

УДК 551.465

СТАЦИОНАРНЫЙ МЕТЕОБУЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ КАК КОМПОНЕНТ НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2025 г. В. Д. Шармар*, В. П. Терещенков, А. В. Гавриков, А. В. Сеницын,
М. Д. Кравчишина, А. А. Клювиткин, А. Н. Новигатский, Н. Д. Тилинина,
С. В. Писарев, С. К. Гулев

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

** e-mail: sharmar@sail.msk.ru*

Поступила в редакцию 01.10.2024 г.

После доработки 01.10.2024 г.

Принята к печати 03.10.2024 г.

В экспедиции “Европейская Арктика — 2024: геологическая летопись изменений среды и климата” (96-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”) впервые проведена постановка стационарного метеобуя Sea-Air-Wave Station (SAWS), разработанного в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН, в северо-восточной части Баренцева моря. Конфигурация буйковой станции, ее приборное оснащение и первые результаты обработки данных показали актуальность использования созданного метеобуя в качестве компонента Национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

Ключевые слова: метеобуй, система мониторинга, климатически активные вещества

DOI: 10.31857/S0030157425010141, **EDN:** DPATMI

В связи с наблюдаемым в последние десятилетия глобальным антропогенным потеплением [4] одной из первоочередных задач исследования долгосрочной динамики климата является мониторинг климатически активных веществ, в первую очередь, ключевых парниковых газов, таких как CO_2 , CH_4 и N_2O . Задачей такого мониторинга является построение наблюдательных систем, способных не только обеспечивать непрерывные наблюдения концентраций газов, но и оценивать их потоки на границе раздела фаз вода–воздух. Кроме того, для понимания роли океана в эмиссии парниковых газов и изменениях климата крайне важно обеспечить наблюдения за другими гидрометеорологическими характеристиками (например, скорость ветра, высота волн, температура поверхности моря), что позволяет проанализировать обратные связи в Земной климатической системе и создать базу для численного моделирования долгосрочной климатической динамики. Для решения этих задач в 2022 г. в Российской Федерации был инициирован Важнейший инновационный проект государственного значения “Единая национальная система мониторинга

климатически активных веществ” (ВИП ГЗ) на период до 2030 г. [2]

В рамках ВИП ГЗ работа реализуется шестью научными консорциумами, которые осуществляют исследования и оперативную деятельность в части мониторинга процессов на суше (включая лесные экосистемы и сельскохозяйственные угодья) и в море. Помимо того, еще 3 консорциума разрабатывают высокотехнологичные климатические прогностические модели, обеспечивают получение достоверных оценок влияния изменений климата на экономику страны и обеспечивают формирование кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов — ключевого отчетного документа, предоставляемого Россией Конференции Сторон РКИК (Рамочная конвенция об изменении климата) ООН.

В этой связи, мониторинг потоков энергии и парниковых газов в Мировом океане и морях России приобретает особое значение. Океан, будучи консервативным по отношению к атмосфере компонентом климатической системы, является аккумулятором тепла на длительных промежутках времени, поглощая примерно 92%

избыточного тепла, поступающего в атмосферу за счет антропогенной деятельности. Кроме того, океан генерирует собственные моды климатической изменчивости, которые накладываются на антропогенный сигнал, существенно затрудняя долгосрочное прогнозирование [3].

Наконец, океаны и моря служат мощными поглотителями парниковых газов (в первую очередь, CO_2), однако суммарное поглощение океанов и морей в целом является малой разницей мощной эмиссии в тропических широтах и преимущественного поглощения в субполярных широтах. При этом даже в средних и субполярных широтах при усилении штормовой активности могут обнаруживаться направленные в атмосферу потоки CO_2 . Все это делает проблему мониторинга потоков парниковых газов и энергии в океане и морях очень сложной, а создаваемую систему океанского мониторинга в рамках ВИП ГЗ – критически важной.

Океанский компонент мониторинга климатически активных веществ в рамках ВИП ГЗ включает в себя как судовые, так и автономные системы наблюдений за состоянием среды. Важным элементом автономных систем являются стационарные гидрометеорологические станции, позволяющие вести долговременный мониторинг всех параметров приповерхностного слоя атмосферы и верхнего слоя океана. В течение 2022–2023 гг. в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН была впервые создана такая платформа.

Созданная гидрометеорологическая станция “Sea-Air-Wave Station” (SAWS) представляет собой заякоренную платформу. Конструкция платформы состоит из плавучести (буя), надводной мачты и киля (хвостовика). Плавучесть представляет собой прочную полиуретановую оболочку в форме диска, заполненную полимерной пеной. Сверху на бую размещена металлическая палуба, которая при помощи шпилек, проходящих через тело буя, соединена с металлическим хвостовиком, расположенным под бумом. Роль поплавка выполняет корпус с полиуретановым покрытием, заполненным полимерной пеной, большой грузоподъемности с установленной на ней надводной мачтой, на которой размещаются измерительные приборы. Ниже ватерлинии буя на держателе набора троса устанавливаются датчики измерения параметров морской воды (рис. 1). В несущую архитектуру SAWS входят дополнительные поверхностные (2 штуки) и глубоководные (2 штуки) поплавки для поддержания плавучести платформы, 3 км троса из ультравысокомолекулярного полиэтиленового волокна, 100 м якорной цепи

28 мм калибра, 4 аккумуляторные батареи (АКБ) (120 мА·ч каждая), 4 панели солнечных батарей, проблесковый маячок, радиолокационный отражатель. Запас плавучести (грузоподъемность) полностью оснащенного буя составляет 1850 кг. Такая комплектация морской заякоренной платформы обеспечивает возможность проводить автоматические измерения в глубоководных районах океана с запасом работы от АКБ в течение полугода автономной работы.

Измерительная аппаратура, установленная на SAWS (таблица), включает полный комплекс атмосферных метеорологических наблюдений, в том числе измерители радиационных потоков, газоанализаторы для определения концентрации CO_2 и метана в воздухе и воде, приборы для измерения параметров верхнего слоя океана (температуры, электропроводности, pH, CO_2), а также систему измерения параметров ветрового волнения. Измерения концентрации углекислого газа и метеорологических параметров проводились на высоте 2.5 м над уровнем моря, а поверхностные океанологические параметры, включая высокоточные измерения концентрации растворенных парниковых газов, определялись на глубине 1.5 м. Станция работает в режиме мониторинга с частотой регистрации параметров 1 ч, при этом частота измерений может быть увеличена.

Сбор данных со всех измерителей осуществляется контроллером (мини-компьютером) CR1000X. Одновременно, контроллер получает информацию о питании от аккумуляторной батареи всех подключенных приборов. Контроллер формирует короткие пакеты данных, осуществляет сбор и передачу пакетов данных, дополненных текущими координатами местоположения станции, при помощи терминала-модема в заданные промежутки времени. В качестве терминала-модема используется отечественный терминал спутниковой связи *Galileosky* (РФ, г. Пермь).

В такой конфигурации SAWS не уступает лучшим зарубежным аналогам, используемым в США, Австралии, Китае и странах ЕС [5, 6, 10, 13 и др.], а в ряде аспектов (например, измерения парниковых газов и ветрового волнения) превосходит их.

В 96-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” метеобуй SAWS был установлен 30.07.2024 г. в северо-восточной части Баренцева моря в точке с координатами 78.5476° с.ш., 57.6902° в.д. и глубиной моря 164 м (рис. 1б). Выбор точки постановки определялся высокой интенсивностью изменчивости метеорологических условий в северной части Барен-

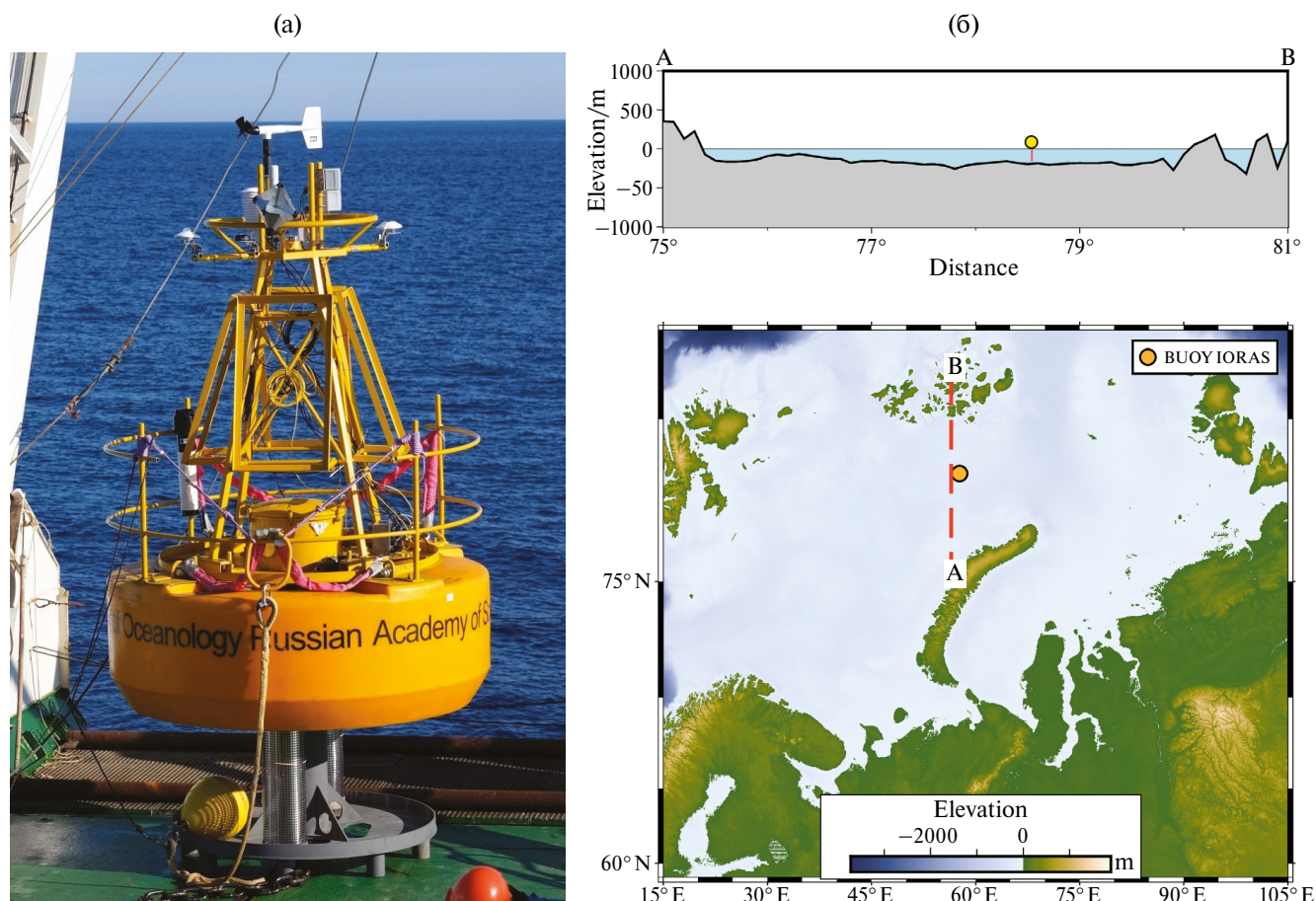


Рис. 1. а) Гидрометеорологическая станция Sea-Air-Wave Station перед постановкой в точку на станции № 8012, глубина 164 м. б) Топография дна на разрезе от острова Новой Земли (А) до островов Земли Франца Иосифа (В).

цева моря, где одновременно существенно меняется температурный режим и ветровые условия, определяющие характеристики волнения. Известно [8], что северная часть Баренцева моря — это горячая точка глобального потепления, где наблюдается экстремальное увеличение тепло-содержания океана с середины 2000-х гг. Этот район как в летний, так и в зимний сезон характеризуется мощной циклонической активностью, формирующей сильную перемежаемость приводных условий [11]. Кроме того, район Норвежского и Баренцева морей характеризуется значительной динамикой потоков вещества в толще океана, что существенно влияет на углеродный цикл и потоки CO_2 между океаном и атмосферой [1].

Полученные в результате постановки уникальные данные позволили впервые охарактеризовать мезомасштабную и синоптическую изменчивость параметров приводного слоя атмосферы, а также потоков климатически активных газов на границе океан–атмосфера. Краткосрочные (с периодами от часов до суток) флуктуации приводной температуры воздуха составляли по магнитуде до

4°C , а относительной влажности — до 20%. Изменчивость скорости приводного ветра преимущественно юго-восточных румбов составляла от 2 до 10 м/с за весь период измерений. Измерения волнения датчиком SeaView SVS-603, установленным на SAWS, проводились одновременно с использованием дрейфующего буя волномера “Sofar Spotter” [7], что позволило провести валидацию волнового блока SAWS. На рис. 2 показано практически идеальное совпадение измерений ветровых волн системой SAWS и буюм Spotter как для высот, так и для периодов волнения. Из рис. 2а видно, что для высот волн коэффициент регрессии принимает значение 0.99, для периодов волн — 0.89 (рис. 2б). Среднеквадратическая ошибка в высотах волн достигает значения 0.05 м, в периодах — 0.81 с.

Наконец, измерения концентраций парниковых газов также показали высокую эффективность газоанализаторов, установленных на SAWS. На рис. 3 демонстрируется фрагмент временной изменчивости скорости приводного ветра и концентраций CO_2 в воздухе и поверхностном

Таблица. Измерительное оборудование станции SAWS

Прибор/датчик	Параметр	Диапазон	Частота
SeaView SVS-603	Значительная высота волн, м	0 ... 30 м	1.7244 Hz
	Период на частоте максимума спектра волнения, с	2 ... 30 с	1.7244 Hz
	Направление распространения волн на частоте максимума спектра волнения, °	0 ... 359.9°	1.7244 Hz
	Средний период по минус первому и нулевому моментам спектра волнения, сек	0 ... 30 с	1.7244 Hz
	Среднее направление распространения волн, °	0 ... 359.9°	1.7244 Hz
Vaisala HMP155	Давление, гПа	950 ... 1050 гПа	1/15 Hz
Vaisala 05106	Скорость ветра, м·с ⁻¹	0 ... 50 м·с ⁻¹	1/15 Hz
	Направление ветра, °	0 ... 359.9°	1/15 Hz
Vaisala Temperature/RH Probe	Температура воздуха,	−40 ... 70 °C	1/15 Hz
	Влажность воздуха, %	0 ... 100%	1/15 Hz
Kipp & Zonen CMP10	Приходящая ДВ радиация, W·м ⁻²	−50 ... 50 W·м ⁻²	1/15 Hz
	Температура пиранометра, °C	−20 ... 30 °C	1/15 Hz
	Рассчитанная ДВ радиация, W·м ⁻²	80 ... 480 W·м ⁻²	1/15 Hz
Kipp & Zonen CGR4	Приходящая КВ радиация, W·м ⁻²	0 ... 100 W·м ⁻²	1/15 Hz
Vaisala 50202 Precipitation Gauge	Осадкомер, мм	0 ... 55 мм	1/15 Hz
Vaisala GMP343	Газоанализатор CO ₂ в атмосфере, ppm	0 ... 1000 ppm	1/15 Hz
AMT CO ₂	Газоанализатор CO ₂ в океане, ppm	0 ... 1000 ppm	1/15 Hz
RBRconcerto ³ /Idronaut pH sensor	Температура воды, °C	−5 ... 35 °C	1 Hz
	Электропроводность, мСм/м	0 ... 85 мСм/м	1 Hz
	pH	pH 1 ... pH 13	1 Hz
Garmin GPS16X-HVS	Широта, °	−90 ... 90°	15 с
	Долгота, °	0 ... 359.9°	15 с

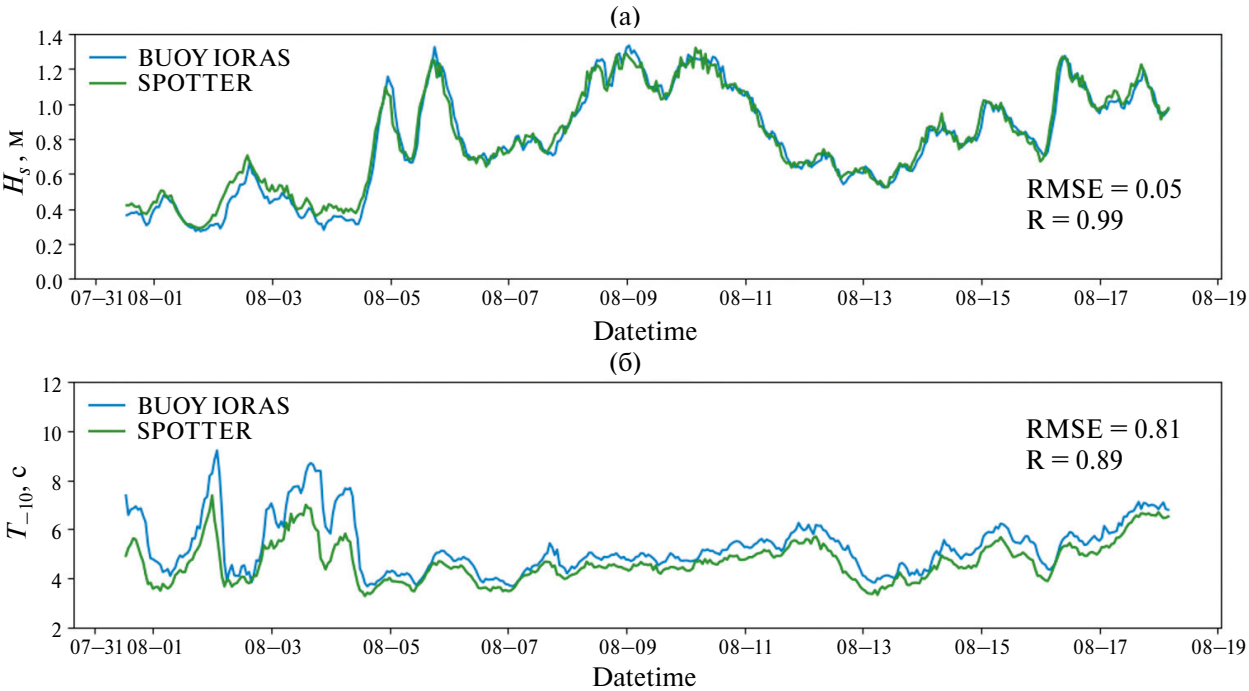


Рис. 2. Параметры ветрового волнения, измеренные датчиком SeaView SVS-603: значительная высота волн (а) и средний период (б) в сравнении с независимыми синхронными наблюдениями, полученными с помощью буя-волномера Spotter в период постановки буя с 31 июля по 18 августа 2024 г.

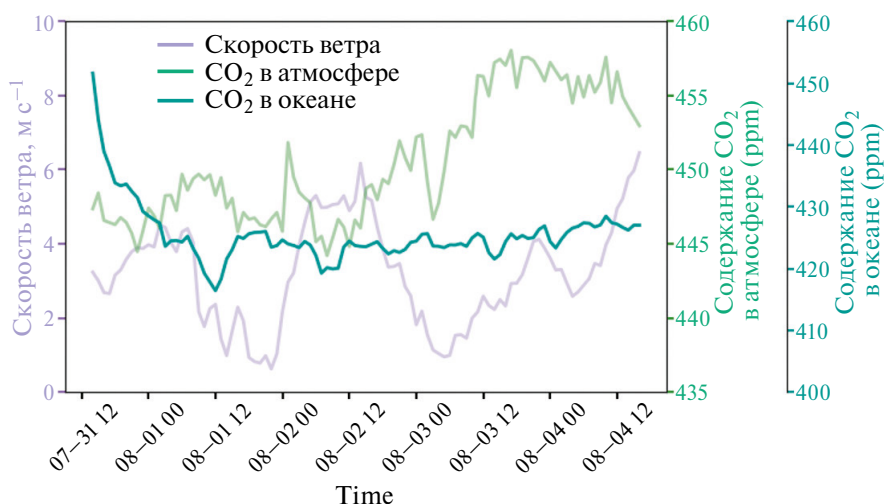


Рис. 3. Скорость ветра (по датчику Vaisala 05106) и концентрации CO_2 в приводном слое воздуха (по датчику Vaisala GMP 343) и в поверхностном слое воды (по датчику AMT CO_2).

слое воды за период 5 суток. Хорошо видно, что разность парциальных давлений CO_2 в воде и воздухе может меняться в десятки раз на масштабах от часов до нескольких суток даже при относительно малой изменчивости скорости приводного ветра (от 3 до 4.5 м/с), что открывает новые перспективы для понимания изменчивости углеродного цикла океана в субполярных широтах.

Уже начавшаяся обработка наблюдений позволит впервые получить количественные характеристики мезомасштабной и синоптической изменчивости потоков энергии и парниковых газов между океаном и атмосферой, а также длительные ряды параметров ветрового волнения, необходимые для учета его роли в формировании энерго- и газообмена между океаном и атмосферой в одном из ключевых районов мониторинга океана и морей в рамках ВИП ГЗ.

Полученные измерения скорости ветра и концентраций CO_2 в приводном слое воздуха и поверхностном слое воды будут использованы для расчетов потоков на границе океан–атмосфера в рамках принятых параметризаций [9, 12].

В заключение можно констатировать, что испытания первой морской автономной гидрометеорологической станции SAWS в натурных условиях прошли успешно. Измерительные датчики и средства связи продемонстрировали свою надежность для работы в морских экстремальных условиях, а полученные данные — высокую достоверность. Созданная в ИО РАН конфигурация станции SAWS станет основой для разработки системы автономных заякоренных буйев в субполярной Северной Атлантике и морях России на втором этапе выполнения ВИП ГЗ (2025–2030 гг.). Сеть подобных гидрометеорологических станций

обеспечит эффективный мониторинг параметров приводной атмосферы и поверхностного слоя океана и позволит получать устойчивые оценки, необходимые для замыкания региональных балансов потоков парниковых газов и энергии в океане. Такая наблюдательная система станет основой для валидации океанских модельных реанализов, которые разрабатываются в рамках ВИП ГЗ.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Соглашения с Росгидрометом 169-15-2023-002 (разработка архитектуры системы SAWS), Госзадания FMWE-2022-0002 (конфигурирование датчиков) и гранта РНФ 23-77-30001 (обработка информации).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н. и др. Первые данные о вертикальных потоках осадочного вещества и параметрах среды на северном сегменте хребта Мона, Норвежское море // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 513. № 1. С. 126–133. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601618>
2. Решетников М.Г. Климатическая политика в России: наука, технологии, экономика // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6 (201). С. 6–10. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-201-6-10>
3. Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N. et al. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // Nature. 2013. V. 499. P. 464–467. <https://doi.org/10.1038/nature12268>
4. Gulev S.K., Thorne P.W., Ahn J. et al. Changing State of the Climate System // Climate Change 2022: The Physical Science Basis. Contribution of Working

- Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. P. 287–422.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
5. *Harden B.E., Renfrew I.A., Petersen G.N.* Meteorological buoy observations from the central Iceland Sea // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. P. 3199–3208.
<https://doi.org/10.1002/2014JD022584>
 6. *Josey S.A., Grist J.P., Mecking J.V. et al.* A clearer view of Southern Ocean air–sea interaction using surface heat flux asymmetry // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2023. 38120220067.
<http://doi.org/10.1098/rsta.2022.0067>
 7. *Lancaster O. et al.* Comparative wave measurements at a wave energy site with a recently developed low-cost wave buoy (Spotter), ADCP, and pressure loggers // *Jour. Atmos. Oceanic Technology.* 2021. V. 38. № 5. P. 1019–1033.
 8. *Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T.* Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // *Nature Climate Change.* 2018. V. 8(7). P. 634–639.
 9. *Liss P.S., Slater P.G.* Flux of gases across the Air–Sea interface // *Nature.* 1974. V. 247. P. 181–184.
<https://doi.org/10.1038/247181a0>
 10. *Ranganathan S., Weller R.A., Venkatesan R. et al.* Performance of Moored Real-Time Ocean Observations During Cyclones in the Bay of Bengal // *Marine Technology Society Journal.* 2024. V. 58. № 3. P. 56–69.
<https://doi.org/10.4031/MTSJ.58.3.4>
 11. *Tilinina N., Gulev S.K., Bromwich D.H.* New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis // *Geophysical Research Letters.* 2014. V. 41. № 5. P. 1766–1772.
 12. *Wanninkhof R.* Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 2014. V. 12. P. 351–362.
<https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>
 13. *Zhang R., Zhou F., Wang X. et al.* Cool skin effect and its impact on the computation of the latent heat flux in the South China Sea // *Jour. Geoph. Res.: Oceans.* 2021. V. 126(1).
<https://doi.org/10.1029/2020JC016498>

MOORED METEOROLOGICAL BUOY AS PART OF NATIONAL GREEN-HOUSE MONITORING SYSTEM IN THE BARENTS SEA

**V. D. Sharmar*, V. P. Tereschenkov, A. V. Gavrikov, A. V. Sinitzin, M. D. Kravchishina,
A. A. Klyuvitkin, A. N. Novigatsky, N. D. Tilinina, S. V. Pisarev, S. K. Gulev**

Shirsov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

*e-mail: sharmar@sail.msk.ru

Experimental deployment of surface meteorological moored buoy “Sea–Air–Wave Station” (SAWS) was performed during the expedition “European Arctic – 2024: a geologic annals of environmental and climate change” (96th cruise of RV “Akademik Mstislav Keldysh”) in the north-eastern part of the Barents Sea. Mooring design and instrumentation demonstrated validity of the meteorological buoy for usage as part of National green-house monitoring system.

Keywords: surface meteorological moored buoy, monitoring system, green-house gases