

А.А. ЛЕГКОДИМОВ, М.А. БОВСУН, Д.А. ШВАЛОВ, Г.И. МИШУКОВА,
М.В. ИВАНОВ, Н.А. ЛИПИНСКАЯ, М.В. ШАПОВАЛОВА, А.Г. ШИЯНОВ

Предварительные результаты комплексных океанографических и геофизических наблюдений на профиле залив Петра Великого – Цусимский пролив (Японское море, октябрь 2019 г.)

Наиболее оперативную информацию о состоянии океана дает проведение комплексных исследований (гравиметрические наблюдения, измерения интенсивности флуоресценции, концентрации метана и хлорофилла-а в приповерхностном слое воды, ртути и газов в атмосферном воздухе) непосредственно во время следования судна. Наши исследования проводились на переходе Владивосток–Нячанг в период с 27 по 29 октября 2019 г. в Японском море в рамках рейса LV88 на НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Полученные данные отличаются высокой сходимостью с результатами прошлых экспедиций (например, рейс LV84, 2018 г.). Нами выявлены зоны аномальных концентраций метана (8,3 нмоль/л), углекислого газа (2,3 ppm) и ртути (4 нг/м³), а также отмечены гравитационные аномалии в Корейском проливе.

Ключевые слова: метан, углекислый газ, пограничный слой (вода–атмосфера), Японское море, гравиметрия, гидроакустика, флуоресценция, ртуть.

Preliminary results of integrated oceanographic and geophysical observations in the profile of Peter the Great Bay – Tsushima Strait (the Sea of Japan, October 2019). A.A. LEGKODIMOV¹, M.A. BOVSUN^{1,2}, D.A. SHVALOV¹, G.I. MISHUKOVA¹, M.V. IVANOV¹, N.A. LIPINSKAYA¹, M.V. SHAPOVALOVA¹ (¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, ²Far Eastern Federal University, Vladivostok), A.G. SHIYANOV³ (³Ural State Mining University, Ekaterinburg).

The study of the ocean by complex methods using a flow system and atmospheric air is currently one of the universal methods of obtaining express results (such as gravimetric observations, fluorescence intensity measurements, methane and chlorophyll-a concentrations in near-surface water, mercury and various gases in open air) directly during the vessel's sailing. The studies were conducted on the Vladivostok – Nha Trang traverse during October 27–29, 2019 in the Sea of Japan as a part of the LV88 voyage aboard the R/V “Academic M.A. Lavrent'yev”. According to the results of the study, abnormal zones of concentrations of methane (8.3 nM/l), carbon dioxide (2.3 ppm) and mercury (4 ng/m³) were identified. We have also noted gravitation anomalies in the Korean Strait.

Key words: methane, carbon dioxide, boundary layer (water-atmosphere), Sea of Japan, gravimetry, hydroacoustics, fluorescence, mercury.

*ЛЕГКОДИМОВ Алексей Александрович – аспирант, инженер, ШВАЛОВ Дмитрий Александрович – инженер, МИШУКОВА Галина Ивановна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ИВАНОВ Максим Владимирович – научный сотрудник, ЛИПИНСКАЯ Надежда Александровна – аспирант, старший инженер, ШАПОВАЛОВА Мария Валерьевна – старший инженер (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток), БОВСУН Мария Александровна – магистрант (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), инженер (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток), ШИЯНОВ Александр Геннадьевич – студент-магистр (Уральский государственный горный университет, Екатеринбург). *E-mail: legkodimov.aa@poi.dvo.ru

Исследование поддержано грантом РФФИ 18-05-00153 и частично грантами Комплексной программы фундаментальных исследований Дальневосточного отделения РАН «Дальний Восток» на 2018–2020 годы № 18-1-008 и 20-ВАНТ-010.

Введение

В настоящее время в связи с ускоряющимися и увеличивающимися в пространственных масштабах процессами изменения окружающей среды особую привлекательность имеют результаты комплексных измерений различных ее параметров на длинных расстояниях через акватории окраинных морей. Такие наблюдения выполняются в ходе одной или нескольких научно-исследовательских экспедиций в режиме мониторинга, данные оперативно обрабатываются на борту научно-исследовательского судна. 27–29 октября 2019 г. в 88-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV88) выполнен региональный комплексный профиль океанографических, геофизических и гидроакустических наблюдений в Японском море по маршруту зал. Петра Великого – Корейский пролив. Экспедиционные работы выполнены ТОИ ДВО РАН в ходе первого этапа экспедиции «Российско-вьетнамские комплексные океанологические исследования в Южно-Китайском море» в рамках государственного задания по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. раздела VIII «Науки о Земле».

Целями исследований являлись предварительная оценка ряда индикаторных океанографических параметров в пограничном слое вода–атмосфера (распределение парниковых газов, флуоресценции, атомарной ртути), а также изучение особенностей гравитационного поля. Наблюдения выполнены на протяжении регионального профиля в западной части Японского моря с различной дискретностью для разных методов и сопровождалась метео- и спутниковыми наблюдениями.

Методы и средства измерений

Температура и соленость морской воды

Для определения этих параметров в проточной системе использовался проточный термосалинограф SBE 45 SEACAT с отводом воды для опробования (диапазоны измерений: температуры воды – от -5 до +35 °С с точностью 0,002 °С, удельной электропроводности – 0–7 См/м с точностью 0,0003 См/м).

Метеоданные

Метеорологические датчики были установлены на палубе в носовой части корабля рядом с камерой забора воздуха газоанализатора. Для получения метеоданных (температура воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра) применялся метеокomплекс Davis Vantage Pro2 (США). Также был установлен портативный преобразователь метеоданных Vaisala Weather Transmitter WXT520 (Финляндия) на высоте 14 м.

Радиация

Фотосинтетическую радиацию определяли при помощи датчика Li-190 (Li-Cor, США), чистую – радиометром CNR4 Net Radiometer (Kipp & Zonen B.V., Нидерланды). Сбор и вывод метеорологических данных со всех датчиков осуществлялся измерительным и контрольным модулем DataLogger CR1000 (CampbellScientific, США).

Газогеохимические исследования

Концентрации метана в приповерхностном слое воды

Измерения проведены на профиле от Владивостока до Корейского пролива (рис. 1). Непрерывный забор воды осуществлялся насосом из носового кингстона (уровень забора воды 4 м от поверхности моря) во время движения судна. Отбор проб воды



Рис. 1. Район исследований и поток метана на границе вода–атмосфера вдоль движения НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс LV88 (октябрь 2019 г.)

производился с временной дискретностью 2 ч в стеклянные флаконы объемом 68 мл без контакта с атмосферой, которые плотно закрывались резиновой пробкой, при этом фиксировались время отбора и навигационная привязка к маршруту движения судна, а также записывались метеоданные с метеостанции. Расчеты содержания метана во всех образцах воды проводили методом равновесных концентраций Headspace. Для анализа использовался газовый хроматограф «Кристаллюкс-4000М» (НПФ «Мета-хром», Россия), оснащенный пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности. Минимальный объем вводимой в прибор газовой фазы составлял 5 мл. Точность качественного и количественного анализа метана и других углеводородов пламенно-ионизационного детектора – 10^{-6} %. Неорганические газы (азот, кислород, углекислый газ), а также метан с концентрацией более 1 % анализировались на детекторе по теплопроводности с чувствительностью 0,01 %. Проведено 22 газохроматографических определения содержания метана в морской воде, расчет концентраций производился по методике [11] в модификации [12]. Данные измерений интегрировались непосредственно в массив цифровых гидрологических и метеорологических данных в ходе наблюдений.

Расчет потоков метана с поверхности моря (рис. 1)

Вычисления были проведены для каждой точки отбора проб, используя экспериментальные данные о концентрации растворенного метана в поверхностном слое морской воды, содержаниях метана в приземном слое атмосферы, температуре, солености и реальных скоростях ветра на момент отбора проб.

Расчет потоков метана (F) соответствовал методологии, описанной в работах [5, 8, 10]:

$$F = \Delta C \times K,$$

где: $\Delta C = (C_{\text{изм}} - C_{\text{равн}})$ – разность концентраций метана, рассчитывается как разность между измеренной концентрацией метана в морской воде и равновесной концентрацией, которую имел бы атмосферный метан в морской воде при данной температуре, солености и при атмосферном давлении; K – коэффициент газообмена на границе вода–воздух.

Содержание ртути в атмосферном воздухе

Для определения этого параметра в экспедиционных условиях использовали анализатор РА-915М+ (Льюмэкс, Россия), в основе работы которого – дифференциальный атомно-абсорбционный способ определения ртути, который реализуется с помощью зеемановской модуляционной поляризационной спектроскопии с высокочастотной модуляцией. В минимальной комплектации прибор позволяет определение содержаний ртути в воздухе с нижним пределом обнаружения 2 нг/м^3 , что соответствует фоновому содержанию ртути в воздухе районов с низкой степенью антропогенного загрязнения. Для увеличения точности до $0,3 \text{ нг/м}^3$ применяли компьютерную регистрацию результатов измерений в режиме «мониторинг». Это позволяло накапливать результаты первичных единичных измерений и обобщать их за длительный период. Обычно осреднение делалось для 5-минутных интервалов (250 измерений с интервалом 1 с). Измерения метеопараметров проводили с помощью метеоконкомплекса Davis Vantage Pro2 (США) на двух уровнях – 2 и 20 м от поверхности моря. Одновременно регистрировали скорость и направление движения судна и гидрометеорологические параметры (направление и скорость ветра, температуру воздуха, атмосферное давление, количество осадков). При проведении попутных измерений содержаний ртути в воздухе основное внимание уделяли оценке ее фоновых содержаний в различных морских бассейнах и степени антропогенного влияния на них за счет атмосферного переноса из районов антропогенной эмиссии Юго-Восточной Азии.

Содержание метана и углекислого газа в атмосферном воздухе

Сбор данных на участке от Владивостока до Корейского пролива проводился с 18:50 26.10.2019 по 00:00 29.10.2019 (UTC). На протяжении 1000 км маршрута за данный временной промежуток с помощью газоанализатора G14 было получено 638 5-минутных измерений.

Измерение концентраций CO_2 , CH_4 и паров воды в приводной атмосфере на профиле от г. Владивосток до Корейского пролива производилось с помощью газоанализатора Picarro G2311-f (Picarro, США). Поступление воздуха к прибору осуществлялось камерами забора, соединенными с ним воздухозаборными трубками. Камеры размещались на высоте 14 м над ур. м. Данный газоанализатор предназначен для измерения концентраций диоксида углерода, метана и паров воды при скорости передачи данных 10 Гц для каждого газа (общая скорость передачи 30 Гц), что позволяет делать до 2000 измерений в минуту с погрешностью 200 ppb для CO_2 , 3 ppb для CH_4 и 6 ppb + 0,3 % для водяного пара при небольшой подвижности прибора. Результаты обработаны в программе для статистической обработки Microsoft Excel при усреднении за 5-минутный промежуток времени и координатной привязке данных.

Флуоресценция хлорофилла-а

Для оперативной оценки концентрации хлорофилла-а использовали флуориметр 10-AU Turner Designs Incorporated, для определения гидрологической структуры вод – проточный термосолинограф Seabird SBE-45. Автоматическая система была подключена к штатной водозаборной системе, отбирающей воду на горизонте 4 м, что позволило проводить непрерывные измерения на строго определенной глубине. Всего в Японском море по маршруту зал. Петра Великого – Корейский (Цусимский) пролив сделано 17 555 измерений флуориметром, 17 411 – термосолинографом, составлены графики хода для каждого регистрируемого параметра. Полученные данные позволяют изучить пространственную структуру полей температуры, солёности и концентрации хлорофилла-а, провести сравнительный анализ [3].

Результаты и обсуждение

Геофизические исследования

Профиль через Японское море по данным гравиметрической съемки

В Японском море маршрут судна проходил в западной его части, от зал. Петра Великого на севере до Цусимского пролива на юге (рис. 1), гравиметрические наблюдения представлены на рис. 2.

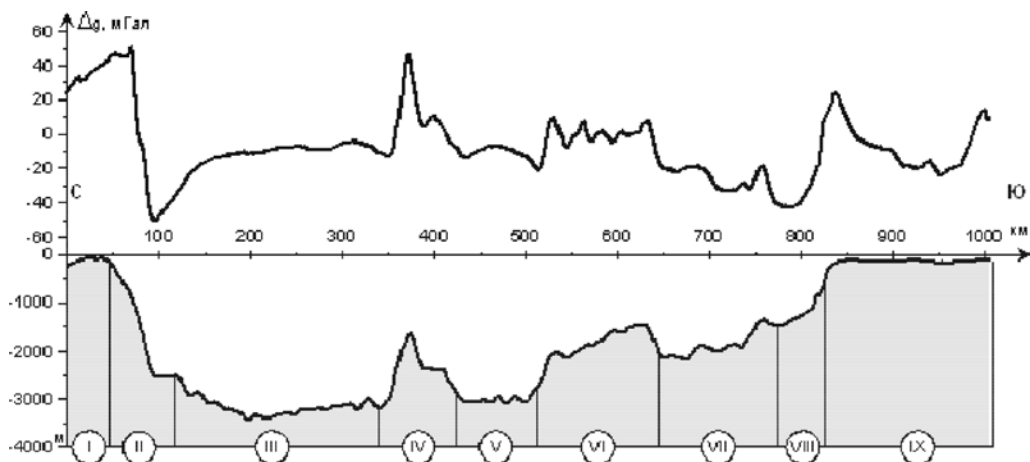


Рис. 2. Поле силы тяжести (вверху) и рельеф дна (внизу) вдоль маршрута движения НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс LV88 (октябрь 2019 г.) в Японском море. I – шельф зал. Петра Великого, II – континентальный склон Приморья, III – Центральная котловина, IV – Восточно-Корейская возвышенность, V – впадина Криштофовича, VI – возвышенность Криштофовича, VII – Цусимская котловина, VIII – континентальный склон Корейского полуострова, IX – шельф Цусимского пролива

В гравитационном поле отчетливо проявились все морфоструктуры, над которыми проходило судно. На шельфе зал. Петра Великого зафиксированы повышенные значения поля силы тяжести, достигающие на его внешней границе своего максимума. Континентальный склон отмечен градиентной зоной с максимальной амплитудой – от 50 мГал в пришельфовой области до -50 мГал у его подножья. Такой эффект обусловлен тем, что именно под континентальным склоном идет радикальное сокращение мощности земной коры [4], завершается переход от субконтинентальной коры шельфа к субокеанической коре Центральной котловины Японского моря. Ослабленная зона, расположенная у подножья склона, оканчивает рассмотренную выше трансформацию, образует в фундаменте депрессию, заполненную осадочными отложениями, а в гравитационном поле эта структура отмечена интенсивной отрицательной аномалией в зоне перехода склон–котловина.

Поле Центральной котловины спокойное, слабоотрицательное, по уровню сопоставимо с полем впадины Криштофовича, что может свидетельствовать о схожем строении этих морфоструктур. Расположенная между ними Восточно-Корейская возвышенность отмечена интенсивной положительной аномалией, сопоставимой по уровню с аномалией шельфа зал. Петра Великого, причем наличие двух максимумов – интенсивного северного и слабого южного – может свидетельствовать о развитии в ее фундаменте ослабленной зоны. Возвышенность Криштофовича, расположенная южнее, в гравитационном поле представлена серией знакопеременных аномалий, в то время как ее рельеф достаточно спокойный. Вероятно, возвышенность разбита на отдельные блоки различного вещественного состава или, более вероятно, различной степени разрушения. Уровень слабоотрицательного поля Цусимской котловины ниже, чем у Центральной котловины, но, скорее всего, это связано с тем, что маршрут судна проходит по периферии котловины, в области развития

ослабленных зон, одна из которых фиксируется в районе склона Цусимского бордерленда. Шельф Цусимского пролива представлен интенсивной положительной аномалией (по уровню ниже, чем на шельфе зал. Петра Великого), плавно переходящей в протяженную отрицательную аномалию, что может свидетельствовать о том, что на рассматриваемом участке консолидированный фундамент подходит близко к поверхности в северной части пролива, а далее на юг развиты обширные депрессии, заполненные осадочными образованиями.

Газогеохимические исследования

Распределение метана в поверхностном водном слое

На профиле зал. Петра Великого – Корейский пролив во время перехода НИС «Академик М.А. Лаврентьев» среднее значение концентрации метана в поверхностном 4-метровом водном слое составило 168 нл/л, минимальное – 143, максимальное – 207 нл/л.

Распределение концентрации метана, солёности и температуры в приповерхностном слое воды по профилю представлено на рис. 3. Повышенные концентрации метана 164 нл/л, выявленные в рейсе LV88 на континентальном склоне Приморья, переходящем в Центральную котловину, совпадают с результатами прошлых экспедиций (226 нл/л, LV84, 2018 г.). Аномалия метана (191 нл/л, LV84) в верхних слоях воды над вулканической постройкой (Евланова) обнаружена впервые и требует дополнительных исследований.

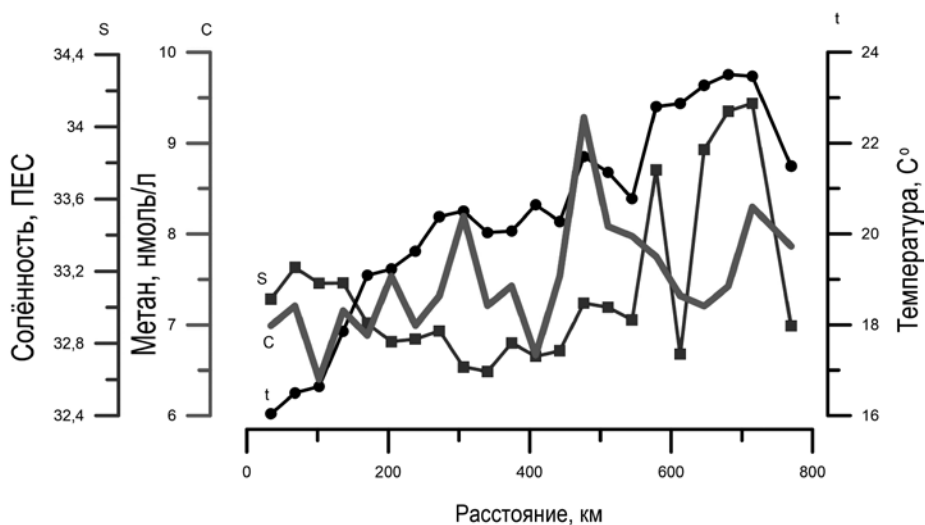


Рис. 3. Распределение концентраций метана, нмоль/л (C), температуры, °C (t) и солёности, ПЕС (S) в поверхностном слое воды на профиле зал. Петра Великого – Цусимская котловина – Корейский пролив Японского моря, рейс LV88 (октябрь 2019 г.)

Минимальные значения концентраций метана наблюдаются на акватории Центральной котловины, устойчивой корреляции с температурой и солёностью в поверхностном слое воды не наблюдается. Участки с повышенными концентрациями метана в приповерхностном водном слое в рейсе LV88 выделяются в Цусимской котловине – 7,7 нмоль/л (бассейн Уллеунг) и на Прикорейском шельфе – 8,3 нмоль/л. В рейсе LV84 отмечены аномально высокие значения метана в приповерхностной воде Цусимской котловины – 9,9 нмоль/л. Известно, что в данном регионе были обнаружены газогидраты [7].

Полученные значения концентраций метана в воде в двух экспедициях (LV84 и LV88), проводимых в разные годы, имеют относительно высокое сходство, что, в свою очередь, указывает на предположительно незначительную изменчивость распределения метана в поверхностном слое акватории Японского моря в осенне-зимний сезон.

Распределение потока по профилю показано на рис. 1. На всей изучаемой акватории измеренные концентрации превышают равновесные с атмосферой значения, показатель пересыщения составил 161–315, в среднем 231 %, наблюдается эмиссия метана от 3 до 12, в среднем 5 моль/(км² сут). Максимальный поток – на акватории возвышенности Криштофовича.

Распределение ртути в поверхностном воздухе

Результаты измерений 27–29.10.2019 г. по маршруту перехода Владивосток – Корейский пролив показывают, что содержания ртути находятся в пределах регионального фона и составляют примерно 2 нг/м³. Этот фон был установлен нами в рейсе на НИС «Профессор Хромов» в 2004 г. Но в 2019 г. отмечено незначительное увеличение фонового значения, что, возможно, объясняется бóльшим количеством измерений, проведенных в южной части Японского моря. Помимо в основном низких содержаний, выделяются, эпизодически или в достаточно длительной серии измерений, повышенные – 2–4 нг/м³ – значения на отдельных участках в Японском море (район о-ва Уллындо). Причиной может быть то, что о-в Уллындо, как известно, вулканического происхождения, и, возможно, на дне присутствуют гидротермальные источники.

Распределение парниковых газов и паров H₂O в приземном слое атмосферы

Более высокие, чем в северной части профиля, концентрации метана и CO₂ в атмосфере (рис. 4) наблюдались на участке при входе в Корейский пролив, а также – метана – на акватории возвышенности Криштофовича. Последняя аномалия была зафиксирована впервые и требует дополнительных исследований. Количество значений CH₄ 1,99 ppm на данном участке составило 52 %.

Гидрооптические и гидрологические параметры морской воды в акватории Японского моря

Использованный нами флуориметр обладал тем недостатком, что интенсивность флуоресценции в нем регистрируется в одном спектральном канале – на одной длине волны, соответствующей максимуму линии флуоресценции хлорофилла-а. Это приводит к тому, что иногда спектры

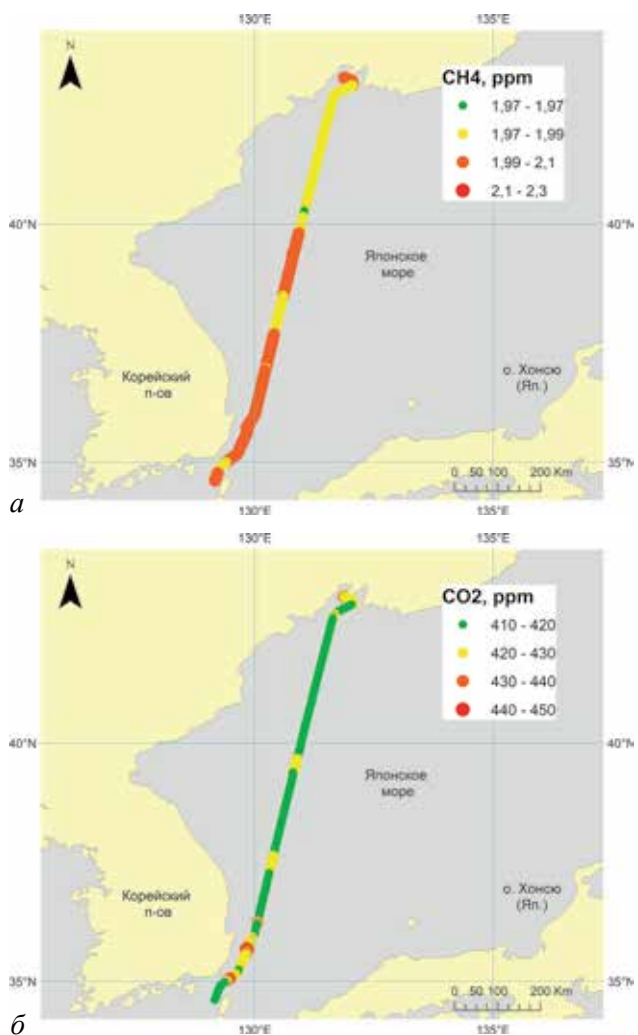


Рис. 4. Пространственная изменчивость концентраций CH₄ (а) и CO₂ (б) в атмосфере на участке от Владивостока до Корейского пролива (Японское море) по курсу следования НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс LV88 (октябрь 2019 г.)

испускания хлорофилла-а и растворенного органического вещества (РОВ) одновременно присутствуют в области регистрации флуоресценции. Помимо этого, на интенсивность флуоресценции хлорофилла-а влияет не только его концентрация, но также видовой состав и функциональное и физиологическое состояние фитопланктона [2]. В связи с этим для коррекции данных на протяжении всего рейса проводился регулярный отбор проб для определения концентрации хлорофилла-а стандартными спектрофотометрическими и флуориметрическими способами, а также делалась дополнительная оценка флуоресценции РОВ. При калибровке данных флуоресцентного метода учитывалась классификация районов с относительно одинаковыми гидробиологическими условиями [1], в том числе с привлечением измерений проточного термосолинографа и спутниковых данных по цвету моря и температуре поверхностного слоя [3].

Предварительно показано, что более низкие концентрации хлорофилла-а (рис. 5, а) приурочены к северной части Японского моря и имеется тенденция к их росту по направлению с севера на юг. Такое распределение может быть связано с начавшимся понижением температуры воды (рис. 5, б) и завершением осеннего цветения в северной части моря [6].

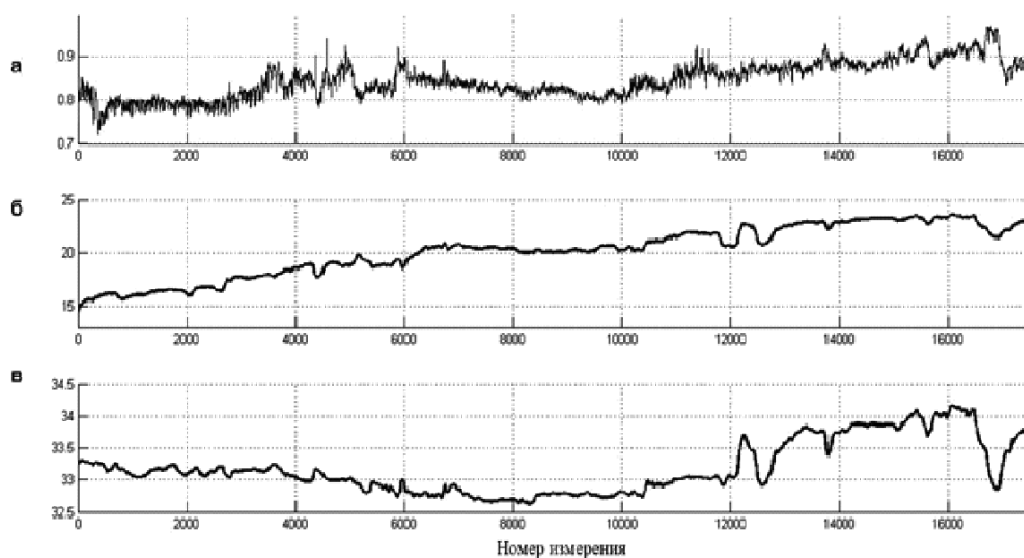


Рис. 5. График распределения интенсивности флуоресценции, мкг/л (а), температуры, °С (б) и солёности, ПЕС (в) по данным, полученным от проточной системы», рейс LV88 (октябрь 2019 г.)

В целом пространственно-временное распределение концентрации хлорофилла-а соответствует известному представлению о развитии фитопланктона в Японском море в период осеннего цветения [9]. Также по предварительным результатам выявлено, что в некоторых районах низкие значения этого параметра коррелируют с низкими значениями солёности (рис. 5, в), что может быть связано с гидрофизическими процессами и гидробиологическими особенностями регионов.

Выводы

1. По курсу следования НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в ходе рейса LV88 (октябрь 2019 г.) на профиле зал. Петра Великого – Цусимская котловина – Корейский пролив были получены данные о распределении метана, углекислого газа, содержания ртути в атмосфере и концентрациях метана в поверхностных слоях воды.

2. По результатам газогеохимических исследований в Японском море выявлены участки с аномальными концентрациями метана (8,3 нмоль/л), углекислого газа (2,3 ppm) в поверхностной воде, ртути (4 нг/м³) в атмосферном воздухе, а также с повышенной эмиссией метана с акваторий Прикорейского шельфа, Цусимской котловины, Корейского пролива (в последнем районе зафиксировано впервые). Повышенными содержаниями ртути в атмосфере выделяется о-в Уллындо.

3. По результатам геофизических исследований была дана характеристика гравитационного поля в Японском море на всем пути следования.

4. По результатам гидрооптических и гидрологических исследований было установлено, что в основном пространственно-временное распределение концентрации хлорофилла-а соответствует известным данным о развитии фитопланктона в Японском море в осенний сезон. Также было выявлено, что в некоторых районах низкие концентрации хлорофилла-а соответствуют низким значениям солености, что, вероятнее всего, обусловлено гидрофизическими процессами и гидробиологическими особенностями этих районов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захарков С.П., Шамбарова Ю.В., Гордейчук Т.Н. и др. Возможность использования данных зонда SBE для калибровки спутниковых данных концентрации хлорофилла *a* в Японском море // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 177. С. 209–218. DOI: 10.26428/1606-9919-2014-177-209-218.
2. Захарков С.П., Штрайхерт Е.А., Шамбарова Ю.В., Гордейчук Т.Н., Ши С. Определение концентрации хлорофилла «а» в Японском море с использованием зондирующего и проточного флуориметров // Океанология. 2016. Т. 56, № 3. С. 482–490. DOI: 10.7868/S0030157416020210.
3. Клещёва Т.И., Пермяков М.С., Салюк П.А., Голик И.А. Пространственные спектры полей температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а» в окраинных морях северо-западной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 209–220.
4. Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. Мощность и типы земной коры Японского моря по данным морской и спутниковой гравиметрии // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 6. С. 3–13.
5. Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода–атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток: Дальнаука, 2007. 159 с.
6. Моря СССР / А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
7. Byong-Jae Ryu, Riedel M. Gas hydrates in the Ulleung Basin, East Sea of Korea // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2017. Vol. 28, N 6. P. 943–963. DOI: 10.3319/TAO.2017.10.21.01.
8. Mischoukov V., Mishukova G. White caps and bubble mechanisms of gas exchange between ocean and atmosphere // Proc. 2nd Intern. Symp. «CO₂ in the Oceans» / ed. Y. Nojiri. Tsukuba: Centre for Global Environmental Research, 1999. P. 517–520.
9. Sang-Woo Kim, Sei-Ichi Saiton, Joji Ishizaka et al. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentrations in the Japan Sea derived from CZCS images // J. Oceanogr. 2000. Vol. 56. P. 527–538.
10. Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. Methane in water columns and sediments of the north western Sea of Japan // Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography. 2013. Vol. 86–87. P. 25–33.
11. Wiesenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water // J. Chem. Eng. Data. 1979. Vol. 24, N 4. P. 356–360. DOI: 10.1021/je60083a006.
12. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and sea water // J. Chem. Eng. Data. 1976. Vol. 21, N 1. P. 78–80.