixed on 250 m of line

Таким образом, зарегистрированные CTD-«косами» SBE ряды значений температуры и солёности, по сути, представляют собой протяженные пространственно-временные профили. При условии применения адекватных методов интерпретации эти данные, в совокупности с результатами регулярного вертикального профилирования, могут быть использованы для уточнения термохалинной структуры водного слоя от поверхности до глубины 250 м по маршруту дрейфа. Но они непригодны к анализу в контексте исследования параметров внутренних волн вследствие существенной нестационарности горизонтов регистрации, выявленной по показаниям датчиков гидростатического давления. Строго восстановить горизонты регистрации температуры, солёности и мутности, выполненной СТ-«косой» RBR, в комплектации которой датчики давления отсутствовали, практически не представляется возможным.

На турбулентном кластере были получены высокодискретные временные ряды значений температуры, солёности, гидростатического давления, скорости и направления течений. Чувствительные элементы датчиков CTD-зонда и фокус акустического ресивера доплеровского регистратора течений, интегрированных в кластере, были локализованы в одном элементарном объеме морской воды на глубине 1,8 м. По объективным причинам период регистрации был ограничен двумя краткосрочными измерительными сессиями — с 18 по 23 апреля и с 24 по 29 апреля. На рис. 4 а представлен временной ход температуры и солёности, зарегистрированный в течение двух сессий. Синхронные показания датчиков солёности и гидростатического давления были использованы для расчета температуры замерзания [8]. Вычисленный временной ряд значений разности между фактической температурой воды и температурой замерзания на горизонте 1,8 м представлен на рис. 4 б. Как видно, в течение всего периода работы кластера значения температуры воды в подледном слое находились выше точки замерзания. Результаты регулярного термохалинного профилирования,

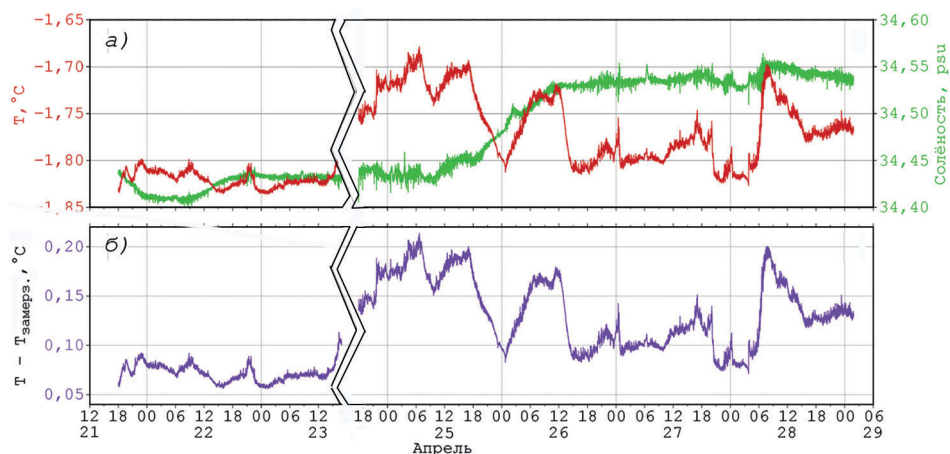


Рис. 4. Временные ряды термохалинных характеристик, зарегистрированные CTD-зондом SBE 37-SI MicroCat C-T-P Recorder в составе турбулентного кластера:

а — температура (красный) и солёность (зеленый) на горизонте регистрации 1,8 м; б — разность между фактической температурой воды и температурой заморзания

Fig. 4. Time series of thermohaline characteristics recorded by the SBE 37-SI MicroCat C-T-P Recorder CTD probe as part of a turbulent cluster:

а — temperature (red) and salinity (green) at the recording horizon of 1,8 m; б — the difference between the actual water temperature and the freezing point

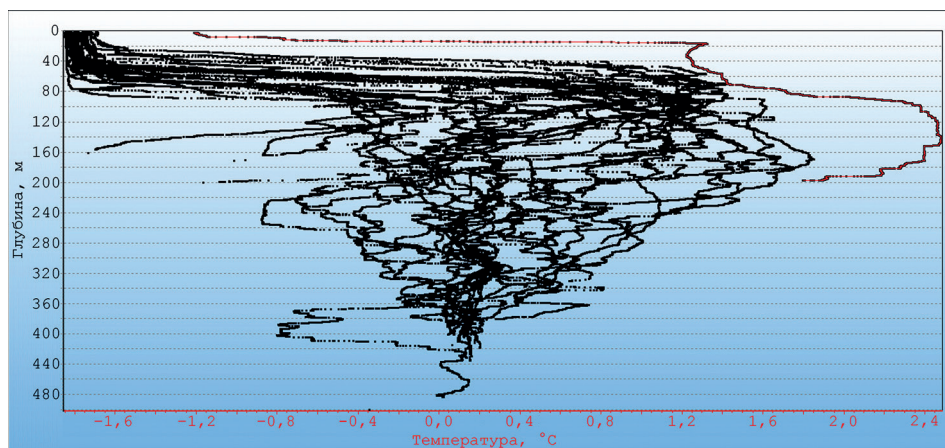


Рис. 5. Вертикальные профили температуры, полученные на океанографических станциях, выполненных посредством судового океанографического комплекса в период экспериментального дрейфа НЭС «Академик Трёшников» с 01.04.2019 по 29.04.2019

Fig. 5. Vertical temperature profiles obtained at oceanographic stations, performed by means of the ship oceanographic complex during the experimental drift of the R/V “Akademik Tryoshnikov” from 01.04.2019 to 29.04.2019

выполнявшегося в течение всего дрейфа с борта НЭС «Академик Трёшников» (рис. 5) и на гидрологическом терминале ледового лагеря, подтверждают этот вывод. Анализ вертикальных профилей температуры и солёности позволяет оценить мощность верхнего квазиоднородного перемешанного слоя в 20 — 80 м, а его термическое состояние, на которое, очевидно, значительное влияние оказывают подпирающие снизу атлантические воды, определить как препятствующее образованию ледяного покрова. Отсутствие монотонного нарастания средней толщины льда в период дрейфа экспериментальной станции, отмеченное в [7], по-видимому, объясняется уравниванием потоков тепла от верхней поверхности льда в атмосферу потоками тепла из верхних слоев воды к его нижней поверхности, последние оказываются достаточными для поддержания теплового баланса ледяного покрова в отсутствие компенсирующего теплопотери процесса кристаллизации.

На рис. 5 обращает на себя внимание температурный профиль, зарегистрированный 2 апреля 2019 г. (выделен красным): квазиоднородный слой на нем практически вырожден, а нулевая изотерма выявляется на глубине 14 м. Корректность отмеченного результата, который выглядит как проявление сбоя в работе регистрирующего устройства, подтверждается данными термохалинного профилирования, выполненного зондом SBE 19plus в гидрологическом терминале ледового лагеря с временным сдвигом в 1 час. К сожалению, какие-либо дополнительные материалы, которые могли бы быть использованы для описания термодинамических процессов, сопутствовавших этой ситуации, получены не были, поскольку в первых числах апреля ледовый лагерь находился в стадии разворачивания и измерительные комплексы, в том числе турбулентный кластер, еще не были введены в эксплуатацию.

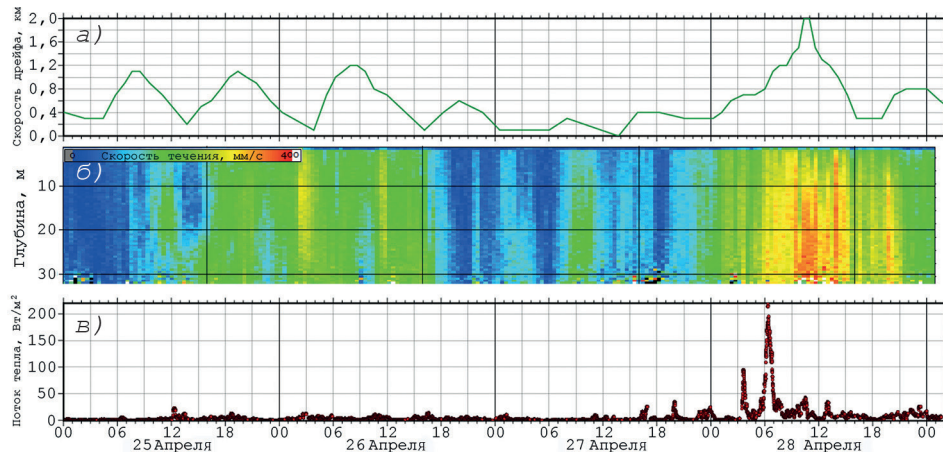


Рис. 6. Скорость дрейфа базового ледяного поля и параметры термодинамического состояния подледного слоя, соответствующие периоду с 24 по 29 апреля 2019 г.:

a — скорость дрейфа; *б* — амплитуда скорости течений в слое от 3 до 35 м; *в* — расчетные значения турбулентного потока тепла к поверхности

Fig. 6. The drift speed of the base ice field and the parameters of the thermodynamic state of the under-ice layer corresponding to the period from April 24 to April 29, 2019:

a — ice drift speed; *б* — the amplitude of the velocity of currents in the layer from 3 to 35 m; *в* — the calculated values of the turbulent heat flux to the surface

Данные высокого временного разрешения, зарегистрированные доплеровским акустическим регистратором течений, входившим в состав кластера, позволили рассчитать пульсации составляющих скорости течения и произвести оценку турбулентного потока тепла к поверхности. Расчеты были выполнены с использованием специально разработанного программного обеспечения, в котором был реализован алгоритм вычисления турбулентных потоков по данным турбулентного кластера, описанный в [9]. Результаты расчета турбулентного потока тепла представлены на рис. 6 в, согласно им, фоновые значения турбулентного потока тепла составляют единицы Вт/м², в некоторых случаях поток возрастает до нескольких десятков Вт/м².

Резко выделяется ситуация, возникшая в первой половине суток 28 апреля: значения турбулентного потока скачкообразно увеличились до 220 Вт/м². Как видно из рис. 6 а, резкое возрастание турбулентного потока соответствует начальной стадии смены режима дрейфа: утром 28 апреля направление дрейфа поменялось на 90°, движение поперек изобат сменилось продольным, скорость в течение 10 часов возросла с 0,4 км/ч до 2,0 км/ч. Нарастание скорости дрейфа иллюстрируется диаграммой на рис. 6 б, представляющей результаты измерений доплеровского профилографа течений с неисключенной дрейфовой составляющей. Полученный результат хорошо согласуется с оценками потоков тепла, представленными в [10, 11], где на фоне среднего потока в подледном слое 2 Вт/м² приводятся значения 100... 300 Вт/м², соответствующие штормовым ситуациям. Однозначно связывать резкое увеличение вычисленных значений потока тепла к поверхности с изменением режима дрейфа тем не менее было бы некорректно. Скачкообразное нарастание турбулентного потока тепла может быть обусловлено, например, воздействием вихревого образования, вытянувшего в поверхностный слой некоторый объем атлантической воды с глубины. Причину возникновения данного феномена строго определить не представляется возможным ввиду недостаточного количества данных. Однако с уверенностью можно утверждать, что развернутый в период экспериментального дрейфа турбулентный кластер в совокупности с применяемой методикой обработки данных позволяет фиксировать возникновение явлений, проявляющихся в изменениях турбулентного потока тепла к нижней поверхности ледяного покрова, и получать адекватные количественные оценки потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование CTD-«кос» для изучения внутренних волн в конфигурации, реализованной при развертывании выносного измерительного комплекса в период экспериментального дрейфа НЭС «Академик Трёшников», следует признать перспективным, поскольку задействованная техническая оснастка не обеспечивает стационарности горизонтов регистрации в условиях ненулевого дрейфа. Тем не менее представляется целесообразным в дальнейшем продолжить на дрейфующих станциях проведение экспериментов по данному профилю, приняв во внимание результаты, в том числе отрицательные, экспедиции «Трансарктика-2019» и воспользовавшись полученными наработками. Ледовый лагерь дрейфующей станции может рассматриваться как подвижная протяженная платформа, позволяющая выполнять синхронные продолжительные измерения в точках, отстоящих друг от друга на сотни метров, то есть на дистанции, сопоставимые с длиной внутренних волн высокочастотной части спектра, и тем самым определять пространственные спектры внутренних волн в Арктическом бассейне. Необходимо с учетом приобретенного

в период экспериментального дрейфа НЭС «Академик Трёшников» опыта выработать оптимальную схему постановки STD-«кос», которая будет обеспечивать стабильное положение измерительных устройств на заданных горизонтах. Эта задача может быть решена путем ограничения глубины размещения приборов и применения жестких кронштейнов или использования тяжелых отвесов, обеспечивающих вертикальное положение гибких постановочных линий при значительных скоростях дрейфа.

Схема построения турбулентного кластера, сконфигурированного с учетом передового зарубежного опыта [12] и результатов собственных разработок (в ходе подготовки постановки была сконструирована приборная штанга, защищенная патентным свидетельством), равно как и задействованная методика обработки данных, хорошо себя зарекомендовали и могут быть использованы при планировании и осуществлении экспериментов по исследованию турбулентных потоков в дальнейшем. Нарращивание функциональности кластера может быть осуществлено путем добавления регистрирующих элементов, что обеспечит возможность расчета параметров турбулентных потоков в нескольких точках вертикального профиля. Также представляется целесообразным совмещать в рамках экспериментов измерения на кластере с регулярным профилированием верхних слоев океана микроструктурным зондом — турбулиметром [11].

Непродолжительный период дрейфа станции, впервые в истории отечественных полярных исследований организованной в формате «судно — лед», обусловленный его экспериментальным характером, не позволил получить временные ряды значений гидрофизических параметров достаточной протяженности. Фаза развертывания измерительного комплекса на базе ледового лагеря, его передислокации в связи с изменениями ледовой обстановки объективно сократили продолжительность сессий измерений. Как следствие, выполнить полноценное сопоставление результатов специальных океанографических, метеорологических [13] и ледоисследовательских [7] наблюдений не представляется возможным. Тем не менее по каждому направлению (атмосфера, морской лед, океан) в течение дрейфа экспериментальной станции был приобретен положительный опыт постановки экспериментов на базе современной измерительной техники с высоким временным и пространственным разрешением, направленных на изучение процессов энерго- и массообмена в соответствующих средах и на их границах. Полученный опыт будет использован при организации и проведении синхронных мультидисциплинарных наблюдений в ходе высокоширотных экспедиций круглогодичного цикла, планируемых в рамках эксплуатации ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс».

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-60048.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This work was funded by the RFBR grant № 18-05-60048.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.В., Алексеев В.А., Репина И.А. Возрастание воздействия атлантических вод на ледяной покров Северного Ледовитого океана // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: Труды международной конференции памяти академика А.М. Обухова. М.: ГЕОС, 2014. С. 267 — 273.

2. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // *Science*. 2017. № 356. P. 285 — 291.
3. Аксенов П.В., Иванов В.В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64 (1). С. 42 — 54.
4. Никифоров Е.Г., Блинов Н.И. Новые данные о природе промежуточных водных масс Арктического бассейна // *Труды ААНИИ*. 1977. Т. 309. С. 17 — 24.
5. Блинов Н.И., Никифоров Е.Г. К вопросу об экранирующих слоях вод в Арктическом бассейне // *Труды ААНИИ*. 1985. Т. 399. С. 6 — 13.
6. Фролов И.Е., Иванов В.В., Фильчук К.В., Макутас А.П., Кустов В.Ю., Махотина И.А., Иванов Б.В., Уразгильдеева А.В., Семин В.Л., Зимица О.Л., Крылов А.А., Богин В.А., Захаров В.Ю., Малышев С.А., Гусев Е.А., Барышев П.Е., Пильгаев С.В., Ковалев С.М., Тюряков А.Б. Трансарктика-2019: зимняя экспедиция в Северный Ледовитый океан на НЭС «Академик Трёшников» // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65(3). С. 255 — 274.
7. Ковалев С.М., Бородин В.А., Колабутин Н.В., Ньюбом А.А., Шиманчук Евг.В., Шиманчук Ег.В. Основные физические и механические характеристики льда по результатам экспедиции «Трансарктика-2019» // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66 (3). С. 293 — 320.
8. Fofonoff N.P., Millard Jr. R.C. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater // *UNESCO Technical Papers in Marine Sciences*, 44. URL: <http://hdl.handle.net/11329/109> (дата обращения 03.09.2020)
9. Peterson A.K., Fer I., McPhee M.G., Randelhoff A. Turbulent heat and momentum fluxes in the upper ocean under Arctic sea ice // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. V. 122. P. 1439 — 1456. doi:10.1002/2016JC012283.
10. Provost C., Sennechael N., Miguet J., Itkin P., Rösel A., Koenig Z., Villaceros-Robineau N., Granskog M.A. Observations of flooding and snow-ice formation in a thinner Arctic sea-ice regime during the N-ICE2015 campaign: Influence of basal ice melt and storms // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. V. 122. P. 7115 — 7134. doi:10.1002/2016JC012011.
11. Meyer A., Fer I., Sundfjord A., Peterson A.K. Mixing rates and vertical heat fluxes north of Svalbard from Arctic winter to spring // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. V. 122. P. 4569 — 4586. doi:10.1002/2016JC012441.
12. McPhee M.G. Air-Ice-Ocean interaction: Turbulent Boundary Layer Exchange Processes. New York: Springer, 2008. 215 p.
13. Макутас А.П., Ильин Г.Н., Быков В.Ю., Миллер Е.А., Троицкий А.В., Кустов В.Ю., Большакова И.И., Ризе Д.Д. Опыт дистанционного температурно-влажностного зондирования атмосферы в период дрейфа НЭС «Академик Трёшников» // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66 (3). С. 349 — 363.

REFERENCES

1. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Repina I.A. The increase in the impact of Atlantic waters on the ice cover of the Arctic Ocean. *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii pamiati akademika A.M. Obukhova*. Turbulence, atmospheric and climate dynamics. Proc. of the International Conference in memory of Academician A.M. Obukhov. Moscow: GEOS, 2014: 267 — 273. [In Russian].
2. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V. V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R.,

Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Science*. 2017, 356: 285 — 291.

3. Aksenov P.V., Ivanov V.V. “Atlantification” as a possible cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 42 — 54. [In Russian].

4. Nikiforov E.G., Blinov N.I. New data on the nature of intermediate water masses of the Arctic basin. *Trudy AANII*. Proceedings of AARI. 1977, 309: 17 — 24. [In Russian].

5. Blinov N.I., Nikiforov E.G. On the issue of shielding water layers in the Arctic basin. *Trudy AANII*. Proceedings of AARI. 1985, 399: 6 — 13. [In Russian].

6. Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (3): 255 — 274.

7. Kovalev S.M., Borodkin V.A., Kolabutin N.V., Nubom A.A., Shimanchuk Evg.V., Shimanchuk Eg.V. Basic physical and mechanical characteristics of ice based on the results of the expedition “Transarktika-2019”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 293 — 320. [In Russian].

8. Fofonoff N.P., Millard Jr. R.C. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater // UNESCO Technical Papers in Marine Sciences, 44. Available at: URL: <http://hdl.handle.net/11329/109> (accessed 03.09.2020)

9. Peterson A.K., Fer I., McPhee M.G., Randelhoff A. Turbulent heat and momentum fluxes in the upper ocean under Arctic sea ice. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017, 122: 1439 — 1456. doi:10.1002/2016JC012283.

10. Provost C., Sennechael N., Miguet J., Itkin P., Rösel A., Koenig Z., Villacieros-Robineau N., Granskog M.A. Observations of flooding and snow-ice formation in a thinner Arctic sea-ice regime during the N-ICE2015 campaign: Influence of basal ice melt and storms. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017, 122: 7115 — 7134. doi:10.1002/2016JC012011.

11. Meyer A., Fer I., Sundfford A., Peterson A.K. Mixing rates and vertical heat fluxes north of Svalbard from Arctic winter to spring. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017, 122: 4569 — 4586. doi:10.1002/2016JC012441.

12. McPhee M.G. Air-Ice-Ocean interaction: Turbulent Boundary Layer Exchange Processes. New York: Springer, 2008: 215 p.

13. Makshtas A.P., Il'in G.N., Bykov V.Y., Miller E.A., Troitsky A.V., Kustov V.Y., Bolshakova I.I., Rize D.D. The experience of remote temperature-water content sounding of atmosphere during drift of RV “Akademik Treshnikov”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 349 — 363. [In Russian].