

## ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ ОБСКОЙ ГУБЫ В РАННЕОСЕННИЙ ПЕРИОД

*канд. геогр. наук С.А. ЛАПИН, канд. геогр. наук К.В. АРТАМОНОВА,  
науч. сотр. И.А. ГАНГНУС, науч. сотр. К.К. КИВВА*

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии,  
Москва, e-mail: sal58@mail.ru*

На базе подробной гидролого-гидрохимической съемки во фронтальной зоне Обской губы проведен анализ ее состояния применительно к условиям ранней осени. Описана гидрологическая структура вод и процессы трансформации водных масс, отображенные в изменении их гидрохимических характеристик. Показано влияние периодических воздействий погодных условий на динамику и химический состав вод, прилегающих к фронтальной зоне.

*Ключевые слова:* Обская губа, фронтальная зона, гидрология, биогенные элементы, растворенный органический углерод.

### ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения настоящей работы явилась разработанная ФГУП «ВНИРО» программа по мониторингу водной среды во фронтальной зоне Обской губы (области активного контакта пресных речных и соленых морских вод). Центральную часть этого участка занимает обширный обской бар, представляющий из себя мощную песчаную плотину шириной до 50 км, разделяющую соленые и пресные воды. Гидрологические и гидрохимические процессы в области взаимодействия двух разнородных водных масс во многих отношениях являются ключевыми для функционирования сложного биоценоза Обской губы и в значительной степени определяют формирование продукционного потенциала всего водоема (Лапин, 2011б, 2014). Именно это обстоятельство послужило основанием для определения данного участка Обской губы местом мониторинговых исследований в период кардинального переустройства ее экосистемы, связанного с частичным разрушением обского бара строящейся (в рамках проекта Ямал-СПГ) широкой судоходной прорезью (рис. 1). Важно подчеркнуть, что, в отличие от законодательно требуемых мероприятий производственного экологического контроля и экологического мониторинга, реализуемых в этом районе, нашу программу отличает четко выраженный экосистемный подход. В целом предлагаемая работа является логическим продолжением предшествовавших комплексных исследований ФГУП «ВНИРО» в Обской губе, выполненных в разные сезоны 2006–2010 гг. (Лапин, 2011б). Важнейшими из них были охватившие большую часть ее акватории подробные гидрологические, гидрохимические, биохимические, гидробиологические и токсикологические исследования, выполненные в 2010 г.: в начале и в конце периода открытой воды (Лапин и др., 2011).

Программа предписывает проведение исследований в период биологической весны на пике половодья сразу после освобождения губы ото льда (конец июля). К сожалению, вследствие задержки с финансированием, работы 2014 г. были осуществлены позднее намеченных сроков — с 13 по 21 сентября. На этот период заказчиком — МЭФ «Чистые моря» — было предоставлено рыболовное судно СРТМк «Бриз», принадлежащее мурманской компании ООО «Арктик-транзит».

### МЕТОДИКА

Исследования проводились посредством выполнения комплексных станций, заложенных на семи поперечных разрезах, покрывающих акваторию северной части Обской губы от линии, соединяющей мыс Шуберта на восточной стороне о. Белый с северной оконечностью о. Шокальского, до траверза пос. Сабетта (рис. 1).

Расположение разрезов явилось следствием анализа результатов предшествовавших исследований ФГУП «ВНИРО» в этой части губы. Два северных разреза были расположены мористее обского бара, два южных — в речной части губы до бара, а три средних полностью покрывали акваторию губы над баром.

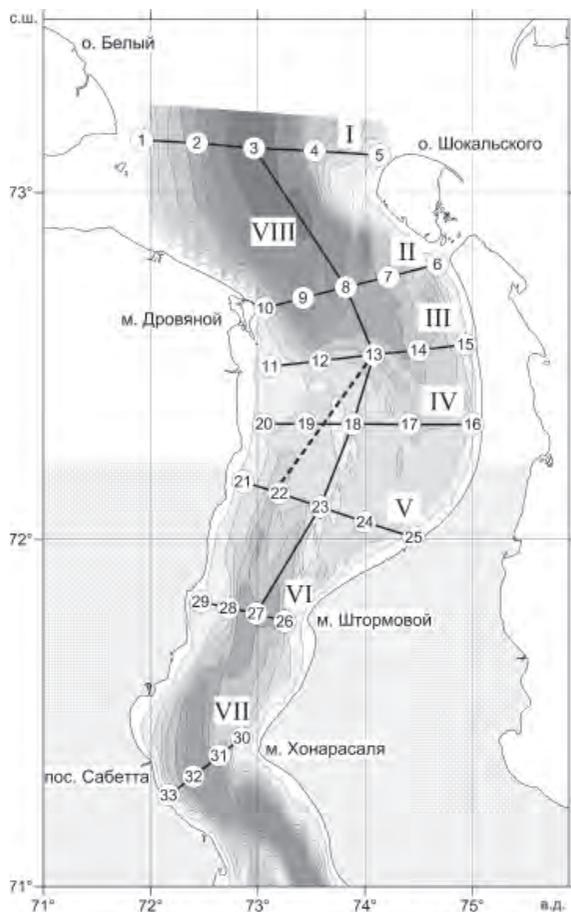


Рис. 1. Батиметрическая карта фронтальной зоны Обской губы и схема расположения разрезов (I–VIII) и станций (1–33). Пунктирная линия — строящийся через бар судоходный канал.

Координаты расположения станций определялись по судовому навигационному оборудованию. Глубины, которые в местах выполнения станций не превышали 30 м, контролировались комплексом судовых эхолотов различного разрешения, а также показаниями зонда. В ходе проведения работ постоянно фиксировалась фактическая метеобстановка, которая в районе исследований отличается высокой динамикой и оказывает существенное влияние на изменчивость параметров среды.

Зондирование водной толщи осуществлялось погружаемым на кабель-тросе многопараметрическим STD-зондом "EXO-II" (YSI, США) с контролем результатов в режиме реального времени.

Расположение станций на каждом разрезе определялось исходя из особенностей рельефа дна и фактической картины наблюдаемого распределения гидрологических и гидрохимических параметров. Отбор проб воды на гидрохимический анализ производился 5-литровым батометром Van Dorn из поверхностного и придонного горизонтов, а также, в зависимости от структуры вод, из горизонтов над и под слоем скачка. Точность глубины отбора определялась по солености пробы.

Всего за время экспедиции было отобрано 87 проб воды на 33 станциях. Для оценки влияния штормов на структуру вод некоторые станции выполнялись дважды: до и после шторма. Таким образом, работы были ориентированы на получение максимально детальной информации об исследуемом объекте.

Обработка проб воды проводилась согласно методикам, принятым при анализе морских и пресных вод (Руководство..., 2003). Гидрохимический анализ включал в себя определения растворенного в воде кислорода, фосфора фосфатов, кремния силикатов, нитритного, нитратного и аммонийного азота, а также общего железа и растворенного органического углерода. Все гидрохимические параметры в пробах воды (кроме органического углерода) определяли непосредственно после их отбора в гидрохимической лаборатории, развернутой на борту судна, что гарантирует высокую репрезентативность полученных данных. Пробы на растворенный органический углерод ( $C_{орг}$ ) отбирали в специальные емкости, подкисляли соляной кислотой до pH 2,0–2,5 и хранили в холодильнике до определения в них  $C_{орг}$  в стационарной лаборатории ФГУП «ВНИРО» на приборе TOC-VCPH (Shimadzu, Япония) методом высокотемпературного сжигания.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Гидрологические исследования

По гидрологическим критериям время работ может быть отнесено к раннеосеннему периоду. Анализ продольного профиля температуры и солености показывает, что форма клина соленых вод визуалью близка к летней конфигурации. При этом его язык постепенно замешивается, а соленость вод в слое над ним уже выше летней, что является признаками постепенной перестройки водной толщи на осенний лад (рис. 2).

Севернее бара наблюдается трехслойная структура вод. Нижняя часть водной толщи в этом районе занята солеными водами Карского моря (до 32 епс), которые упираются в обской бар с северной стороны. Четко выраженный слой скачка также прослеживается только до гребня бара, при этом наблюдается заметное заглубление изогалин и изотерм в мористую сторону. Это косвенно указывает на движение морских вод, медленно натекающих на орографическую преграду (песчаную гряду обского бара). Перемешанные речные воды южнее бара занимают всю губу целиком, а се-

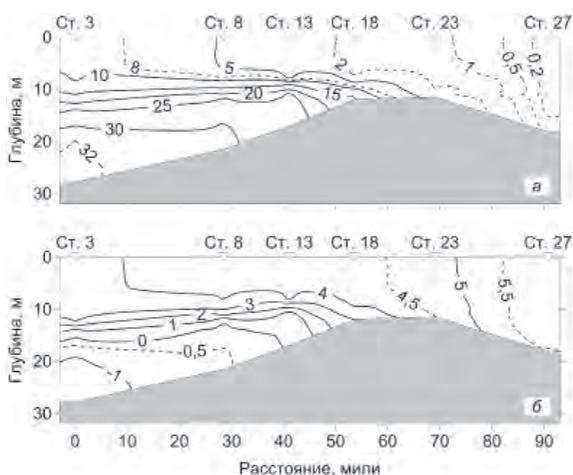


Рис. 2. Продольный профиль (разрез VIII) изменения солености (а), епс, и температуры воды (б), °С, в северной части Обской губы.

вернее, отрываясь от дна по его гребню и двигаясь над галоклином, они постепенно охлаждаются и осолоняются.

Анализ распределения температуры и солености на поверхностном и придонном горизонтах всей области сопряжения пресных и соленых вод (рис. 3, 4) приводит к схожим заключениям. Поверхностный горизонт целиком контролируется постепенно трансформируемым речным стоком, причем стрежень этого потока в северной части губы вытянут в северо-восточном направлении на остров Шокальского (рис. 3а, 4а). Придонный «ландшафт» южнее бара целиком находится во власти речных вод. При этом направление движения речных вод в придонном слое (до бара, когда их еще можно выделить) совпадает с поверхностным (рис. 3б, 4б) и проходит в направлении между двумя морскими ложбинами (рис. 1), по которым отмечается встречный поток

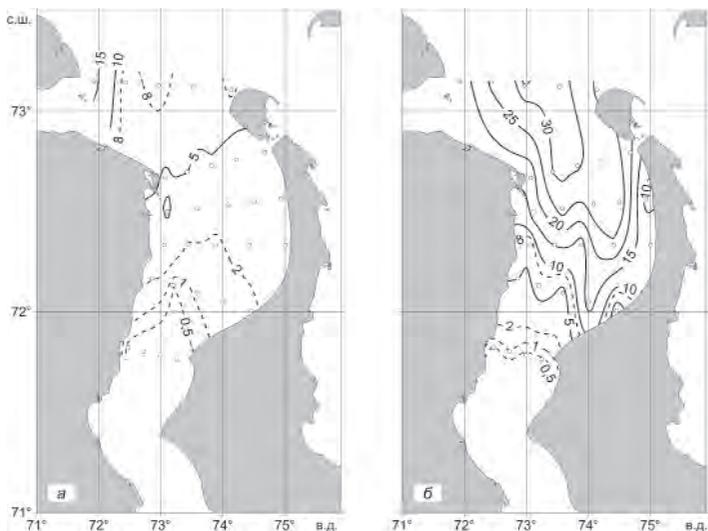


Рис. 3. Карта распределения солености, епс, на поверхностном (а) и придонном (б) горизонтах.

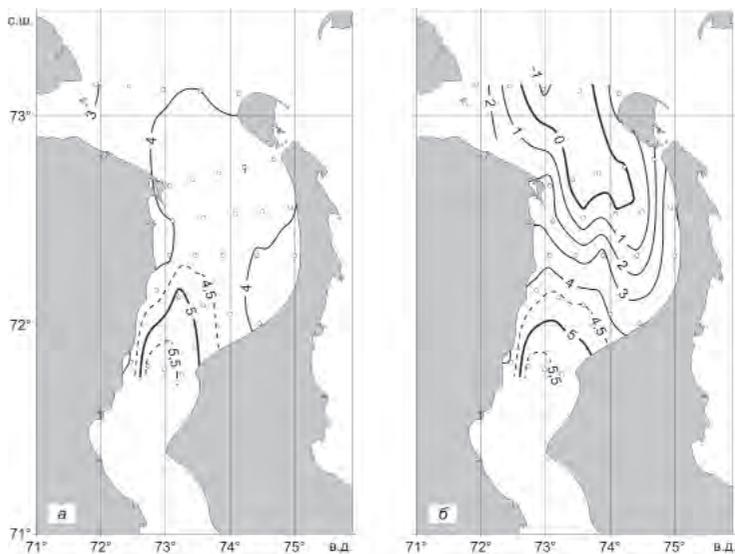


Рис. 4. Карта распределения температуры, °С, на поверхностном (а) и придонном (б) горизонтах.

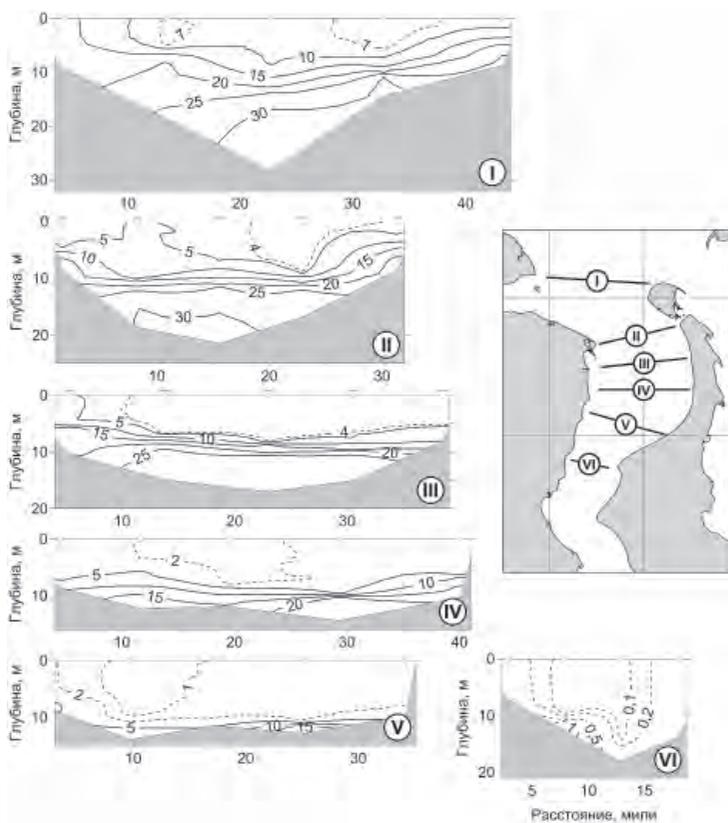


Рис. 5. Распределение солености, eps, вдоль поперечных разрезов I–VI.

тяжелых морских вод. В целом картина распределения и солености и температуры в придонной области полностью повторяет контуры батиметрической карты района.

Важно заметить, что через восточную ложбину в мористой части губы (рис. 1) идет постепенное заполнение морской водой юго-восточной части северного расширения (надбаровой акватории) Обской губы. В осенний период при постоянном перемешивании и существенно уменьшающемся воздействии речного стока в этой части губы постепенно формируется автономная, относительно изолированная водная масса (Лапин, 2011а). Необходимо акцентировать внимание на возможной ревизии этого процесса в будущем в силу происходящих в настоящее время преобразований. Искусственное соединение морской ложбины с русловой строящимся через бар судоходным каналом (рис. 1) приведет к перенаправлению плотностного потока в этот канал и выведению соленых морских вод непосредственно в речную часть Обской губы.

Более наглядно картину сопряжения пресных и соленых вод отражают поперечные профили распределения солености на разрезах I–VI (рис. 5). Четко выделяется движение тяжелых соленых вод через направляющие морских ложбин (разрезы III и IV, отчасти разрез V). Разрезы I и II севернее бара в морской части губы иллюстрируют трехслойную структуру вод. Выраженный галоклин разделяет области, связанные с водами различного генезиса: выше скачка — осолоненной речной воды, ниже — соленой воды Карского моря. По другую (южную, речную) сторону бара на разрезах V и VI наблюдается, соответственно, слегка осолоненная и полностью пресная вода.

Итак, приведенный гидрологический анализ состояния фронтальной зоны на разделе пресных и соленых вод наглядно иллюстрирует процесс взаимодействия и регуляции сопряжения разнородных сред в условиях естественного состояния экосистемы.

### **Гидрохимические исследования**

Изучение гидрохимических параметров водной среды позволяет не только характеризовать химические свойства разнородных водных масс, создаваемых граничащими морскими и пресными водами, но и иллюстрировать процессы их биологически обусловленных трансформаций.

На картах распределения содержащихся в воде минеральных форм основных биогенных элементов (рис. 6–8) мы видим не только четко выделяемые речные и морские воды, границы их взаимодействия и смешения, но также отмечаем последствия сезонного процесса формирования в водах фронтальной зоны области их высоких концентраций. Суть данного процесса заключается в том, что большое количество пресноводного диатомового фитопланктона, активно образующегося в речной части губы в период короткой арктической весны сразу после схода льда, отмирает, попадая с течением в область вод с повышенной соленостью. Далее в районе бара в слое турбулентного потока слегка осолоненных вод над галоклином происходит интенсивное разложение органического вещества детрита, следствием которого является резкое повышение в этой области губы содержания в воде минеральных форм биогенных элементов (Пивоваров, 2000): прежде всего кремния, нитратного и аммонийного азота. Севернее и южнее надбаровой акватории потенциал регенерируемых минеральных биогенных элементов быстро осваивается фитопланктоном, а вот в юго-восточной части этой области, которая находится в некоторой «тени» стокового течения обских вод, повышенное содержание указанных элементов сохраняется длительное время: по крайней мере большую часть осеннего периода (Артамонова и др., 2013).

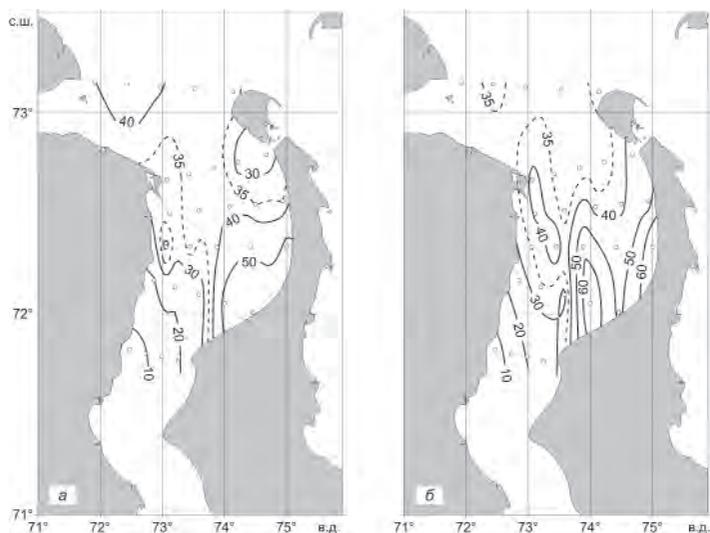


Рис. 6. Карта распределения кремния,  $\mu\text{M}$ , на поверхностном (а) и придонном (б) горизонтах.

Действительно, в слое вод всей надбаровой акватории отмечается повышенное содержание в воде кремния (до  $72 \mu\text{M}$ ), нитратного (до  $11,3 \mu\text{M}$ ) и аммонийного (до  $10,1 \mu\text{M}$ ) азота с максимумом в юго-восточной части области смешения вод. Интересно, что поле повышенного содержания кремния в водах поверхностного слоя как бы раздвигается с юга стреем обских вод, в которых его содержание в этот период близко к минимальному ( $10\text{--}20 \mu\text{M}$ ). В придонных же слоях, в дополнение к упомянутому выше процессу, пятно максимальных значений кремния рассекается и с противоположной стороны — водами Карского моря, движущимися с севера со стороны морских ложбин (рис. 6).

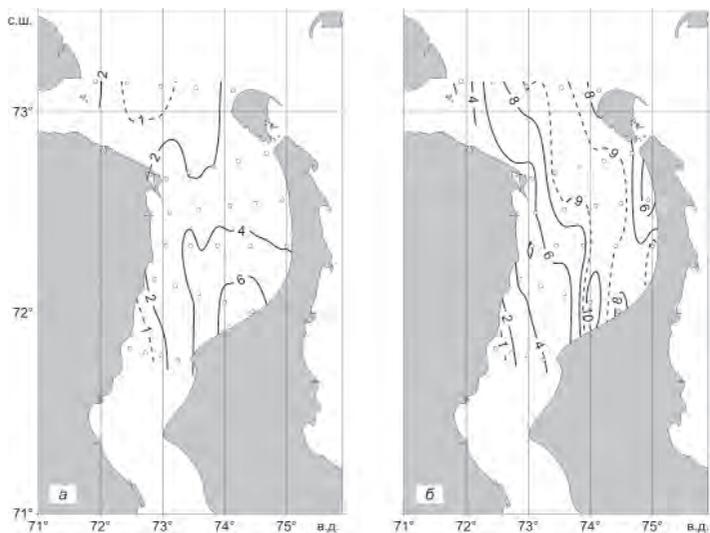


Рис. 7. Карта распределения нитратного азота,  $\mu\text{M}$ , на поверхностном (а) и придонном (б) горизонтах.

Похожая картина в придонных слоях фронтальной зоны наблюдается и в распределении аммонийного азота. Над баром его содержание в воде колеблется от 3 до 10  $\mu\text{M}$ , в то время как в водах севернее и южнее бара не превышает 3  $\mu\text{M}$ . На поверхности аммонийный азот распределен более равномерно и меняется преимущественно в диапазоне от 1 до 2  $\mu\text{M}$ .

Распределение нитратного азота на поверхности аналогично распределению кремния с тем же максимумом в юго-восточной области (до 7,4  $\mu\text{M}$ ). В придонном горизонте отмеченный максимум (до 11,3  $\mu\text{M}$ ) соединяется с областью повышенных концентраций нитратов в морской ложбине (рис. 7).

Повышенное содержание железа и минерального фосфора является визитной карточкой обских вод и всегда отмечается в речной части губы (Артамонова и др., 2013). Там их количество постоянно пополняется из грунтов в период штормового возмущения и взмучивания водной толщи, что при присущем речной части перемешиванию от поверхности до дна приводит к быстрому распределению данных элементов по всей толще вод. При контакте с солеными водами содержание в воде обоих элементов резко снижается, та же ситуация характерна и для испытывающей наименьшую связь со стоковыми водами юго-восточной области северной части губы, где формируется обособленная водная масса (рис. 8). Однако при анализе содержания в обских водах фосфора и железа всегда необходимо иметь в виду, что картина их распределения может серьезно меняться в зависимости от погодных условий в момент проведения исследований. Прямая связь этих элементов не только друг с другом, но и со степенью возмущения водной толщи в момент взятия проб отмечалась во всех наших предшествовавших исследованиях (Лапин, 2011б; Артамонова и др., 2013). Таким образом, повышенные концентрации этих элементов, иногда наблюдаемые в придонных слоях зоны смешения, являются следствием вышеизложенных обстоятельств.

Минимальный уровень содержания растворенного кислорода (до 5 мл/л) отмечается в придонных слоях морских вод и в местах осаждения влекомой речным потоком органики. В водах речной части губы он распределен достаточно однородно

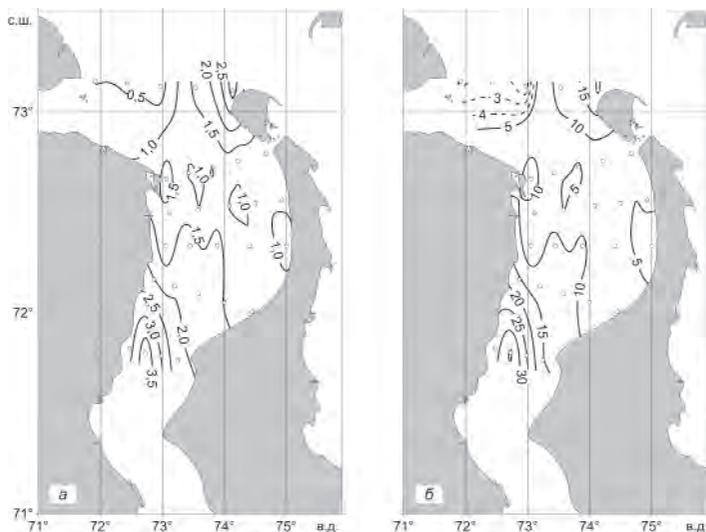


Рис. 8. Карта распределения фосфора фосфатов (а),  $\mu\text{M}$ , и общего железа (б),  $\mu\text{M}$ , на поверхностном горизонте.

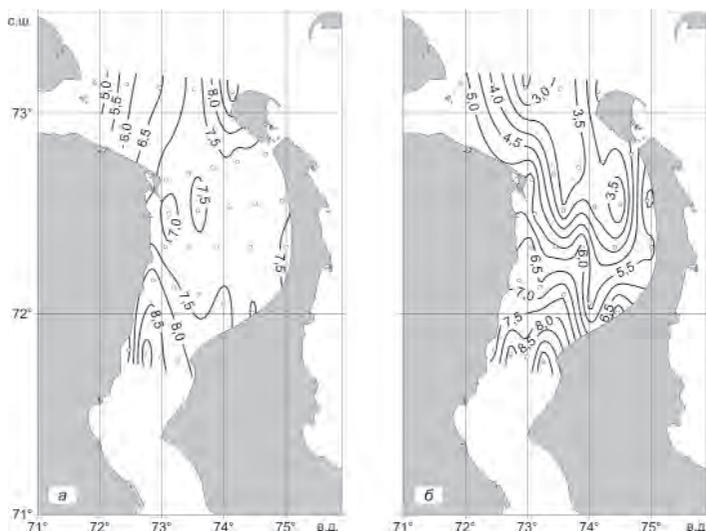


Рис. 9. Карта распределения растворенного органического углерода, мг/л, на поверхностном (а) и придонном (б) горизонтах.

(8–8,5 мг/л), причем имеющиеся различия обусловлены в значительной степени разницей в температуре воды. В целом отмечается весьма характерное для обских вод недосыщение их кислородом (даже летом в период активного фотосинтеза), что связано со спецификой бассейна р. Оби, поставляющего в Обскую губу большое количество различных органических соединений и железа.

Очень важной и информативной характеристикой водной среды является содержание в воде растворенного органического углерода ( $C_{орг}$ ). Этот консервативный и несклонный к резким колебаниям параметр может рассматриваться в качестве некоей обобщенной оценки продукционного потенциала вод, что представляет исключительную важность для изучения фронтальных зон, особенно таких сложных и многоплановых, как зона смешения пресных обских и соленых вод Карского моря. На рис. 9 представлено распределение  $C_{орг}$  на поверхностном и придонном горизонтах. Данный параметр описывает зону смешения во всех деталях. Абсолютные значения  $C_{орг}$  плавно меняются от речных 9 мг/л до прибрежно-морских 3 мг/л. В диапазоне изменений от этих двух граничных значений — вся динамика смешения разнородных вод. Полученный результат позволяет утверждать, что данный параметр чрезвычайно показателен для фронтальных областей.

#### **Периодические изменения в структуре водной толщи вследствие активного ветрового воздействия.**

При выполнении работ в южной части исследованной акватории (разрезы VI и VII, рис.1) был зафиксирован классический для данного водоема нагон, обусловленный сильным северным (меридиональным) ветром со скоростью от 20 до 30 м/с. Возможность получить корректное отображение этого процесса появилась вследствие следующих обстоятельств. В условиях относительно спокойного моря нами были завершены работы на разрезе VI (на траверзе мыса Штормовой) и начаты работы на разрезе VII (между мысом Хонарасаля и пос. Сабетта), расположенном приблизительно в 40 км южнее, которые, однако, не были завершены вследствие набравшего силу

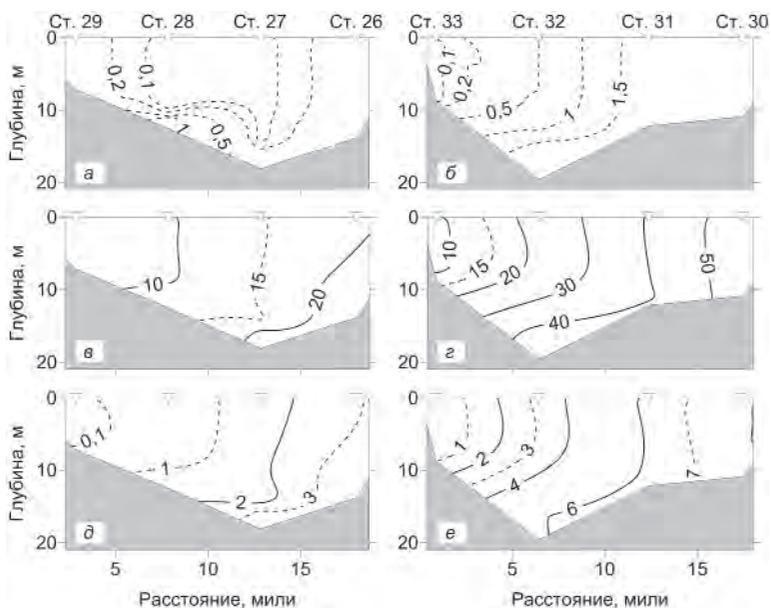


Рис.10. Распределение солености (а, б), епс, кремния (в, г),  $\mu\text{M}$ , и азота нитратов (д, е),  $\mu\text{M}$ , на разрезе VI (а, в, д, соответственно) до нагона и разрезе VII (б, г, е, соответственно) после нагона.

шторма. Результаты съемки показали, что данный участок (разрезы VI и VII, рис. 1) по всем гидрологическим и гидрохимическим параметрам может быть отнесен к речной части губы с пресной и обедненной минеральными биогенными элементами обской водой. По окончании продолжавшегося более суток шторма с ветром северного направления, завершающий южный разрез (VII, рис. 1) съемки был повторен в полном объеме. Полученные на нем данные зафиксировали вдоль восточного берега интрузию солоноватых (до 2 епс) обогащенных кремнием (до  $50 \mu\text{M}$ ) и нитратным азотом (до  $8 \mu\text{M}$ ) вод с характеристиками, соответствующими водам, расположенным севернее мыса Штормовой (в юго-восточной области зоны смешения). В то же время стоковое течение было отклонено к западному берегу, вдоль которого вода оставалась пресной и обедненной минеральными биогенными элементами. Между этими двумя точками в результате смешения наблюдались промежуточные значения указанных величин (рис. 10).

Таким образом, полученные данные позволили нам показать механизм обогащения биогенными элементами пресноводной части губы, прилегающей к фронтальной зоне с юга, и проиллюстрировать генезис формирования пояса повышенной продуктивности в северной области пресноводной части губы. Впервые этот процесс был описан специалистами ФГУП «ВНИРО» по результатам исследований, проведенных в Обской губе в 2010 г. сразу после ее освобождения ото льда (Лапин, 2011б, 2014).

Влияние кратковременных погодных изменений на структуру вод изучалось нами и в самой северной морской части губы (станция 3 разрез I, рис. 1). Работы на ней проводились как в штормовых условиях (ветер северной четверти 15–17 м/с, порывы до 20 м/с и более), так и спустя 20 часов при существенно ослабшем ветре. Результаты, полученные по данным зондирования, позволяют сделать вывод, что изменения вертикальной структуры в этом случае весьма незначительны и трех-

слоистый профиль водной толщи (осолоненный речной поток, мощный слой скачка и подстилающий слой тяжелых карских вод) выглядит достаточно устойчивым.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные ФГУП «ВНИРО» исследования в северной части Обской губы в области смешения пресных обских с солеными карскими водами являются третьими, после экспедиций 2010 г., которые были целенаправленно посвящены изучению фронтальной зоны Обской губы — ключевой части ее сложной экосистемы. Если первые две экспедиции осветили состояние водной среды применительно к биологической весне (сразу после схода льда) и к поздней осени (перед его установлением), то третья описала промежуточную ситуацию, которую можно отнести к раннеосеннему периоду. Кроме того, исследования осени 2014 г. являются последними в череде подобных работ, проведенных на водоеме в его естественном состоянии. Полученные результаты, соответственно, являются фоновыми для последующего сравнения с изменениями в экосистеме Обской губы, к которым неизбежно приведут начавшиеся здесь масштабные процессы преобразования природы.

Анализ полученных результатов показал следующее:

– в указанный период во фронтальной зоне губы речной сток еще играет важную роль и контролирует всю верхнюю часть профиля над галоклином, причем клин соленых вод по конфигурации близок к своему летнему состоянию;

– положение самого фронта в 2014 г. отмечается несколько севернее, чем в 2010 г., иначе говоря, клин соленых вод упирается в обской бар с его северной стороны;

– в водах над обским баром четко фиксируется повышенное содержание минеральных форм биогенных элементов, при этом воды речной части губы в исследуемый период ими очень бедны. Область максимальной концентрации регенерированных минеральных биогенных элементов отчетливо отмечается в юго-восточной части северного расширения Обской губы, в своеобразной «стоковой тени» — области минимального воздействия речного стока.

Фиксация мощного меридионального (северного) нагона наглядно и убедительно показала механизм обогащения минеральными биогенными элементами северной области пресноводной части губы и проиллюстрировала процесс создания в этом месте зоны повышенной продуктивности. Таким образом, результаты исследований 2014 г. в северной части Обской губы позволили подтвердить разработанную ранее специалистами ФГУП «ВНИРО» концепцию формирования высокопродуктивной области в данном водоеме, в том числе вследствие процессов регенерации биогенных элементов во фронтальной зоне.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Артамонова К.В., Лалин С.А., Лукьянова О.Н и др.* Особенности гидрохимического режима Обской губы в период открытой воды // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 3. С. 357–366.

*Лалин С.А.* Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // *Океанология*. 2011а. Т. 51. № 6. С. 984–993.

*Лалин С.А.* Гидрохимическая структура вод Обской губы и оценка ее биопродуктивности // *Вопросы промысловой океанологии*. 2011б. Вып. 8. № 1. С. 84–100.

*Лалин С.А., Мазо Е.Л., Маккавеев П.Н.* Комплексные исследования Обской губы (июль–октябрь 2010 г.) // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 758–762.

*Латин С.А.* Специфика формирования зон повышенной продуктивности в Обском эстуарии // Труды ВНИРО. 2014. Вып. 152. С. 146–154.

*Пивоваров С.В.* Химическая океанография Арктических морей России. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 86 с.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Ред. В.В. Сапожников. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

*S.A. LAPIN, K.V. ARTAMONOVA, I. A. GANGNUS, K.K. KIVVA*

## **HYDROLOGICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE FRONTAL ZONE IN THE OBSKAYA GUBA IN EARLY AUTUMN**

Hydrological and chemical conditions of the frontal zone of the Obskaya Guba during early fall were analyzed based on the detailed survey data. Hydrological structure was described and chemical features revealed the conclusions on transformations of the water masses. The survey also illustrated the influence of the periodic synoptic events on the dynamics and chemical composition of the frontal zone.

*Keywords:* Gulf of Ob, frontal zone, hydrology, nutrients, dissolved organic carbon.