

УДК 551.465

ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБСКОГО ЭСТУАРИЯ (КАРСКОЕ МОРЕ) В ПРЕДЗИМНИЙ ПЕРИОД

© 2025 г. А. А. Недоспасов*, С. В. Степанова, Е. А. Аглова, А. С. Щука

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия*** e-mail: nedospasov.aa@ocean.ru*

Поступила 17.10.2024 г.

После доработки 17.12.2024 г.

Принята к публикации 18.12.2024 г.

По данным, полученным в 92-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” 11–13 октября 2023 г. в северной части Обской губы, показано субмеридиональное положение эстуарного фронта в условиях малого стока р. Оби. В работе обсуждается влияние внешних факторов (речной сток, ветровое воздействие, приливы) на гидролого-гидрохимическую структуру вод в Обском эстуарии. На основе полученных данных выделены четыре типа вод, формирующих сложную термохалинную структуру в северной части Обского эстуария и на прилегающем мелководном шельфе Карского моря, разделенных фронтальными разделами с резкими вертикальными градиентами плотности.

Ключевые слова: Обский эстуарий, гидрологический фронт, речной сток, термохалинная структура, зона конвергенции

DOI: 10.31857/S0030157425030016, **EDN:** GUTVYD

ВВЕДЕНИЕ

Согласно определению, предложенному Д. Притчардом, эстуарий – это “полузамкнутый прибрежный водоем, имеющий свободную связь с открытым морем и в котором морская вода заметно разбавляется пресной водой, поступающей вследствие дренажа суши” [36]. Именно во взаимодействии в эстуариях морских и речных вод и образовании так называемого эстуарного барьера (биологического, седиментологического и геохимического) и заключается их ключевая роль для прибрежных экосистем [17, 19, 23, 41]. Изучение процессов, протекающих в эстуариях, имеет особое значение для арктических морей в связи с наличием обширного мелководного шельфа и, зачастую, большой величины речного стока. Так, более трети всего речного стока в Арктику поступает через эстуарии Оби и Енисея [27, 34]. В результате взаимодействия с морскими водами в этих эстуариях происходит основная трансформация аллохтонных биогенных элементов, взвешенного и растворенного терригенного материала.

Обская губа является замыкающим водоемом бассейна рек Обь и Таз. Объем пресного стока, поступающего в год через Обскую губу в Кар-

ское море, по оценкам В.В. Иванова, составляет 530 км³, из которых около 75.8% поставляет р. Обь [8–10]. Смешанный тип питания, огромная площадь водосборного бассейна р. Оби, отличающегося высокой степенью естественной зарегулированности, приводят к растянутости волны половодья практически на весь период открытой воды (с середины июня по середину октября) [1, 13, 14].

Согласно современной классификации, предложенной В.Н. Михайловым [19], Обская губа – микроприливный, сильно стратифицированный эстуарий лиманного типа с неблокированной приморской частью, что выражается в наличии контактирующих друг с другом “клина” опресненных вод в поверхностном слое и “клина” осолоненных вод в придонном слое. Вытянутую с севера на юг на 800 км Обскую губу, шириной 30–90 км, можно разделить на три части: южную, примыкающую к дельте р. Оби и простирающуюся до Тазовской губы, с глубинами от 1–3 м в своей южной части до 10 м на севере, центральную со средними глубинами 10–15 м – до траверза м. Штормовой (71.9° с. ш.) и северную – до границы с устьевой зоной приемного водоема – Карского моря [15]. Большая часть акватории северной

части Обского эстуария занята выходным баром шириной 50 км и глубинами около 10 м, вытянутым с северо-запада на юго-восток (рис. 1а).

Именно в северной части происходит основной контакт пресных речных вод с солеными водами Карского моря, формирующий эстуарную фронтальную зону. Положение “речной” границы этой зоны, условно проводящейся по изохалине 0.5 епс, имеет сезонный характер, смещаясь между волной половодья и концом зимней межени на 300 км с севера на юг [14, 18]. Бар в северной части акватории Обского эстуария препятствует продвижению соленых и плотных карскоморских вод в южном направлении в придонном слое [11]. Необходимо отметить, что над баром идет активный процесс осаждения аллохтонных взвешенных веществ [17].

В соответствии с классификациями, предложенными в конце XX в. [20, 21], в Карском море выделяются шесть водных масс в классическом определении [5]: Речные воды, Поверхностные Арктические воды Карского моря, Баренцево-морские воды, Зимние поверхностные воды, Глу-

бинные Атлантические воды и Придонные воды. Позже, в начале XXI в., лишь в контексте Обской губы были выделены четыре водные массы: водная масса речного плюма, зимняя полярная водная масса Карского моря, эстуарная водная масса и речные воды [11]. Подобная ситуация, на наш взгляд, связана с тем, что авторы стали свободнее трактовать понятие “водные массы”, уходя от оригинального определения. Мы считаем термин “водные массы” в классическом понимании неподходящим для тех пространственно-временных масштабов, в которых проводились работы. Наиболее корректной, на наш взгляд, представляется классификация, предложенная в работе [35], в которой авторы перешли от выделения водных масс к их типам. Например, для Обской губы и прилегающего шельфа были выделены речные водные массы, эстуарные поверхностные, промежуточные и придонные водные массы, а также водные массы речного плюма. Кроме того, у этих типов водных масс могут существовать летние и зимние модификации. В своей работе для разделения типов вод мы

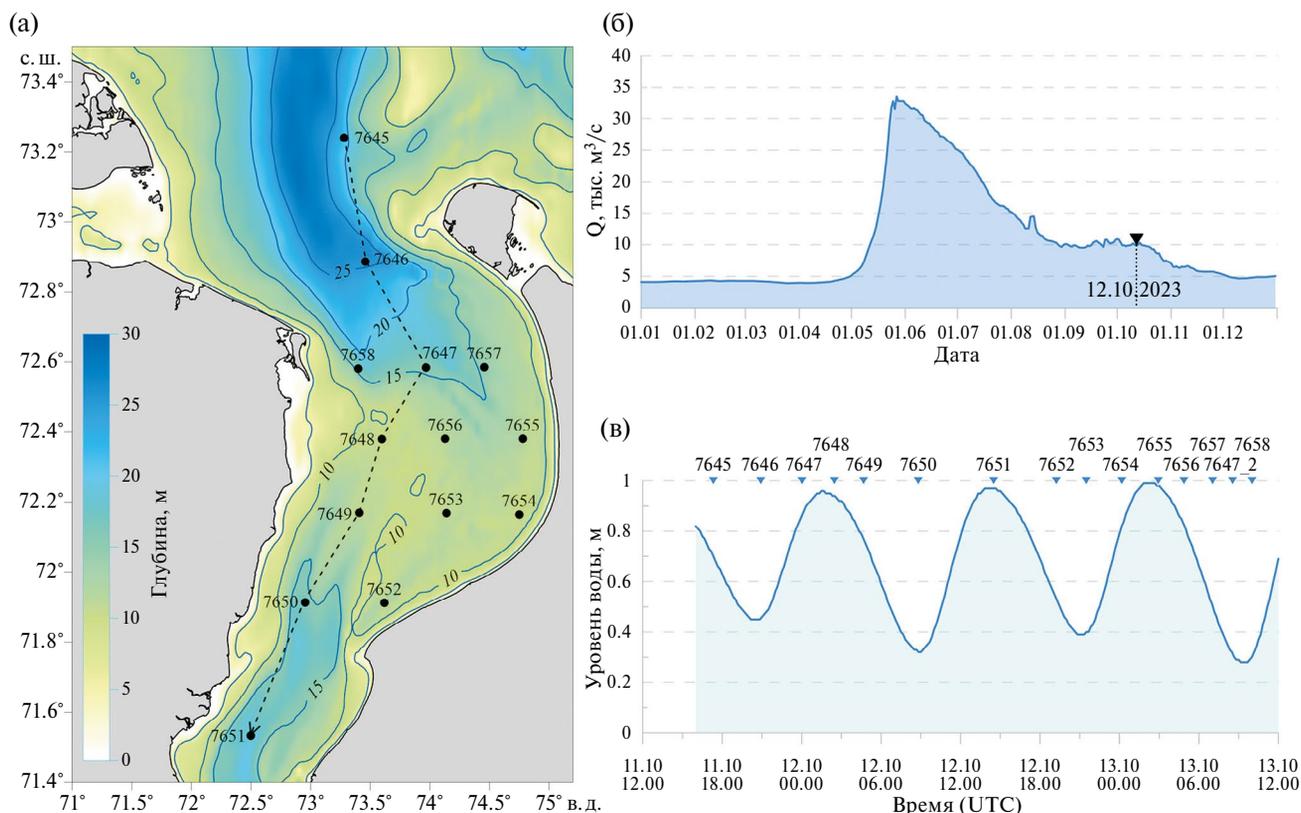


Рис. 1. Характеристика района работ: (а) рельеф дна северной части Обского эстуария (обский бар имеет глубину менее 15 м и расположен между 72° и 72.4° с. ш.) и схема расположения станций. Пунктирной линией обозначен гидрологический разрез, выполненный на первом этапе работ; (б) гидрограф р. Оби в г. Салехарде за 2023 г. по данным [42]. Черным треугольником отмечена дата проведения работ; (в) уровень воды (м) в северной части Обского эстуария, вычисленный по гармоническим постоянным из базы данных WXTide32 [37].

использовали области с повышенными градиентами (вертикальными и горизонтальными) гидрофизических параметров. Таким образом, рассматриваемая нами классификация несколько отличается от предложенной ранее, но позволяет довольно точно разделить схожие по свойствам воды.

Актуальность данной работы заключается в проведении исследований в период малой воды непосредственно перед началом ледообразования в Обской губе (рис. 1б). Ранее наблюдения в северной части Обского эстуария проводились преимущественно в весенне-летний период и в начале осени. Так, наиболее приближенная по времени гидрологическая съемка в рассматриваемом районе была выполнена в экспедиции, проведенной сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии и Института океанологии РАН в период низких вод (речной сток был меньше в сравнении с половодьем в два раза) с 18 сентября по 7 октября 2010 г. [13, 16]. Наши работы состоялись на три недели позже, при ослаблении речного стока до одной трети от максимальных значений в период половодья в конце мая – начале июня. В этот период влияние речного стока, который, несомненно, является основным фактором, формирующим гидрологическую структуру и циркуляцию вод в эстуариях лиманного типа [19], значительно ослабевает и увеличивается роль ветрового воздействия, приливов и их взаимодействия с рельефом дна [24, 30, 45]. В силу уменьшения скорости потока речных вод происходит ослабление действия силы Кориолиса, что приводит к отжиманию стокового течения от восточного берега солеными водами, затекающими из Карского моря [13]. Помимо этого увеличивается дальность распространения морских вод в придонном слое вглубь эстуария. Основная цель работы – изучение влияния внешних факторов на гидролого-гидрохимическую структуру вод северной части Обского эстуария в позднелесенный период перед ледоставом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работы в Обском эстуарии проводились 11–13 октября 2023 г. в два этапа в 92-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море. Первый этап заключался в выполнении разреза протяженностью 205 км, состоящего из 7 станций, вдоль оси эстуария от станции 7645, располо-

женной на шельфе Карского моря на 73.24° с. ш., до станции 7651 на 71.53° с. ш. на траверзе бухты Тамбей. Станции 7648 и 7649 были выполнены над обским баром. Среднее расстояние между станциями разреза составляло 40 км с его уменьшением над баром до 25 км.

Второй этап работ был выполнен в широкой части Обского эстуария севернее 71.8° с. ш. Для исследования пространственного распределения гидролого-гидрохимических параметров были выполнены 7 станций, охватывающих акваторию северной части эстуария с пространственным разрешением 25 км. Схема расположения станций, выполненных в ходе двух этапов работ в Обском эстуарии и батиметрическая карта района приведены на рис. 1а.

Измерения гидрофизических параметров *in situ* на комплексных океанологических станциях велись с борта судна с помощью комплекса SBE 911plus. Кроме CTD-зонда в гидрологическом комплексе были установлены датчики флуоресценции и мутности воды. Помимо вертикальных зондирований, на протяжении всего маршрута судна в приповерхностном слое велась непрерывная регистрация температуры и солености воды, интенсивностей флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) и показателя ослабления света морской водой на длине волны 530 нм с помощью проточного измерительного комплекса [3]. Забор воды проводился с глубины ~ 4 м. Дискретность измерений составляла 10 с, что при максимальной скорости движения судна 10 узлов позволило выполнить исследование изменчивости гидрологических и гидрооптических параметров с пространственным разрешением около 50 м.

Комплекс гидрохимических параметров на океанологических станциях включал в себя измерение следующих характеристик: водородный показатель (pH), общая титруемая щелочность (Ta), растворенный кислород (O₂), азот нитритный (NO₂), нитратный (NO₃), аммонийный (NH₄) и общий (N_{tot}), фосфор общий (P_{tot}), фосфор минеральный (PO₄), растворенный неорганический кремний (Si). Отбор проб для определения гидрохимических параметров проводился 5-литровыми батометрами, установленными на кассету SBE32. Все гидрохимические определения проводились по принятой методике [26].

Для того чтобы более достоверно оценить основные факторы, влияющие на изменение

содержания растворенного в воде кислорода, рассчитывалась величина “кажущегося потребления кислорода” (Apparent Oxygen Utilization – AOU) – отклонение концентрации кислорода от состояния насыщения. Расчет растворимости кислорода проводился с использованием стандартного соотношения [44]. Избыток кислорода ($AOU < 0$) свидетельствует о преобладании продукционных процессов над деструкционными, его дефицит ($AOU > 0$) говорит об увеличении доли деструкционных процессов в воде.

Помимо данных, полученных непосредственно в ходе экспедиции, были использованы данные из открытых источников. Батиметрической основой настоящей работы стала цифровая модель рельефа дна, созданная по картам ГУНИО МО РФ [31]. Гидрограф р. Оби за 2023 г. был построен по данным [42]. Предвычисление приливов выполнялось по гармоническим постоянным из базы данных WXTide32 для пункта Сабуле-Яха, расположенного на восточном берегу северной части Обского эстуария. Алгоритм прогнозирования приливов с помощью программы WXTide32 представлен в [37]. Для изучения ветровой обста-

новки над исследуемой акваторией в период проведения работ использовались данные реанализа ветра ERA5 с пространственным разрешением 0.25° и дискретностью 1 ч [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типы вод. На первом этапе работ при выполнении субмеридионального разреза в северной части Обского эстуария и на прилежащем шельфе Карского моря были обнаружены воды, различающиеся по гидрофизическим параметрам: эстуарные воды, воды поверхностного опресненного слоя (ПОС), промежуточные трансформированные воды, зимние шельфовые воды Карского моря. Границами этих вод являются фронтальные разделы с повышенными вертикальными градиентами плотности, которые отмечены красными пунктирными линиями (рис. 2).

Наиболее пресные и теплые *эстуарные воды* (тип I) наблюдались в южной части разреза. Соленость в них изменялась в диапазоне от 5.5 до 10 епс, температура превышала 3°C . Зона контакта с речными водами сместилась значительно южнее исследуемой акватории и не была достиг-

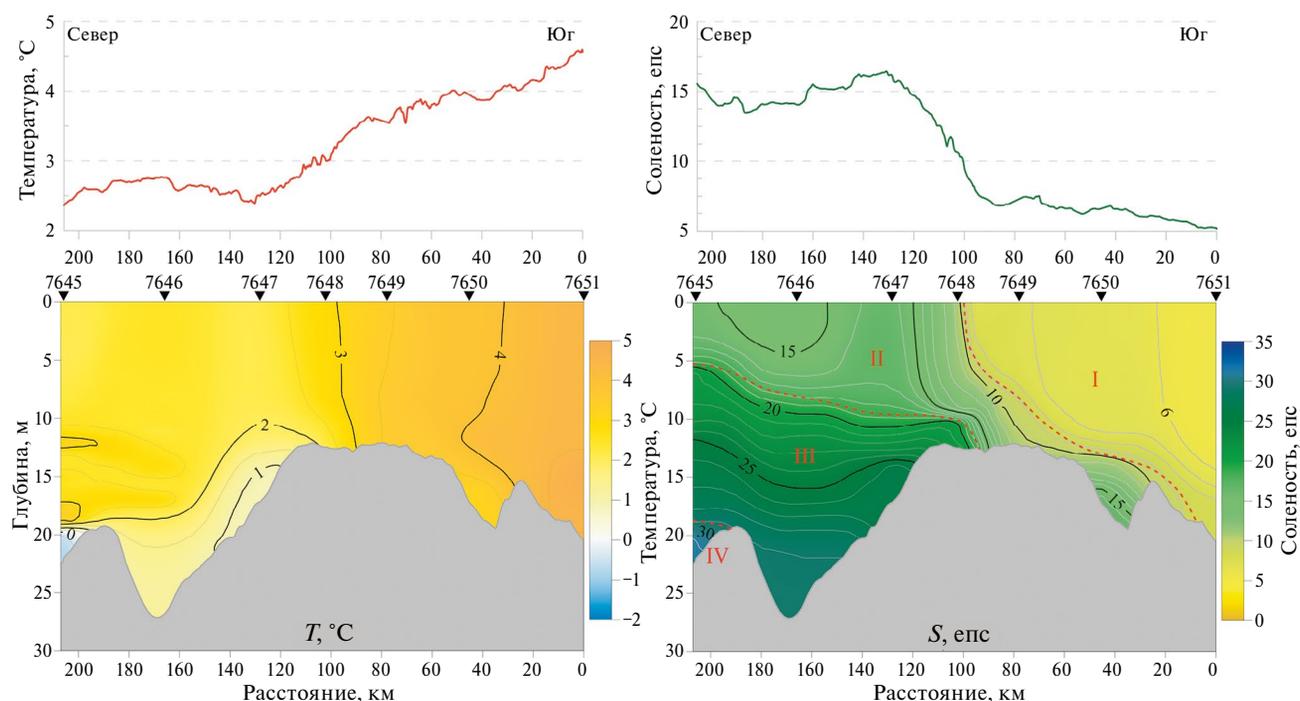


Рис. 2. Температура ($^\circ\text{C}$) и соленость (епс) воды в приповерхностном слое (по данным проточной системы) вдоль Обского разреза (вверху) и их вертикальные распределения на разрезе (внизу). Отсчет расстояния идет от южной станции разреза, расположенной в речной части, к морю. Красным пунктиром выделены фронтальные разделы по максимальным значениям вертикального градиента плотности; римскими цифрами отмечены выделенные типы вод: тип I – эстуарные воды, тип II – воды ПОС, тип III – промежуточные трансформированные воды, тип IV – зимние шельфовые воды Карского моря.

нута нами в ходе работ в Обской губе. Северной границей эстуарных вод являлся эстуарный фронтальный раздел, сохраняющий свое положение над обским баром даже в условиях смещения границы речных вод в южном направлении. Горизонтальный градиент солености в районе станции 7648, где этот фронтальный раздел выходил на поверхность, достигал 0.8 епс/км. Его квазистационарное положение может свидетельствовать о его топографической привязке к области бара. При этом внешние факторы (речной сток, ветровое воздействие и приливные течения) оказывают незначительное влияние на его флуктуации в пространстве, что ранее отмечалось и в работе [11]. Южнее фронтальный раздел резко заглублялся до 8 м на станции 7649 и 13 м на станции 7650, где в халоклине вертикальный градиент солености достигал 3 епс/м. На южной станции разреза 7651 вертикальная стратификация практически полностью отсутствовала, и лишь в придонном 2-метровом слое происходило увеличение солености с 6 до 8 епс.

Эстуарный фронт отделял эстуарные воды от *вод ПОС* (тип II) с соленостью 14–20 епс. Эти воды образуются в результате взаимодействия речных и морских вод в период половодья. К концу лета они часто занимают обширную область шельфа Карского моря. В зимний период занимаемая ими акватория значительно уменьшается, а их соленость увеличивается до 15–25 епс [11]. В ходе наших работ в Обском эстуарии эти воды наблюдались в верхнем 5–10-метровом слое в северной части разреза (станции 7645–7647). Под ними располагался второй фронтальный раздел, заглубляющийся с 7 м на станции 7645 к югу, упираясь в бар в районе станции 7648. Его выхода на поверхность в пределах исследуемой акватории не наблюдалось. Вертикальный градиент солености в нем превышал 3 епс/м на всех станциях, кроме ст. 7647.

Третий выделенный нами тип вод – *промежуточные трансформированные воды* (тип III) – представлял собой стратифицированный слой, в котором соленость увеличивалась с глубиной от 20 до 28 епс. По сути, этот слой является стоковым фронтальным разделом. К концу осени в результате вертикального перемешивания во время штормовых событий толщина градиентного слоя увеличивается, а величина градиента уменьшается. Механизм трансформации стокового фронтального раздела с дальнейшей рестратификацией довольно подробно обсуждался в работе [7].

В связи с тем, что в исследуемой акватории воды этого слоя занимали большую часть толщи, в настоящей работе мы их выделили в отдельный тип.

В придонном слое внешней части разреза (ст. 7645) наблюдались *зимние шельфовые воды* Карского моря (тип IV) с отрицательными значениями температуры (до -0.7°C) и более высокой соленостью (>30 епс). Вертикальные градиенты температуры и солености на верхней границе этого слоя составляли $3.6^{\circ}\text{C}/\text{м}$ и 2.8 епс/м соответственно.

Термохалинная структура. Во время выполнения второго этапа работ в Обском эстуарии было получено пространственное распределение гидрофизических параметров на акватории, которое демонстрирует общую схему взаимодействия эстуарных и более соленых вод как в поверхностном, так и в придонном слоях в условиях осенней межени р. Оби перед ледоставом (рис. 3). Вынос эстуарных вод происходил вдоль западного берега. Восточная часть, называемая “эстуарным мешком” [40], находилась под влиянием вод ПОС. В придонном слое более соленые морские воды, “зажатые” сверху эстуарными водами и водами ПОС, упирались в бар, препятствующий их распространению вглубь эстуария. К северо-востоку от бара воды с соленостью более 20 епс наблюдались на всех вертикальных профилях в придонном слое.

Наши исследования показали, что эстуарный фронт располагался практически вдоль оси эстуария, что при сравнительно слабом расходе реки может быть связано с взаимодействием приливных течений с рельефом дна [22]. Наибольший вертикальный градиент солености был отмечен на станции 7658 и составлял 8 епс/м. Здесь в поверхностном слое происходит вынос эстуарных вод в приемный водоем, а, судя по исследованиям [2], в результате выхода приливной волны Карского моря на мелководье северной части Обской губы наблюдаются наибольшие амплитуды приливных течений во всей ее акватории.

С учетом субмеридионального расположения фронта на поверхности моря, на втором этапе работ судно дважды пересекло его – при подходе к станции 7653 и между станциями 7647_2 и 7658. Горизонтальный градиент солености через фронт был вдвое больше, чем при пересечении его на разрезе, и достигал 1.54 епс/км. Было установлено, что во время проведения работ – от I этапа по II (с 18:00 UTC 11 октября по 18:00 UTC 12 октября выполнялся разрез, а затем еще ровно сутки до 18:00 UTC 13 октября проводилась площадная

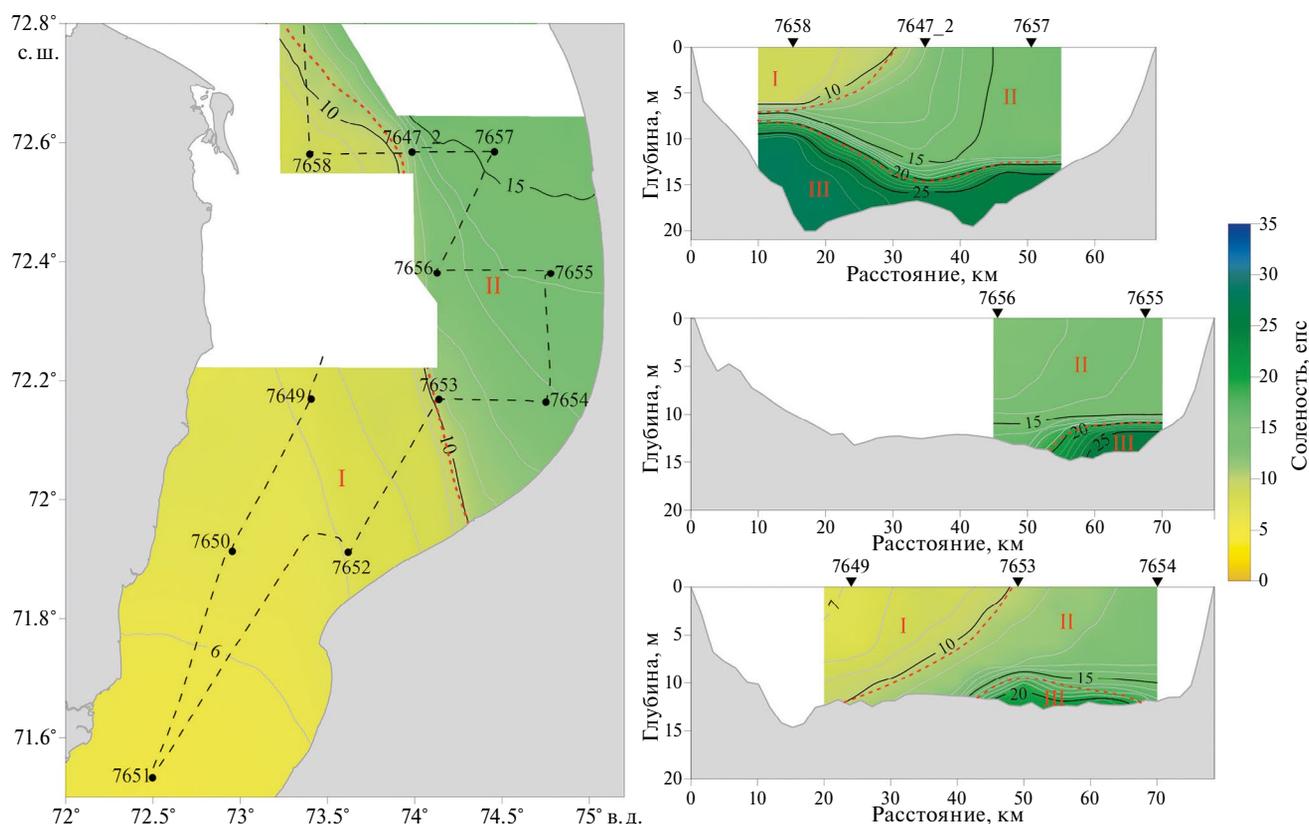


Рис. 3. Распределение солёности воды (пс) в приповерхностном слое по данным проточной системы (слева). Пунктиром обозначен маршрут судна с измерениями проточной системой. Красный точечный пункт — эстуарный фронт. Вертикальное распределение солёности на поперечных разрезах в северной части Обского эстуария (справа). Красным пунктиром выделены фронтальные разделы по максимальным значениям вертикального градиента плотности; римскими цифрами отмечены выделенные типы вод.

съемка) — фронт сместился в восточном направлении на расстояние около 20 км всего за сутки (с 12 по 13 октября). В связи с этим на карте распределения солёности в приповерхностном слое не проводилась интерполяция в области высоких горизонтальных градиентов солёности, наблюдаемых при выполнении первого этапа работ в районе станции 7648. К смещению фронта могло привести влияние приливов или ветрового воздействия в период малого речного стока.

Влияние приливов и ветрового воздействия на динамику эстуарного фронта. Согласно имеющимся представлениям на всей акватории Обской губы в безледный период преобладает полусуточный прилив с максимальной амплитудой колебаний 54 см в районе о-ва Халэвнго у Ямальского берега [12]. При распространении на юг происходит плавное затухание приливной волны. На рис. 1в представлено изменение уровня воды в период работ в Обском эстуарии, вычисленный по гармоническим постоянным для пун-

кта р. Сабуле-Яха, расположенного вблизи станции 7654. Станции выполнялись в разные фазы прилива, что затрудняет анализ влияния приливных колебаний на структуру вод в эстуарии. Тем не менее следует отметить, что “западное” положение фронта (при его пересечении на 72.38° с. ш. в районе станции 7648) наблюдалось в период высокой воды. “Восточное” же положение фронта (при его пересечении на 72.17° с. ш. у станции 7653 и на 72.58° с. ш. у станции 7647_2) соответствует фазе низкой воды. В обоих случаях фронт сохранял свое положение практически вдоль оси эстуария. Подобные продольные фронтальные разделы обычно располагаются вдоль осей характерных особенностей донной топографии [22]. Исследования продольных эстуарных фронтов ведутся довольно давно [29, 32], и к настоящему времени существуют три основные теории механизма их формирования [43]. Мы предполагаем, что формирование эстуарного фронта в рассматриваемом районе связано с диссипацией ки-

нетической энергии течений над мелководным баром, что может объяснять его квазипостоянное положение. В северной части Обского эстуария скорость сизигийного приливного течения составляет около 50 см/с, что почти на порядок больше скорости стокового течения даже во время половодья (10 см/с и менее) [2, 4]. Согласно критерию Симпсона–Хантера положение фронта в условиях взаимодействия приливного течения с рельефом дна определяется отношением глубины места к кубу средней сизигийной амплитуды скорости течения [38, 39]. Таким образом, наблюдаемое смещение фронта может быть связано с изменением скорости приливных течений. Однако определение способа генерации продольного фронта в Обском эстуарии не являлось целью данной работы и требует дополнительных измерений параметров течений на протяжении приливного цикла.

Как показал анализ данных по реанализу ветра, работам в северной части эстуария предшествовало ослабление северного ветра с 7 м/с 11 октября

в 0:00 UTC до 4 м/с в 17:00 UTC (рис. 4). Позже, при продвижении судна вглубь эстуария, произошла смена направления ветра на юго-восточное и увеличение его скорости до 8 м/с к 18:00 UTC 12 октября, когда произошла его стабилизация до завершения работ 13 октября в 10:01 UTC. Незначительная изменчивость ветровой обстановки над акваторией в период выполнения работ на станциях 7648–7647_2 может говорить о том, что смещение гидрологического фронта в восточном направлении на 20 км не было связано с ветровым воздействием.

Результаты, представленные в работе [33], могут служить подтверждением нашей гипотезы. А.А. Осадчиевым были проведены расчеты, демонстрирующие, что при среднем ветре 5 м/с над акваторией северной части Обского эстуария его влияние на циркуляцию вод значительно слабее, чем горизонтального градиента плотности. При южном и восточном ветрах на акватории эстуария формировалась антициклоническая циркуляция, включающая в себя вынос речных вод вдоль

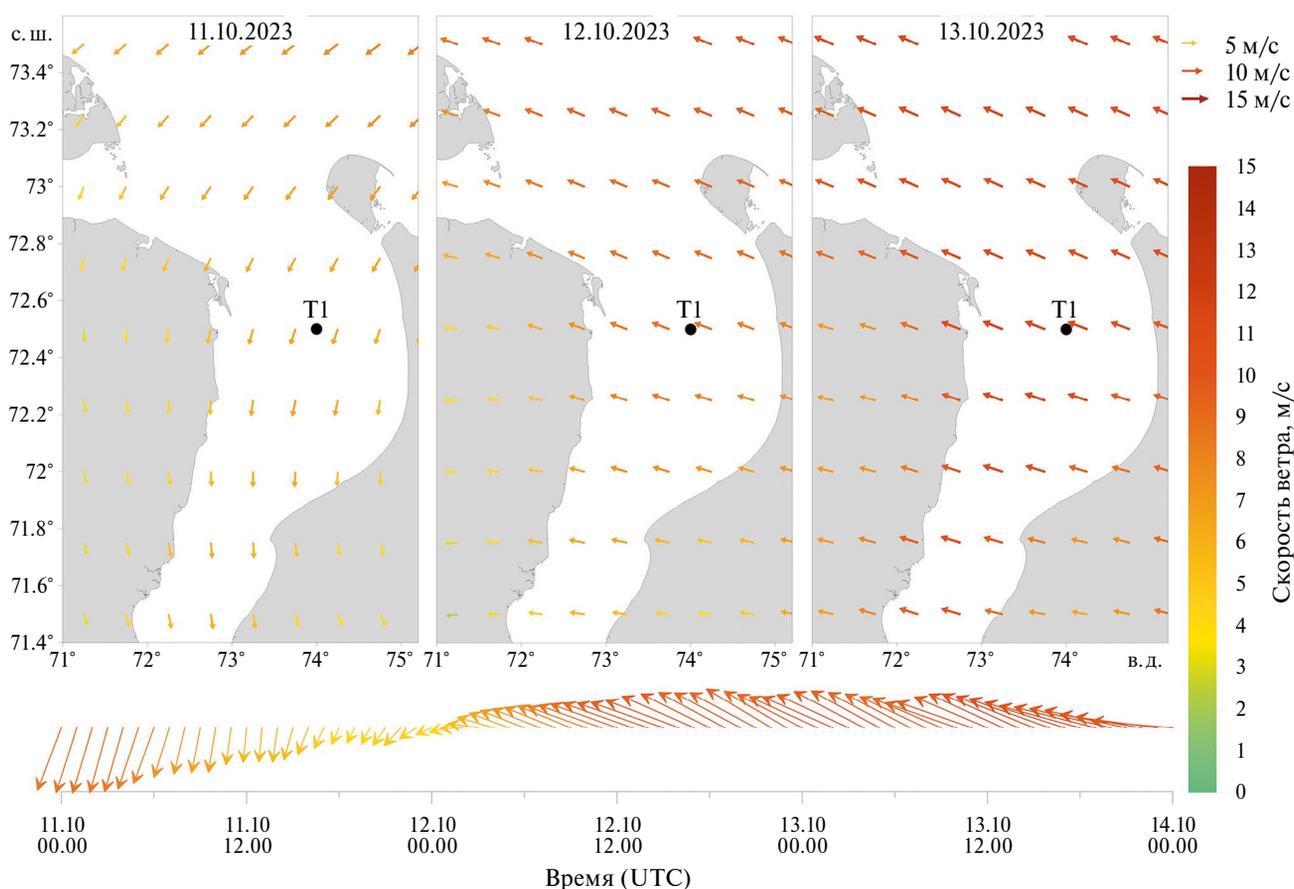


Рис. 4. Скорость и направление ветра над акваторией северной части Обского эстуария в период работ (вверху), временная изменчивость ветра в точке T1 по данным реанализа ERA5 [28].

западного берега за счет особенностей орографии и рельефа дна и заток морских вод из Карского моря вдоль восточного берега. Северный и западный ветры, в свою очередь, затрудняли антициклоническую циркуляцию, формируя вихревые структуры вдоль гидрологического фронта.

Оптические характеристики. Гидрооптические параметры могут выступать в качестве трассера пресных вод, а также маркировать динамические процессы, происходящие в прифронтальной зоне. На диаграмме зависимости мутности воды от солености хорошо видно, что при общем уменьшении взвеси в направлении от реки в море, над баром и, особенно, в западной части эстуария, где происходит основной вынос речных вод, наблюдается значительное повышение мутности воды (рис. 5а). Так, наиболее мутные воды наблюдались на станциях, расположенных с “речной” стороны от гидрологического фронта (ст. 7649 и 7650), что может быть связано с наличием зоны фронтальной конвергенции [22]. На северных внешних эстуарных станциях (ст. 7645–7647) мутность значительно увеличивается только в придонном 3-метровом слое. Из общей картины сильно “выбивается” станция 7658,

на которой мутность была высокая во всей исследованной толще. Вероятным механизмом этого являются интенсивные вертикальные потоки при взаимодействии разнонаправленных течений – приливного и стокового.

Хорошим маркером пресных вод в Карском море, которые, как правило, богаты органическим веществом, является интенсивность флуоресценции ОРОВ [6]. На рис. 5б видна обратная зависимость интенсивности флуоресценции ОРОВ от солености, характерная для данной акватории [25]. Помимо этого при продвижении вглубь эстуария наблюдается и увеличение показателя ослабления света морской воды, что связано с более высоким содержанием взвеси в речных водах. Следует также отметить, что интенсивность флуоресценции ОРОВ при одинаковой солености различалась вблизи западного берега и в “эстуарном мешке”. Так, высокие значения интенсивности флуоресценции при той же солености наблюдались при движении с севера на юг, а также в районе станции 7658, расположенной с “речной” стороны от фронта. Максимальные величины рассматриваемых оптических характеристик наблюдались в районе станции 7649, где, по-видимому, находилась зона конвергенции.

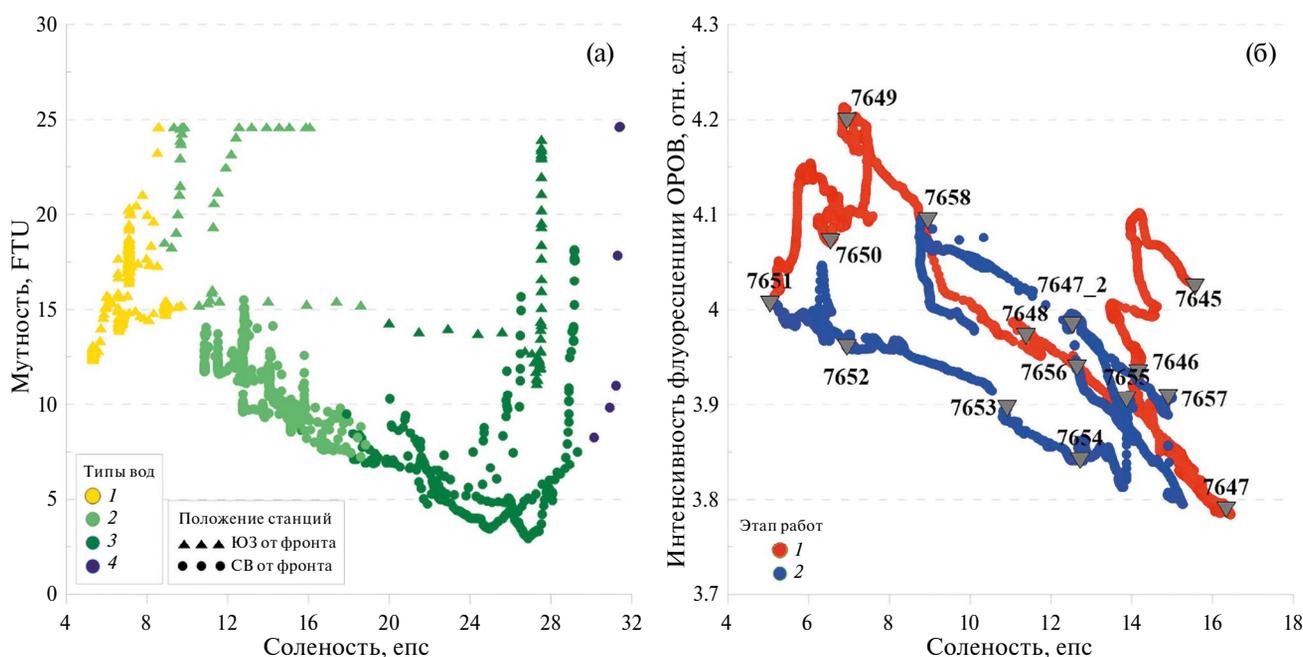


Рис. 5. Распределение оптических показателей в поле солености: (а) диаграмма зависимости мутности (FTU) от солености воды (eps) в Обском эстуарии по данным вертикальных зондирований. Цветом обозначено соответствие выделенным типам вод. Треугольниками отмечены станции, расположенные с “речной” (западной) стороны от эстуарного фронта, кругами – с “морской” стороны (восточной); (б) диаграмма зависимости интенсивности флуоресценции ОРОВ (отн. ед.) от солености воды (eps) по данным проточной системы. Цветом обозначены этапы работ.

Гидрохимическая структура. В период проведения работ в северной части Обской губы наблюдалось преобладание деструкционных процессов над продукционными во всей толще вод, о чем свидетельствуют положительные значения AOU . Учитывая, что в рассматриваемый сезон фитопланктон уже не оказывает существенного влияния на содержание биогенных элементов [40], создаются условия для начала процессов регенерации основных форм биогенных элементов. Действительно, на большей части акватории, как в поверхностном, так и в придонном слоях отмечались высокие значения NH_4 и присутствие NO_2 . Было заметно также увеличение концентраций NO_3 и PO_4 в поверхностном слое. На момент исследований растворенный фосфор уже на 90% перешел в минеральную форму, в то время как растворенный азот преимущественно находился в органической форме (в среднем, органический азот составлял около 50% от общего). Значительное влияние на вертикальное и пространственное распределения биогенных элементов, естественно, оказывают гидрологические условия и орография, создавая различные условия для их трансформации и накопления.

Вертикальное распределение гидрохимических параметров в целом соответствует распределению гидрофизических параметров в исследуемой акватории и определяется, во многом, положением фронтальных разделов (рис. 6).

Как видно на рис. 6, к северу от бара, где, как было отмечено выше, толща вод была сильно стратифицирована, в поле гидрохимических параметров выделяются два отличных по характеристикам слоя, которые соответствуют II и III типам вод, выделенных нами ранее. Слой зим-

них вод (тип IV) не выделяется отчетливо в поле гидрохимических параметров, по крайней мере, на разрезе.

В районе фронта (над обским баром) распределение гидрохимических параметров по вертикали, как и ожидалось, носило более однородный характер. В поле гидрохимических параметров отмечаются локальные экстремумы (ст. 7649 и 7650), что, как уже говорилось в предыдущем разделе, связано с существованием зоны конвергенции, приуроченной к фронтальному разделу.

Южнее 72° с. ш. за баром в вертикальном распределении гидрохимических параметров вновь наблюдаются различия в величинах между поверхностным и придонным слоями. Однако они выражены слабее, чем на северных станциях. Концентрации фосфатов и кремния здесь достигали 1.3 и 60 μM соответственно. Концентрации форм минерального азота составляли порядка 4, 3 и 0.15 μM для нитратного, аммонийного и нитритного азота соответственно. Более заметны были различия в вертикальном распределении гидрохимических параметров (прежде всего, минерального фосфора, кислорода и аммонийного азота) на станции 7950, где в придонном слое наблюдались более соленые воды. Значения гидрохимических параметров для выделенных нами типов вод приведены в табл. 1.

В целом типы вод III и IV, которые, как уже говорилось выше, не выходили на поверхность в пределах исследуемой акватории, отличались низкими значениями кислорода и наибольшими значениями AOU . В этих водах концентрация фосфатов и кремния была в целом ниже, чем в опресненных поверхностных водах, порядка 0.7 и 35 μM соответственно. Концентрация

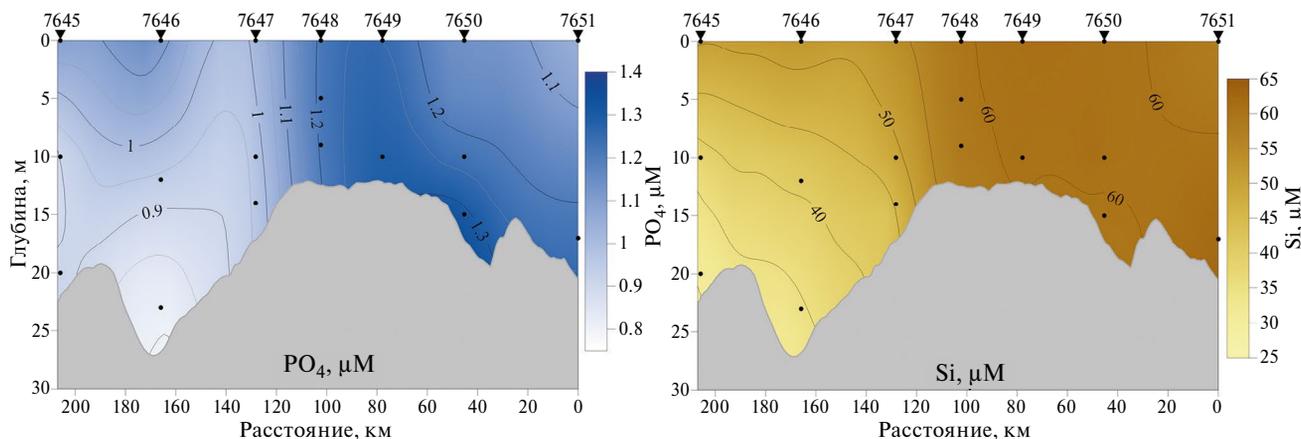


Рис. 6. Вертикальные распределения минерального фосфора (PO_4 , μM) и растворенного кремния (Si , μM) на разрезе.

Таблица 1. Содержание биогенных элементов в типах вод, выделенных по гидрофизическим параметрам

Параметр	Эстуарные воды (тип I)	Воды ПОС (тип II)	Промежуточные воды (тип III)	Зимние воды (тип IV*)
O ₂ , мл/л	7.5–8.5	7.3–8.5	5.6–7.7	5.6
AOU, μM	17–44	14–53	16–116	125
Si, μM	58–62	48–60	33–55	30
PO ₄ , μM	1.0–1.5	0.9–1.4	0.7–1.1	1.0
NO ₃ , μM	2.9–4.5	1.9–4.7	2.8–7.1	5.2
NO ₂ , μM	0.15–0.19	0.10–0.27	0.07–0.16	0.06
NH ₄ , μM	1.9–3.6	1.5–3.4	0.4–3.3	0.1

*Значения получены только в одной точке на станции 7645.

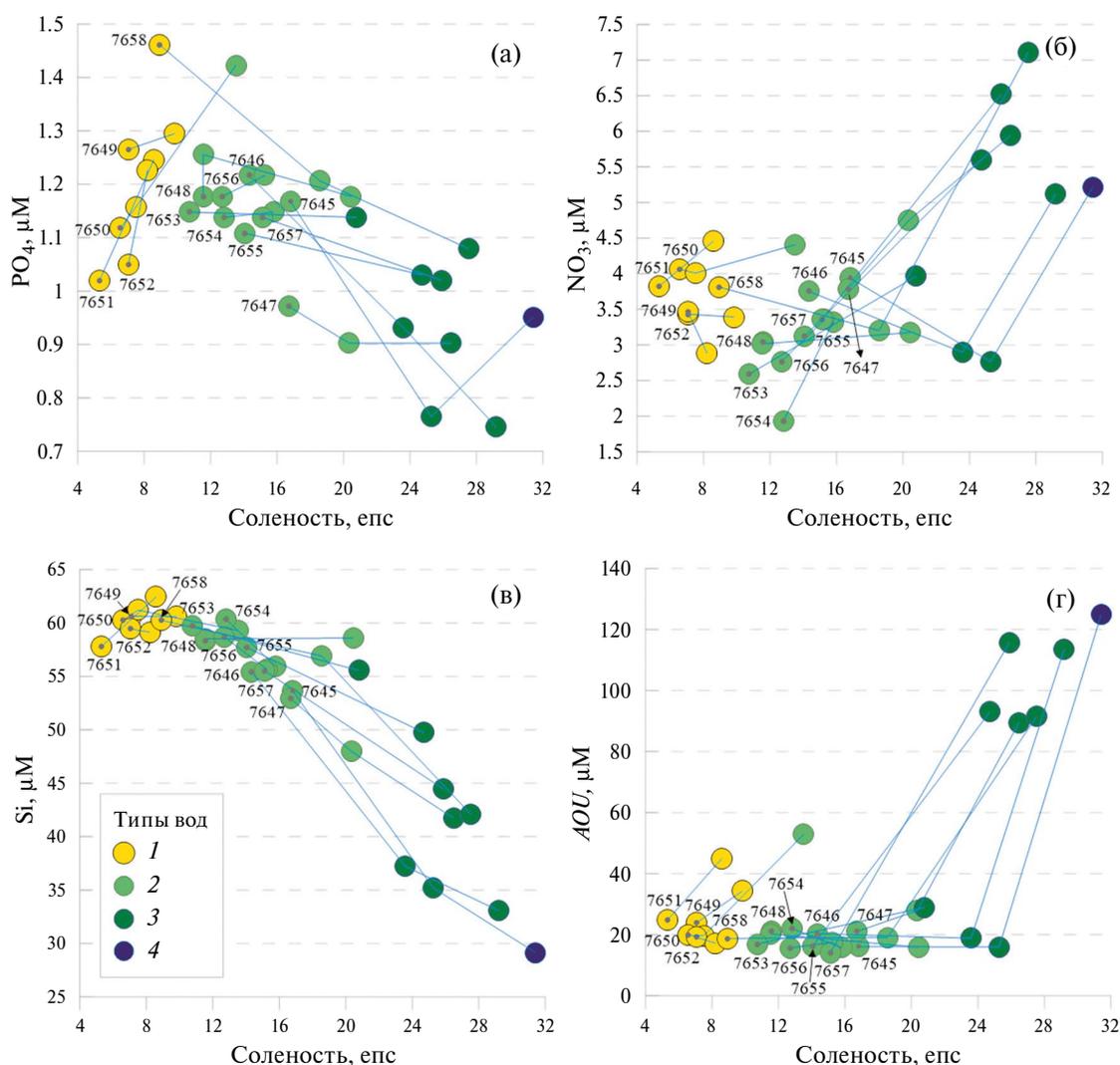


Рис. 7. Диаграмма зависимости концентрации биогенных элементов и кажущегося потребления кислорода (μM) от солености воды (епс) в Обском эстуарии: (а) минерального фосфора (PO₄); (б) нитратного азота (NO₃); (в) растворенного кремния (Si); (г) кажущегося потребления кислорода (AOU). Цветом обозначено соответствие выделенным типам вод. Голубые линии соединяют горизонты станции. Точками отмечены верхние горизонты станции.

нитратного азота, напротив, была наибольшей. Содержания аммонийного и нитритного азота, характеризующих поступление свежей органики, в этих водах колебались в широких пределах от значений порядка 1 и 0.1 μM соответственно, что характерно для трансформированных “старых” вод, до значений, наблюдавшихся нами в более пресных водах. Более низкие значения *AOU* и некоторых биогенных элементов в этих водах наблюдались на внешних станциях разреза (ст. 7645 и 7646), где они поднимались ближе к поверхности до глубин 10–12 м. Типы вод I и II в целом были схожи по содержанию биогенных элементов.

Для анализа пространственной изменчивости гидрохимической структуры вод и факторов, ее обуславливающих, были построены диаграммы зависимости основных гидрохимических параметров от солености (рис. 7).

В целом гидрохимические параметры, несмотря на некоторую тенденцию к изменению вместе с изменением солености, в большинстве случаев проявляли неконсервативное поведение в поле солености. В поле гидрохимических параметров, как и в предыдущие годы исследований [13, 16], проявляются различия в концентрации биогенных элементов в поверхностном слое западной и восточной частей рассматриваемой акватории. Однако различия выражены менее отчетливо, что обусловлено как уменьшением объема поступающего речного стока, так и превалированием деструкционных процессов над продукционными в рассматриваемый сезон. Наблюдаются пространственные различия в характеристиках придонных вод. Эти различия отмечаются не только в том случае, когда придонные воды были сформированы разными типами вод (по гидрофизическим параметрам), но и для одного типа вод, трансформация которых, по-видимому, происходит в разных условиях. Так, можно отметить существенные различия в содержании биогенных элементов в морских водах (тип III) на станциях к северу от бара (ст. 7645–7647) и в тех, которые были обнаружены в “эстуарном мешке” (ст. 7653–7655 и 7657).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ, выполненных в северной части Обского эстуария 11–13 октября 2023 г., были получены пространственные распределения гидрофизических, оптических и гидрохимических параметров на акватории, которые демонстрируют сложную схему взаимодействия опресненных

эстуарных и более соленых вод как в поверхностном, так и в придонном слоях в условиях осенней межени р. Оби перед ледоставом.

Над устьевым баром был обнаружен гидрологический фронт, который отделяет эстуарные воды с пониженной соленостью, распространяющиеся вдоль западного берега, от вод ПОС, занимающих “эстуарный мешок”. Следует отметить, что влияние силы Кориолиса должно вызывать распространение вод ПОС вдоль западного берега, а эстуарных вод – вдоль восточного. Важной особенностью следует считать продольное положение фронта на поверхности, предположительно связанное с диссипацией кинетической энергии приливных течений над мелководным баром. Это предположение объясняет и квазистационарность фронта в области бара даже при смещении границы контакта речных вод с морскими, при значительном понижении речного стока в осенний период.

Гидрооптические наблюдения, проведенные в исследуемой акватории, позволили подтвердить существенные различия в биогеохимических процессах, происходящих в области действия стокового течения и “эстуарного мешка”. Так, интенсивность флуоресценции ОРОВ, при одинаковой солености в западной части эстуария, заметно выше, чем в восточной. Помимо этого мутность и показатель ослабления света, связанные с содержанием взвеси, позволили выявить зону конвергенции с речной стороны от эстуарного фронта над баром.

Распределение биогенных элементов в целом сохраняет типичные черты, отмеченные в ходе предыдущих исследований (различия между западной и восточной частями эстуария, наличие экстремумов биогенных элементов в районе бара), однако различия выражены менее отчетливо. В то же время, учитывая стратифицированность водной толщи на большей части акватории, различия в характеристиках поверхностных и придонных вод сохраняются. Значительное влияние на вертикальное и пространственное распределения биогенных элементов, естественно, оказывали гидрологические условия и орография, создавая различные условия для трансформации и накопления биогенных элементов.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 23-17-00156 с использованием экспедиционных данных, полученных в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2024-0016.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёшина Н.И., Гейфе И.В. Особенности гидрологического режима верхней Оби для возможности водохозяйственного использования // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. Т. 11-2. С. 57–60. DOI: 10.24411/2500-1000-2019-11751.
2. Войнов Г.Н. Приливы в Обской губе (Карское море). I. Общая характеристика приливов // Учен. зап. РГГМУ. 2016. № 44. С. 70–95.
3. Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гуреев Б.А. и др. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 814–822. DOI: 10.31857/S0030157420040103.
4. Дианский Н.А., Фомин В.В., Грузинов В.М. и др. Оценка влияния подходного канала к порту Сабетта на изменение гидрологических условий Обской губы с помощью численного моделирования // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3(19). С. 18–29.
5. Добровольский А.Д. Об определении водных масс // Океанология. 1961. Т. 1. Вып. 1. С. 12–24.
6. Дроздова А.Н., Пацаева С.В., Хунджуа Д.А. Флуоресценция растворенного органического вещества как маркер распространения пресных вод в Карском море и заливах архипелага Новая Земля // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 49–56. DOI: 10.7868/S0030157417010038.
7. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Баранов В.И. и др. О ветровом механизме трансформации линзы опресненных речным стоком вод в Карском море // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 5–12.
8. Иванов В.В. Водный баланс и водные ресурсы суши Арктики // Труды ААНИИ. 1976. Т. 323. С. 4–24.
9. Иванов В.В. Гидрологический режим низовьев и устьев рек Западной Сибири и проблема оценки его изменений под влиянием территориального перераспределения водных ресурсов // Проблемы Арктики и Антарктики. 1980. Вып. 55. С. 20–43.
10. Иванов В.В., Осипова И.В. Сток Обских вод в море и его многолетняя изменчивость // Труды ААНИИ. 1972. Т. 297. С. 86–91.
11. Ильин Г.В. Гидрологический режим Обской губы как новой области морского природопользования в российской Арктике // Наука Юга России. 2018. Т. 14. № 2. С. 20–32.
12. Коптева А.В. Уровень и течения Обской губы // Труды Арктич. Ин-та. 1953. Т. 59. С. 84–148.
13. Ланин С.А. Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 1–10.
14. Ланин С.А. Специфика формирования зон повышенной продуктивности в Обском эстуарии // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 146–154.
15. Ланин С.А. Особенности формирования пресноводного стока в эстуарных системах Оби и Енисея // Труды ВНИРО. 2017. Т. 166. С. 139–150.
16. Ланин С.А., Мазо Е.Л., Маккавеев П.Н. Комплексные исследования Обской губы (июль–октябрь 2010 г.) // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 758–762.
17. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
18. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.
19. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.
20. Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
21. Русанов В.П., Яковлев Н.И., Буйневич А.Г. Гидрохимический режим Северного Ледовитого океана // Труды ААНИИ. 1979. Т. 355. 144 с.
22. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
23. Хлебович В.В. Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука, 1974. 235 с.
24. Geyer W.R. Estuarine salinity structure and circulation. In: Valle-Levinson A., editor. Contemporary Issues in Estuarine Physics. Cambridge: Cambridge University Press. 2010. P. 12–26. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511676567.003>
25. Glukhovets D.I., Goldin Y.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // Oceanologia. 2020. V. 62. P. 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.04.002>
26. Grasshoff K., Kremling K., Ehrhardt M. (Eds.) Methods of Seawater Analysis, 3rd ed. Wiley-VCH Verlag GmbH: Weinheim, Germany, 1999. 577 p. <https://doi.org/10.1002/9783527613984>
27. Hanzlick D.J., Aagaard K. Freshwater and atlantic water in the Kara Sea // Journal of Geophysical Research. 1980. V. 85. P. 4937–4942.
28. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of Royal Meteorol Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
29. Huzzey L.M., Brubaker J.M. The formation of longitudinal fronts in a coastal plain estuary // J. Geophys. Res. 1988. V. 93(C2). P. 1329–1334. DOI: 10.1029/JC093iC02p01329.
30. Miranda L.B., Andutta F.P., Kjerfve B., Castro Filho V.M. Fundamentals of Estuarine Physical Oceanog-

- raphy. Ocean Engineering & Oceanography. Springer. 2017. 480 p.
DOI: 10.1007/978-981-10-3041-3.
31. *Nedospasov A.A., Shchuka S.A., Shchuka A.S.* Modern high-resolution digital elevation model of the Kara Sea bottom // *Oceanology*. 2023. V. 63. Suppl. 1. P. S111–S118.
DOI: 10.1134/S0001437023070111.
 32. *O'Donnell J.* Surface fronts in estuaries: a review // *Estuaries*. 1993. V. 16. P. 12–39.
DOI: 10.2307/1352761.
 33. *Osadchiv A., Konovalova O., Gordey A.* Water exchange between the Gulf of Ob and the Kara Sea during ice-free seasons: the roles of river discharge and wind forcing // *Front. Mar. Sci.* 2021. V. 8: 741143.
DOI: 10.3389/fmars.2021.741143.
 34. *Pavlov V.K., Pfirman S.L.* Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 1995. V. 42. Iss. 6. P. 1369–1390.
[https://doi.org/10.1016/0967-0645\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0967-0645(95)00046-1)
 35. *Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A.* River run-off influence on the water mass formation in the Kara Sea // *In Siberian River Run-Off in the Kara Sea*, Ed. By R. Stein. Elsevier, Amsterdam, 2003. P. 9–25.
 36. *Pritchard D.W.* What is an estuary: a physical viewpoint. In: Lauff G.H. (Ed.). *Estuaries*, American Association for the Advancement of Science, Washington DC, 1967. V. 1. P. 149–176.
 37. *Schureman P.* Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. Washington DC, United States Government Printing Office, 1958. 317 p.
<http://dx.doi.org/10.25607/OBP-155>
 38. *Simpson J.H., Hunter J.R.* Fronts in the Irish Sea // *Nature*. 1974. V. 250. P. 404–406.
<https://doi.org/10.1038/250404a0>
 39. *Simpson J.H., Pingree R.D.* Shallow sea fronts produced by tidal stirring. In: Bowman M.J., Esaias W.E. (eds). *Oceanic Fronts in Coastal Processes*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1978. P. 29–42.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-66987-3_5
 40. *Sukhanova I.N., Flint M.V., Fedorov A.V. et al.* Phytoplankton of the Ob Estuary (Kara Sea) in the season preceding winter // *Oceanology*. 2024. V. 64. P. 493–500.
<https://doi.org/10.1134/S0001437024700164>
 41. *Telesh I.V., Khlebovich V.V.* Some principal processes within the estuarine salinity gradient // *Mar. Poll. Bull.* 2010. V. 61. P. 149–155.
DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.008.
 42. The Arctic Great Rivers Observatory. 2024. Discharge Dataset, Version 20240125.
<https://www.arcticrivers.org/data>
 43. *Wang D., Lu S., Xie Z. et al.* High-resolution observations of longitudinal fronts in a well-mixed tidal channel // *Front. Mar. Sci.* 2024. V. 11.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1497453>
 44. *Weiss R.F.* The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1970. V. 17. № 4. P. 721–735.
 45. *Winant C.* Wind and tidally driven flows in a semi-enclosed basin. In: Valle-Levinson A. (ed.). *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge: Cambridge University Press. 2010. P. 125–144.

HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL FEATURES OF THE OB ESTUARY (KARA SEA) IN THE SEASON PRECEDING WINTER

A. A. Nedospasov*, S. V. Stepanova, E. A. Aglova, A. S. Shchuka

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

*e-mail: nedospasov.aa@ocean.ru

According to the data obtained during cruise 92 of the RV *Akademik Mstislav Keldysh* on October 11–13, 2023, in the northern part of the Ob estuary, the submeridional position of the estuarine front is shown under conditions of small discharge of the Ob River. The paper discusses the influence of external factors (river runoff, wind stress, tides) on the hydrological and hydrochemical structure of waters in the Ob estuary. Based on the data obtained, 4 types of waters are identified that form a complex thermohaline structure in the northern part of the Ob estuary and the adjacent shallow shelf of the Kara Sea, separated by frontal sections with sharp vertical density gradients.

Keywords: Ob estuary, hydrological front, river runoff, thermohaline structure, convergence zone