

УДК 556.541.4(282.256.1)

ОБЪЕМ ВОД ОБСКОЙ ГУБЫ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

© 2014 г. П. А. Стунжас, П. Н. Маккавеев

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

e-mail: pastunzhas@mail.ru, makkaveev55@mail.ru

Поступила в редакцию 11.06.2013 г.

В статье дается новый анализ результатов 2-х гидрохимических съемок 2010 г. в Обской губе, проведенных силами ВНИРО и ИО РАН. Показана уникальная среди всех рек мира особенность комплекса: р. Обь – Обская губа. Объем вод губы больше среднего стока р. Оби за год, и немногим меньше стока всех рек в нее впадающих. Вследствие этого для полного обновления вод в губе требуется значительное время. Внутригодовое распределение стока таково, что даже во время летних съемок в губе наблюдаются как паводковые воды, так и воды зимнего стока Оби, имеющие очень разные гидрохимические характеристики. Это обстоятельство, а не биологическая трансформация вод, как предполагалось ранее, является причиной большей части изменчивости состава вод в губе. Летние воды Оби поступают к морской границе губы только к следующей весне и с весенним паводком выносятся в Карское море, формируя там линзы распресненных вод. Осенние рейсы ИО РАН находили, что воды в линзах очень похожи на осенние воды в губе, хотя это были воды Оби разных лет, что не учитывалось ранее.

DOI: 10.7868/S0030157414050128

ВВЕДЕНИЕ

Обская губа один из самых протяженных в мире речной эстуарий имеет большое народно-хозяйственное значение – транспортное, промысловое (вылов ценных пород рыб), энергетическое (наличие углеводородных месторождений). В связи с этим, особое внимание привлекают процессы преобразования в губе биогенных элементов, выносимых реками Обь, Таз и Пур. Считается, что гидрохимическая обстановка в губе характеризуется большой изменчивостью [2, 9, 15], которая значительно превосходит, например, изменчивость в Енисейском заливе, хотя расположены они практически в одинаковых природных условиях. Наиболее ярким показателем гидрохимической изменчивости в губе и прилегающих районах Карского моря можно считать содержание кремния (Si), который является как биогенным элементом, так и трассером распространения речных вод. Так, согласно данным ААНИИ за 1976–1991 гг. в летних наблюдениях в этом районе Si в пресных (речных) водах составлял 2–115 мкМ, а в морских водах Si (если экстраполировать его содержание на нулевую соленость) менялся в пределах 40–130 мкМ [15]. По традиционному мнению, основная причина такой изменчивости интенсивные продукционно-деструктивные процессы в Обской губе: на первом этапе происходит почти полное извлечение кремния из воды (до 2–4 мкМ), а на втором этапе – поставка кремния в воду из-за ги-

бели и быстрой деструкции пресноводного фитопланктона при смешении речных и морских вод. При этом содержание Si может повышаться до 100–130 мкМ [15].

В то же время работы ИО РАН в Карском море в 1993 и 2007 гг., которые проходили в один сезон – август–сентябрь, показали простую и стабильную гидрохимическую обстановку, когда в распресненных линзах на значительной части моря хорошо соблюдались линейные соотношения между щелочностью и соленостью (Alk–S) и кремнием и соленостью (Si–S). Характерно, что эти же зависимости прослеживались и в самой губе (хотя часть точек в них и выпадала в сторону уменьшения Alk и Si). Такой консерватизм характера изменчивости Alk и Si позволил выдвинуть предположение, что в море при благоприятных обстоятельствах могут существовать изолированные линзы, образованные при участии материкового стока (преимущественно обской и енисейской водами) [13, 21]. При этом подразумевалось, что основной состав речных вод Оби и Енисея в течение года меняется мало и соблюдается стабильность конечного члена смешения речных и морских вод. Действительно, протяженность этих рек более 3 тыс. км, и при средней скорости течения 0.5 м/с время добегаания вод от истоков до устья составит примерно 3 месяца. Этого кажется достаточным, чтобы в нижнем течении рек происходило сильное сглаживание сезонных колеба-

ний свойств, известное для малых рек более скромных размеров [1]. Такой вывод вызвал критику, например [15], где высказывается мнение, что такого рода идентификация вод в Карском море невозможна по причине упоминавшейся изменчивости: ее хаотичности и большого размаха. Отдельные экспедиции в Обскую губу, в которых также наблюдалась сильная изменчивость биогенных элементов [4, 7, 11, 22] не смогли дать цельную картину процессов в Обской губе.

Две детальные гидрохимические съемки были проведены в Обской губе в 2010 г., когда силами ВНИРО и ИО РАН на озерном толкаче ОТА-777 были выполнены работы на 117 станциях (30 поперечных разрезах), охватывавших центральную и северную части губы, причем наблюдения проводились не только на стрежне, но и вблизи берегов [8, 10]. Найденная в губе пространственная и временная изменчивость концентрации биогенов оказалась даже сильнее, чем отмечалась ранее в [15]. Так, в северной части губы были найдены необычно высокие концентрации биогенных элементов, особенно нитратов (до 10 мкМ) и кремния (выше 200 мкМ), происхождение которых традиционно было приписано гибели пресноводного диатомового планктона и быстрой и его деградации [8, 9].

По нашему мнению, для объяснения изменчивости содержания кремния и других биогенов в Обской губе, которой, как отмечалось выше, нет в Енисейском заливе, надо учесть буферную роль объема вод Обской губы. Простая его оценка: длина 750 км, ширина 60 км, глубина 10 м дает 450 км³, что превышает годовой сток Оби, хотя и меньше суммарного стока всех рек в губу. Очевидно, что без учета задержки вод Оби и Таза в губе описание изменчивости биогенных элементов будет однобоким.

Цель статьи – по материалам съемок 2010 г. выявить в губе наличие разновременных вод, оценить их вклад в гидрохимическую изменчивость и найти возможную связь состава морских распределенных линз с составом вод в губе.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Методика отбора проб воды и определения гидрохимических параметров приведена в [8, 9]. Определение биогенных элементов и кислорода проводилось по стандартным методикам, принятым во ВНИРО [18]. Величина щелочности, которая ниже широко используется как консервативный параметр, измерялась методом прямого титрования в модификации С.В. Бруевича с визуальным определением точки конца титрования [20].

В связи с высоким содержанием взвешенного вещества в водах Обской губы определения производились с поправкой на мутность и цветность

вод. По методикам [18] учет мутности проб проводился сравнением оптической плотности пробы с той же пробой, в которую не добавлялся один реактив, в результате чего она не “расцветивалась”. По методикам [20], используется другой прием – фильтрация проб и колориметрирование против фильтрата. Вопрос о применимости различных подходов к учету мутности и цветности проб нам представляется пока еще дискуссионным и требует дополнительных исследований. В данной работе этот вопрос не обсуждается.

Для измерения температуры и электропроводности использовался зонд FSI. Расчет солёности делался по стандартной “морской” формуле, которая вряд ли подходит для речной воды, имеющей совсем другой ионный состав, поэтому абсолютные значения солёности могут иметь существенные погрешности, но годятся как относительные величины для сравнения. Для пресных вод вместо термина солёность обычно используется термин “минерализация” и сумма солей выражается в мг/л. В данной работе мы будем использовать термин минерализация, когда она менее 1000 мг/л и солёность в том случае, если она более 1000 мг/л, но будем выражать ее в г/л, а не в промилле (или ед. psu).

АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

1-я съемка 29 июля–17 августа 2010 г. Как следует из оценки объема вод губы, наличие в ней на спаде весеннего половодья разновременных вод (зимнего стока и паводка) не вызывает сомнения. Но возможность разделения их по свойствам, которое до нас не проводилось, поначалу не была очевидной. При интерпретации результатов съемок 2010 г. в [9] и других работах было предложено разбить акваторию губы на южную чисто “речную” часть и северную – “морскую”, где обнаруживаются смешанные воды, а границу между ними было предложено провести по изогалине 0.5 г/л. По нашему мнению, деление вод следует делать не по одному, а по двум консервативным параметрам – минерализации (М) и щелочности (Alk), точнее соотношению между ними (см. рис. 1а для вод с минерализацией <1 г/л и рис. 1б для вод с более высокой минерализацией).

Ключевым является рис. 1а. Если рассматривать все данные вместе, то рисунок будет просто показывать тенденцию увеличения щелочности с ростом минерализации и неоднородность вод по этим параметрам. Но мы разделили точки на две группы: паводковые (талые) воды, они показаны квадратами, и зимние (грунтовые) – кресты. Границей между ними можно было бы взять величину $M = 100$ мг/л, но более важным критерием является именно соотношение между М и Alk. Действительно воды рек п-ва Ямал [3, 17] и других северных рек, имеют на 50–80% снеговое питание (талые воды) и относятся к гидрокарбонатно-

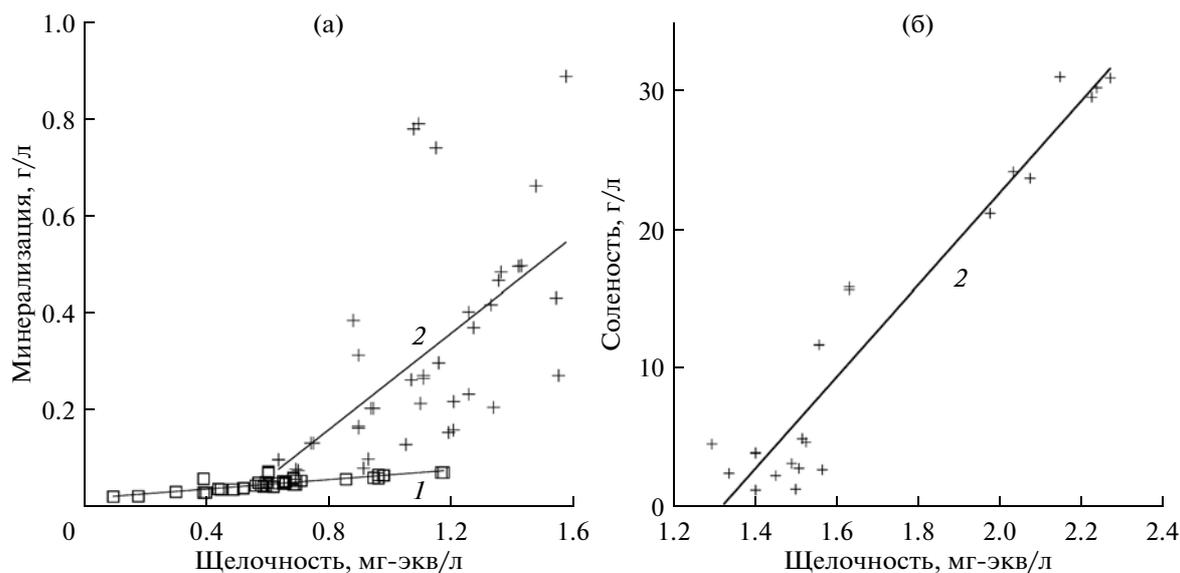


Рис. 1. Связь минерализации со щелочностью. (а) – для речной части губы. (б) – для зоны смешения морских и пресных вод.

Квадраты – станции с минерализацией ниже 100 мг/л (см. текст), кресты – станции с минерализацией 0.1–1 г/л. Их средние корреляционные соотношения показаны линиями (1) и (2), соответственно.

му типу речных вод, что отмечено еще в [1], с преобладанием катионов Na. Их минерализация находится в пределах 30–180 мг/л, а содержание гидрокарбонат иона (щелочность) – в пределах 0.3–1.8 мг-экв/л, что хорошо совпадает с нашими параметрами для талых вод с учетом погрешностей расчета минерализации. Наклон линии 1 на рис. 1а можно проверить так. Гидрокарбонатные воды с низкой минерализацией можно упрощенно представить как раствор NaHCO_3 (или $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). Тогда должно выполняться примерное соотношение:

$$M \text{ (мг/л)} \approx 82 * \text{Alk} \text{ (мг-экв/л)}.$$

Для двух крайних точек линии 1 значения Alk 0.098 и 1.178 мг-экв/л. Тогда расчетные величины минерализации будут 8 и 99 мг/л, а измеренные, соответственно: 17 и 67 мг/л, отличие всего лишь в 2 раза. Однако отклонения от формулы для талых вод, особенно для малых рек, могут вызываться не только различиями ионного состава, но и наличием в воде органики (в первую очередь гуминовых веществ), которая воздействует на щелочность двояко: сильные органические кислоты понижают щелочность (в реках средней полосы часто до нуля), а слабые кислоты увеличивают щелочность [23]. Тем не менее, в нашем случае наличие на акватории губы в период первой съемки талых вод устанавливается однозначно.

Другие воды с минерализацией <1000 мг/л на рис. 1а мы относим к зимним. Их выделение в губе в общем случае может вызывать некоторые трудности. Как видно из рис. 1а, мы разделили их и по величине минерализации, и по соотноше-

нию M–Alk. В отличие от талых зимние воды имеют грунтовое питание, вследствие чего они обычно имеют более высокую минерализацию и другой ионный состав, в котором доля гидрокарбонатная мала. Сезонное изменение параметров воды проявляется и в других больших сибирских реках, например в Лене [5]. Особенно большие изменения имеют место там перед паводком и в паводок (средние величины за 15 лет): M = 325 и 49 мг/л, Alk = 1.7 и 0.55 мг-экв/л, соответственно. В последнем случае также выполнялось вышеприведенное соотношение между ними, причем здесь минерализация определялась по основному ионному составу. Таким образом, хотя на соотношение щелочности и минерализации речных, а особенно талых вод влияет содержание в них органики, тем не менее, оно является важным и удобным параметром идентификации этих вод.

Считая, что соотношение M–Alk дает нам возможность разделения паводковых и зимних вод, посмотрим их положение на акватории губы. Оно показано на рис. 2, причем как и ожидалось, паводковые воды занимают более южное положение, чем зимние, и что и те, и другие продвигаются на север на стрежне быстрее, чем у берегов. Положение талых вод на акватории губы (рис. 2) дает возможность выделить некоторые их особенности. Известно [17], что воды рек Таз и Пур менее минерализованы, чем воды реки Обь, и в нашем случае наиболее пресная часть талых вод располагалась на середине Тазовской губы (ст. 9) и ниже по течению у правого берега (станции 19 и 19.1). То, что станции 30 и 34 не вошли в состав талых

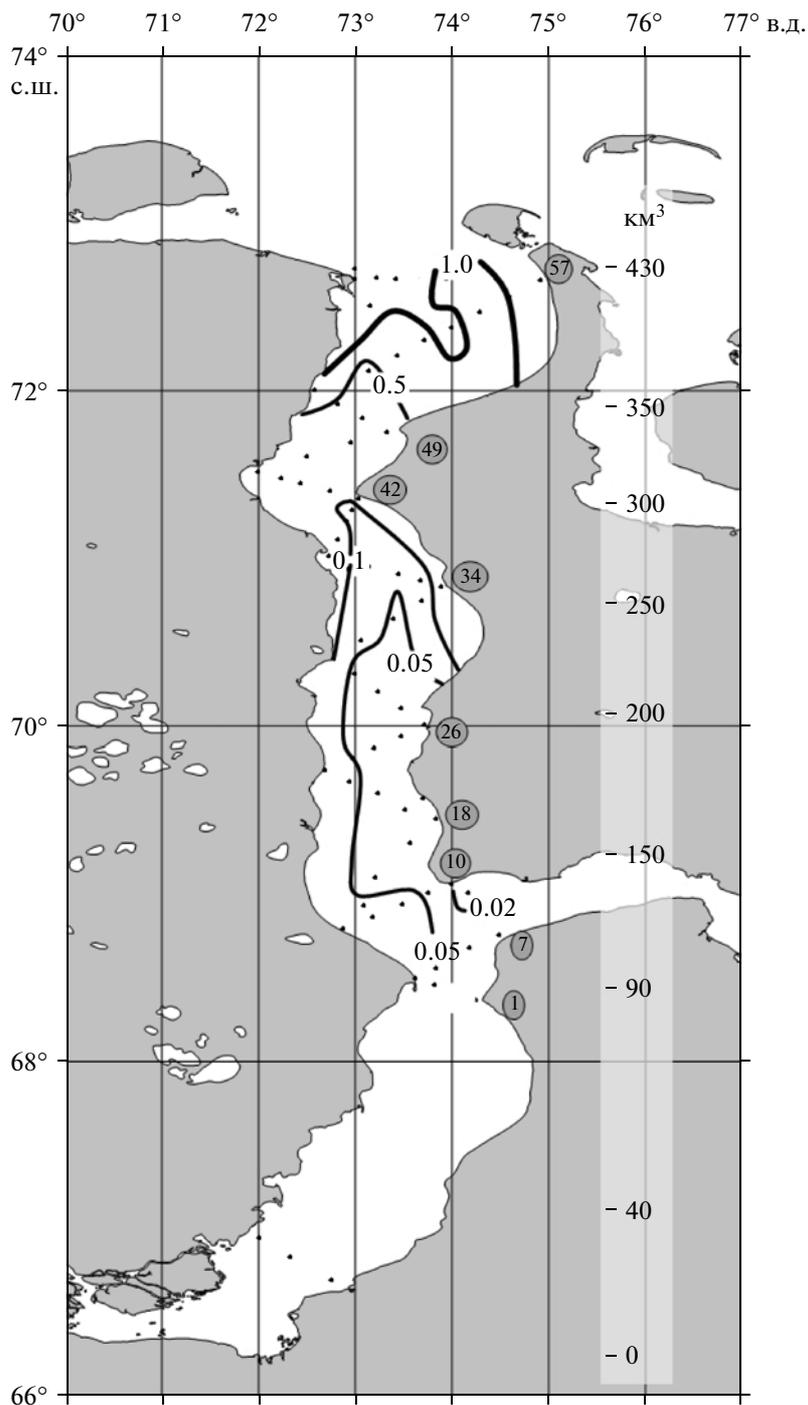


Рис. 2. Положение в Обской губе паводковых (минерализация ниже 0.1 г/л) и зимних (минерализация 0.1–1 г/л) вод, выделенных по соотношению минерализация-щелочность (1-я съемка). Градация изолиний: 0.02, 0.05, 0.1, 0.5, 1 и 5 г/л. Цифры на правом берегу губы – номера прибрежных станций. Справа также дана шкала объема вод губы, нарастающего с юга (см. текст). Масштаб по оси X увеличен в 2 раза для наглядности.

вод, также является естественным, так как продвижение вод на стрежне быстрее, чем у берегов.

Севернее талых вод в губе, естественно, находятся зимние. К ним относятся воды на упомянутых уже станциях 30, 34, а также на станциях 37–52 и на верхних горизонтах станций 53–58,

кроме станций 56, 57, т.е. все станции, на которых минерализация вод была ниже 900 мг/л. Значения Alk для них, как видно из рис. 1а меняются в пределах от 0.6 до 1.6 мг-экв/л, и имеют тенденцию увеличиваться с ростом минерализации, хотя тесной связи между ними нет. Это может быть из-за

Таблица 1. Годовое поступление вод в Обскую губу

Источники вод, поступающих в губу	Сток, км ³ /год
Р. Обь (створ г. Салехард)	398
Р. Обь (на выходе в губу)	408
Р. Надым	18.5
Р. Пур	32.9
Р. Таз	45.8
Малые реки Тазовской губы	15.4
Малые реки в южной части О. губы	8.4
Малые реки в северной части О. губы	11.0
Итого	540

того, что зимнее питание рек осуществляется грунтовыми водами, в которых минерализация повышена за счет появления других ионов: сульфатов, хлора и магния [1], поэтому простая связь $M-Alk$ в них нарушается. Легко показать, что воды с рис. 1а не могут быть смесью речных и морских вод, так как при смешении морских вод (с соленостью 30 г/л и Alk 2.4 мг-экв/л) и речных с минерализацией около 600 мг/л и Alk от 0.6 до 1.6 мг-экв/л, не может образоваться вода с минерализацией 900 мг/л и Alk 1.6 мг-экв/л. Величины минерализации морской и речной воды требуют, чтобы примесь морской воды к речной воде была не более 1%. Таким образом, все воды с минерализацией менее 900 мг/л являются чисто речными зимними водами (в основном, р. Обь).

Подробная съемка 2010 г. дает возможность оценить объем разных вод в губе и сравнить их с известными данными по стоку рек в губу. Литературные данные по объему Обской губы существенно различаются: по [19], площадь губы 44.5 тыс. км², а объем вод — 445 км³, по [14], площадь губы 40.8 тыс. км², объем — около 400 км³, т.е. в обоих случаях это очень приблизительная оценка, основанная, видимо, на том, что средняя глубина губы 10 м. При этом надо учитывать, что объем вод в губе меняется по сезонам, а также при сгонах и нагонах воды, сильно сказывающихся на уровне воды. Для нас представляет интерес объем пресных вод в губе в пределах района работ в 2010 г. Его мы оценили, пользуясь координатами и глубинами, измеренными на разрезах от берега до

берега во время обеих съемок. Для общности результата был сделан расчет и объема губы в пределах от устья Оби до Тазовской губы, где измерения в 2010 г. не проводились. Его мы оценили на основе площади этой части губы в предположении, что ее средняя глубина равна 5 м [3, 14]. Суммарный объем губы получился равным примерно 430 км³, а нарастающий с юга объем губы показан на рис. 2 справа. Погрешность такой оценки мы оцениваем ± 20 км³, но относительная погрешность объема разных вод должна быть в 2–3 раза меньше.

Средние данные по стоку Оби и других рек за 1930–2004 гг. приведены в [3] (см. табл. 1). Как следует из табл. 1 сток Оби у Салехарда составляет 398 км³ (максимальный в 1979 г. был 574, а минимальный в 1967 г. — 268 км³), причем коэффициент изменчивости годового стока невелик и составляет 0.15. Данные по внутригодовому распределению стока Оби и рек Таз и Пур взяты из [3], а для реки Щучья — из [6] (см. табл. 2). Для расчета внутригодового распределения стока в губу в км³ мы объединили данные в 3 группы: сток Оби, сток средних рек (Надым, Таз и Пур) и сток малых рек, в качестве образца последних были взяты данные по р. Щучьей [6] (табл. 2).

Для определения объема пресных вод в губе необходимо оценить объем вошедших туда морских вод, который в первую съемку был сравнительно мал. В предположении, что пресные воды в зоне смешения имели толщину 5 м, объем морских вод составил примерно 62 км³. В расчете объема речных вод мы не учитывали их примесь к морским, так как считали, что эти воды смешались с морскими раньше по времени (хотя это, может быть, не совсем верно). Тогда объем всех пресных вод составил 368 км³. Из них в исследованной нами части губы находилось примерно 62 км³ зимних и 176 км³ — паводковых. Учитывая, что последние наблюдения на севере губы проводились в середине августа, с помощью табл. 2 можно найти, в каком месяце самые северные пресные воды поступили в губу. Расчет показывает, что это произошло в конце января, так как с февраля по середину августа в губу должно было поступить 360 км³ пресных вод.

Таблица 2. Распределение речного стока по месяцам года в % и в км³, по [3, 17]

Реки	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сумма
Обь	3.1	2.6	2.3	2.4	10.1	21.7	19.6	14.5	9.0	6.8	4.3	3.6	100%
Пур	2.8	2.4	2.1	2.1	6.3	35.1	16.2	9.1	8.5	7.0	4.7	3.7	100%
Таз	2.4	2.0	1.9	1.8	6.9	34.3	21.1	8.2	7.4	6.5	4.3	3.2	100%
Щучья	0	0	0	0	5.1	38.3	23.0	10.7	14.1	6.2	1.5	1.1	100%
Обь	12.6	10.6	9.4	9.8	41.2	88.5	80.0	59.3	36.7	27.7	17.5	14.7	408 км ³
Средние	2.5	2.1	1.9	1.9	6.4	33.7	18.2	8.4	7.7	6.6	4.4	3.4	97.2 км ³
Малые	0	0	0	0	1.8	13.3	8.0	3.7	4.9	2.2	0.5	0.4	34.8 км ³
Сумма	15.1	12.7	11.3	11.7	49.4	135.5	106.2	71.4	49.3	36.5	22.4	18.5	540 км ³

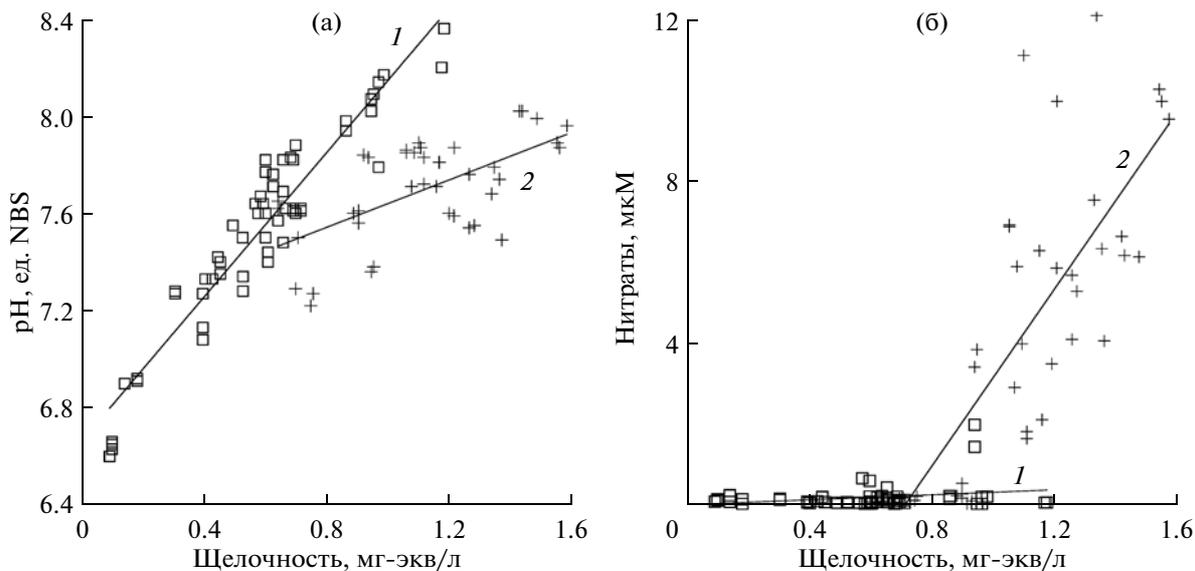


Рис. 3. Соотношение: (а) – рН–щелочность, (б) – нитратный азот–щелочность. Обозначения см. рис. 1.

Из них 85 км³ поступили за февраль–май, т.е. до вскрытия Оби, они должны были иметь свойства зимних вод, а еще 190 км³ (в пределах 1-й съемки) – за время с конца мая по примерно середину июля, они уже имели свойства талых снеговых вод. Учитывая приближенность наших расчетов, соответствие свойств вод времени их поступления кажется вполне приемлемым.

Определив положение и объем разновременных вод в губе, рассмотрим, какие между ними имеются гидрохимические различия. Из рис. 3а, на котором приведено соотношение рН–Алк, видно, что в талых водах рН менялось более чем на 1 (т.е. концентрация ионов водорода менялась более чем в 10 раз), и хорошо коррелировалась со щелочностью. Это вызвано тем, что рН этих вод в значительной степени определяется растворенной органикой, которая могла оттитровывать часть щелочности. Наиболее кислые воды наблюдались в устье Тазовской губы и у правого берега ниже ее, что согласуется с литературными данными [17].

На рис. 3б показано соотношение щелочность – нитратный азот (NO₃). Видно, что в талых водах нитраты практически отсутствуют, а в зимних водах их содержание довольно велико. Здесь только на одной ст. 32 недалеко от границы между талыми и зимними водами была найдена концентрация примерно 2 мкМ нитратов. Это соответствует данным, полученным в различное время в зимних экспедициях, например [12]. Таким образом, из соотношений рН–Алк и NO₃–Алк видно, что по этим двум параметрам паводковые и зимние воды различаются очень сильно. Но такое четкое разделение этих вод имеется не по всем другим гидрохимическим параметрам (см. рис. 4). Так по ам-

онию оно есть, хотя менее выраженное, чем по нитратному азоту (рис. 4а), из общей закономерности выпадают две станции 20 и 21, а по фосфатам и кислороду (в % насыщения) между зимними и паводковыми водами практически различия нет (см. рис. 4б и 4в).

Теперь рассмотрим с позиций наличия в губе разновременных вод изменчивость кремния, которая, как отмечалось выше, традиционно приписывалась биологической трансформации. Опять же будем использовать соотношение Si–Алк для двух типов вод. Из рис. 5а видно, что в талых водах концентрация Si не велика (составляет 16–43 мкМ) и имеет тенденцию к небольшому понижению с ростом Алк. Возможно, это вызвано фотосинтетической деятельностью, так как одновременно увеличивалось насыщение этих вод кислородом (рис. 4в). Более интересным является то, что в зимних водах концентрация Si в целом гораздо больше и имеет тенденцию к увеличению с ростом Алк. Эта ситуация не удивительна, так как известно, что содержание Si в грунтовых водах выше, чем в поверхностных [1, 17]. Кроме того, измерения кремния в Оби в районе Салехарда 20 декабря 2001 г. дали средние величины 120 ± 10 мкМ, хотя в это время питание реки было еще не чисто грунтовое за счет добегающих вод из среднего течения реки [12]. Упомянувшиеся выше наблюдения в Лене [5] также показали большую разницу средних значений Si = 117 и 53 мкМ перед паводком и в паводок, соответственно. Таким образом, высокие концентрации кремния в северной части губы в 1-ю съемку находят естественное объяснение – это зимние воды, а не результат быстрой гибели и деструкции пресноводного фитопланктона, как утверждалось в [9, 15]. Наличие быстрой деструк-

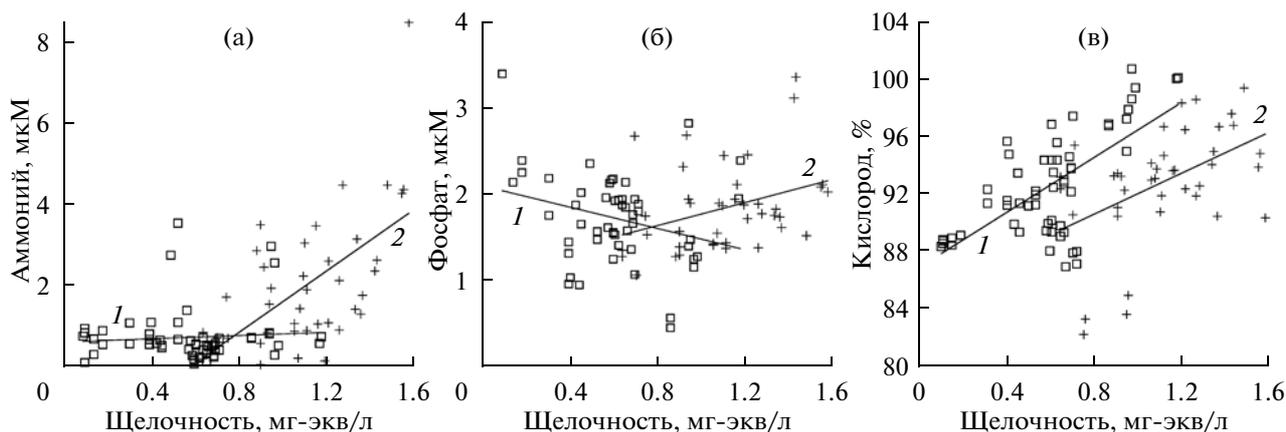


Рис. 4. Соотношение аммонийный азот–щелочность (а); фосфаты–щелочность (б); насыщение воды кислородом (%) – щелочность (в). Обозначения см. рис. 1.

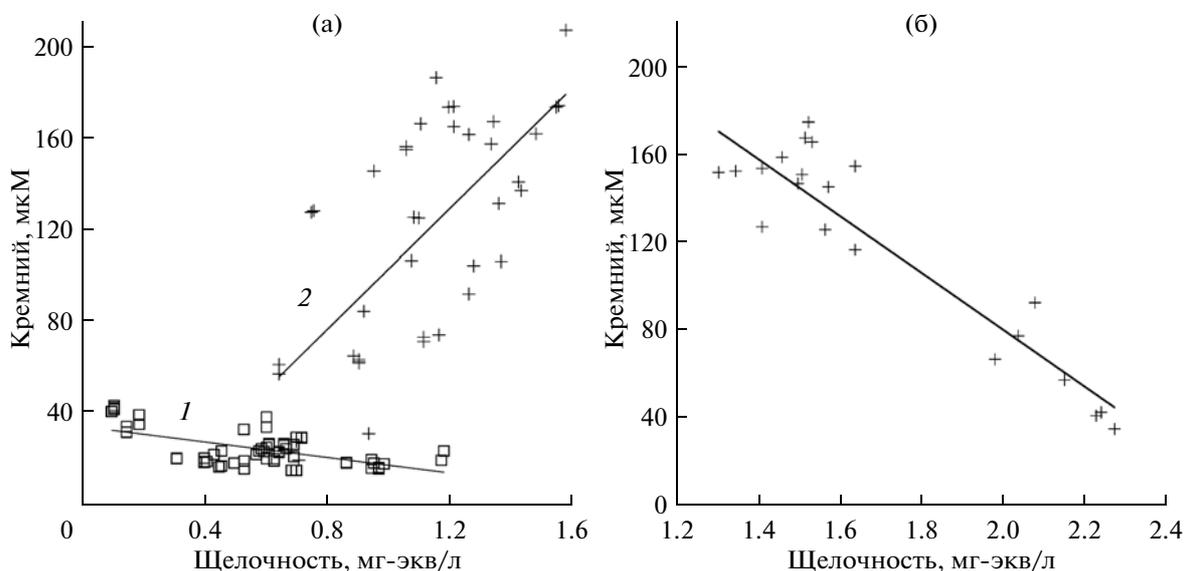


Рис. 5. Связь содержания растворенного кремния со щелочностью для речной части губы (а) и для области влияния морских вод (б). Обозначения см. рис. 1.

ции, по нашему мнению, противоречат и наблюдения больших концентраций пресноводных диатомей в осадках в северной части Обской губы и в самом Карском море вплоть до 73° – 73.5° с.ш. [16].

Рекордно высокое значение $Si = 207$ мкМ на ст. 54, горизонт 0.5 м, хотелось бы выделить особо. На этой, и только на этой станции наблюдалось много экстремальных значений: величина щелочности $Alk = 1.58$ мг-экв/л больше, чем можно было бы ожидать для минерализации 886 мг/л, экстремально высокое значение $NH_4 = 8.5$ мкМ, кроме того, повышенное значение рН, но пониженное значение $O_2\%$. Таким образом, вода ст. 54 (0.5 м) не является типичной для Обской губы, а максимальными значениями Si для зимних вод пока можно считать 180–185 мкМ. Такой же вы-

вод (о максимальных концентрациях Si) делает автор [9], хотя остальные высокие величины Si он приписывает разложению диатомей.

Перейдем к рассмотрению речных вод с примесью морских (см. рис. 16). По соотношению Alk – минерализация южную границу морских вод установить трудно ввиду разброса величин Alk (выше она была взята как минерализация 1000 мг/л). Причем на горизонтах, где соленость менялась в пределах 1–2 г/л, примесь морских вод с соленостью 30 г/л была очень мала 1–4%, что следует из рис. 16. Но из того же рисунка видно, что точки с малой соленостью не лежат точно на линии смешения соленость – щелочность, а имеют большой разброс, что, по нашему мнению, согласуется с тем, что и в зимних водах минерализация могла значительно меняться. Из рис. 16 видно,

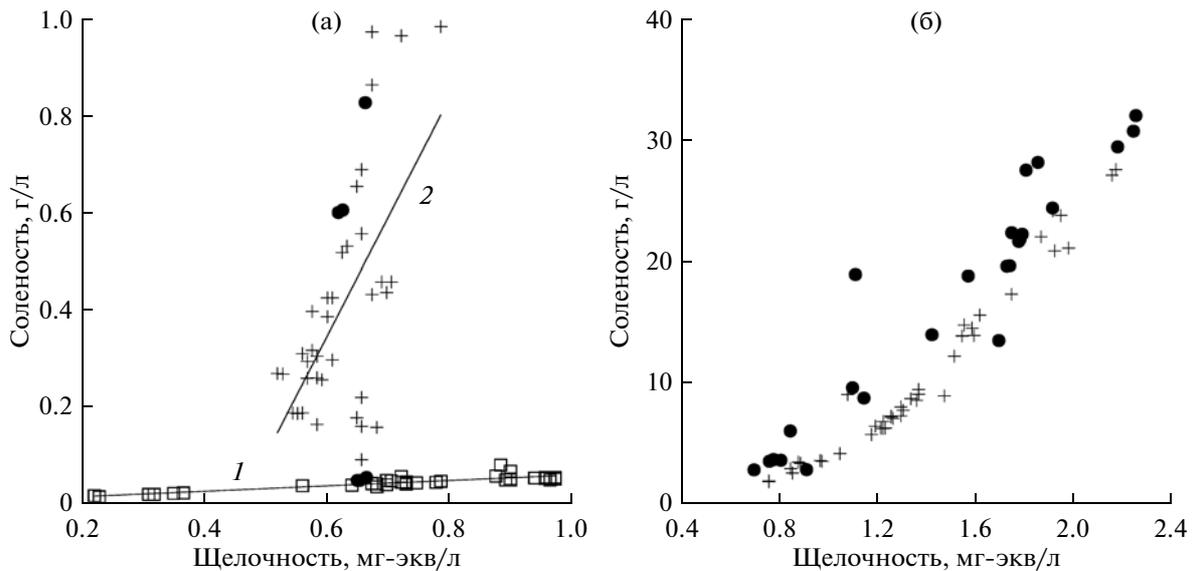


Рис. 6. 2-я съемка. Соотношение соленость—щелочность для вод с минерализацией ниже 1000 мг/л (а) и для зоны смешения речных и морских вод (б). Обозначения см. рис. 1. Приведены также данные 2007 г. (черные кружки).

что линия 2 (линия регрессии соленость – Alk) показывает минимальное значение Alk примерно 1.35 мг-экв/л, хотя разброс точек довольно велик. Это косвенно указывает на возможность того, что в предыдущей порции зимней воды Alk была выше, чем во время 1-й съемки. А разброс точек соотношения соленость – Alk согласуется с рис. 1а, где имеется большой разброс этих величин для зимних вод.

В зоне смешанных вод Si уменьшается за счет разбавления, так что по графику Si–Alk граница речных и смешанных вод определяется довольно точно (см. рис. 5б) и совпадает с той, что была сделана по минерализации 1000 мг/л. На этом рисунке линия регрессии показывает, что средняя величина Si при Alk = 1.2 мг-экв/л составляла примерно 180 мкМ и совпадает с тем, что отмечалось выше. Поведение других биогенов в зоне смешения в общем показывает понижение концентраций с ростом солености (а также понижение O₂%), но разброс точек очень большой. Анализ этих зависимостей выходит за рамки статьи.

Таким образом, анализ соотношения минерализация – Alk позволил выделить на акватории губы во время 1-й съемки разные типы вод: два чисто речных – паводковые и зимние, а также смесь зимних вод с морскими.

2-я съемка 18 сентября–07 октября 2010 г. Теперь рассмотрим данные осеннего рейса. По логике изложения, которая использовалась выше, теперь из губы должны были бы вытисниться зимние воды в объеме примерно 85 км³ (см. табл. 2), и в ней должны были бы присутствовать только паводковые и летние воды Оби и Таза. Это должны были

бы быть биологически трансформированные, сравнительно однородные по Alk, M и Si воды, со средними значениями Alk = 0.8–1.0 мг-экв/л, M = 400–500 мг/л, Si = 40–60 мкМ, правда, тогда было бы трудно объяснить результаты ИО РАН 1993 и 2007 гг.

Однако картина, которую мы будем анализировать тем же способом, что и выше на рис. 1, оказалась совершенно иной. На рис. 6а показано соотношение M–Alk для пресных вод, т.е. с минерализацией ниже 1000 мг/л. Видно, что на акватории губы опять четко выделяются воды с низкой (ниже 100 мг/л) и со средней минерализацией (100–1000 мг/л). Причем в первых соотношение M–Alk осталось в них примерно таким же, как и на рис. 1а, а во вторых Alk имеет слабо меняющееся значение, примерно 0.6–0.7 мг-экв/л, более низкое, чем на рис. 1а. На рис. 6б показано соотношение M–Alk для области смешения пресных и морских вод. Видно, для вод с соленостью ниже 5 г/л экстраполированное значение Alk при низкой солености также равно примерно 0.6, а для более соленых оно несколько выше, примерно 0.9 мг-экв/л. Это говорит о том, что средняя Alk 0.6 мг-экв/л сформировалась незадолго до 2-й съемки, а ранее она была выше. Таким образом, на акватории губы есть снова три типа вод: один – смесь речных и морских и два речной минерализации (менее 1000 мг/л), причем последние разделяются даже более четко, чем в 1-ю съемку.

Рассмотрим сначала гидрохимические свойства этих вод. На рис. 7 показано соотношение величин Si, pH, NO₃ с Alk в низко минерализованных водах. Видно, что эти три параметра син-

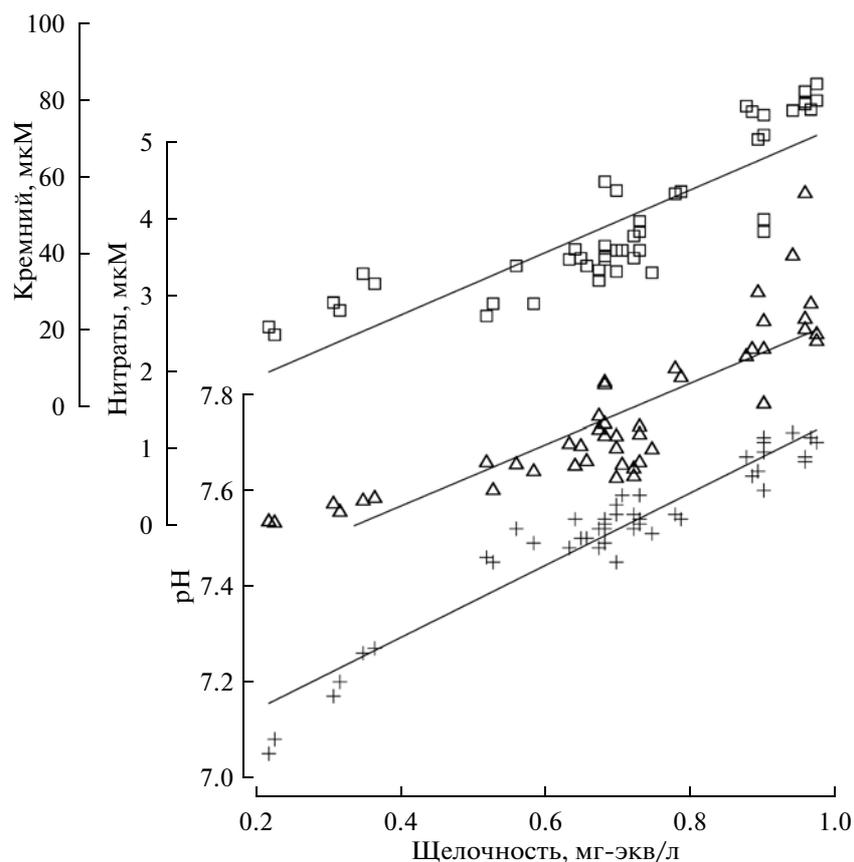


Рис. 7. Соотношение величин Si, pH, NO₃ с Alk в низко минерализованных водах (2-я съемка).

хронно увеличиваются ростом Alk, что можно интерпретировать как неоднородность летних вод, в которых содержание биогенных элементов растет одновременно с ростом Alk. Причем 6 левых точек на всех этих зависимостях относятся к 3-м станциям на выходе из Тазовской губы, показывая минимальные наблюдавшиеся значения этих параметров. А воды на остальных станциях — это смесь этих вод с обскими водами.

Так как из рис. 6а можно было сделать вывод, что во время 2-й съемки щелочность на большей части губы имеет примерно постоянную величину и является малоинформативным параметром, представим распределение гидрохимических параметров в средне минерализованных водах в виде соотношения биогены — минерализация. На рис. 8а показано соотношение pH—M, на рис. 8б — NO₃—M, а на рис. 9 Si—M. Видно, что низко и средне минерализованные воды в таком представлении также четко разделяются, но изменчивость первых гораздо больше, чем вторых. Во время 1-й съемки в основном было наоборот, т.е. воды средней минерализации были менее однородны, чем воды с низкой. О происхождении низко минерализованных вод говорилось выше — это летние воды Оби и Тазовской губы, еще не

успевшие перемешаться и трансформироваться. Наиболее трудный вопрос — как образовались воды со средней минерализацией? Проще всего предположить, как это было сделано в [2, 8], что это такие же воды, как наблюдались и в первую съемку, т.е. смесь чисто речных и морских вод, а изменение в них концентрации биогенных элементов произошло за счет биотрансформации. Однако выше было показано, что в 1-ю съемку воды с минерализацией от 100 до 1000 мг/л — это были речные зимние воды без примеси морских вод. Поэтому такое общее объяснение не проходит.

Для поиска объяснения рассмотрим положение этих вод в губе, показанное на рис. 10. Получилось, что и северная, и южная границы вод средней минерализации заметно сдвинулась на юг, как бы подпираемые солеными водами, которых стало в северной части губы больше по сравнению с 1-й съемкой (рис. 2). Объемы всех трех типов вод и их средние гидрохимические характеристики показаны в табл. 3. Получается, что объем сильно и средне минерализованных вод увеличился, а вод с низкой минерализацией (ниже 100 мг/л) — уменьшился. Такой результат соответствует ожиданиям, учитывая возможность поступления в губу морских вод, при уменьшении

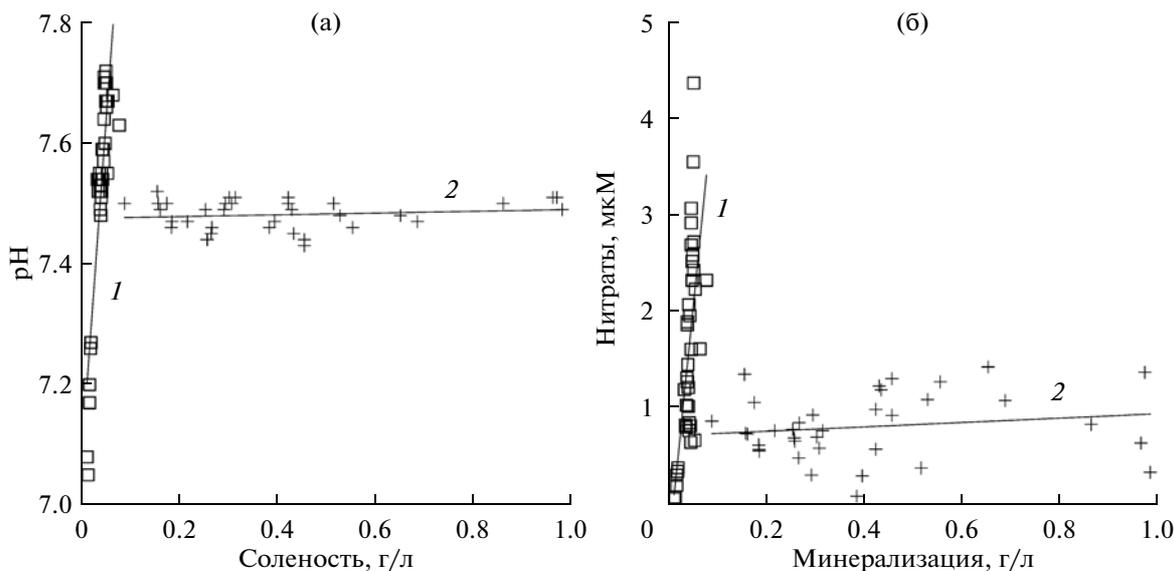


Рис. 8. Соотношение рН–минерализация (а), нитратный азот–минерализация (б) для речных вод (2-я съемка). Обозначения см. рис. 6.

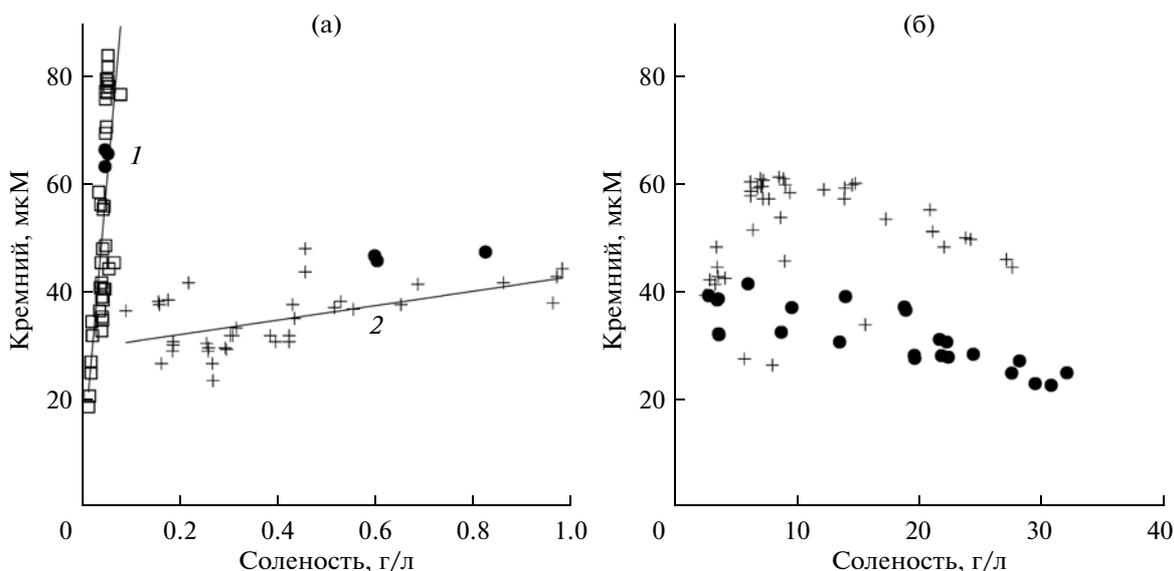


Рис. 9. Соотношение кремний–солёность для речных вод (а) и для зоны смешения речных и морских вод (б) (2-я съемка). Обозначения см. рис. 6.

объема выноса речных вод, но противоречит ожидавшейся смене вод за счет их простого вытеснения из губы. Кроме того, почему средне минерализованные воды имеют почти постоянные величины всех параметров, кроме самой минерализации?

По нашему мнению, прежде всего, надо учесть погодный фактор. В течение месяца до 2-й съемки ветры над губой имели северное и северо-восточное направление, и способствовали нагону морских вод, что является типичным явлением для губы [6], в то время как в период 1-й съемки типичными являются ветра южного и юго-запад-

ного направлений, которые вызывают сгоны воды и тем самым интенсифицируют течения. Кроме того, нагон меняет систему течений и способствует горизонтальному перемешиванию вод.

Это сказалось на особенностях распределения параметров в 1- и 2-ю съемок. В 1-ю съемку была ярко выражена струйность потока, воды четко сохраняли свои свойства после выхода из русла р. Обь в Обскую губу. Во 2-ю съемку воды с низкой минерализацией – это в основном летние воды Оби с примесью вод Таза (об этом говорит их объем). Из табл. 3 видно, что усредненные пара-

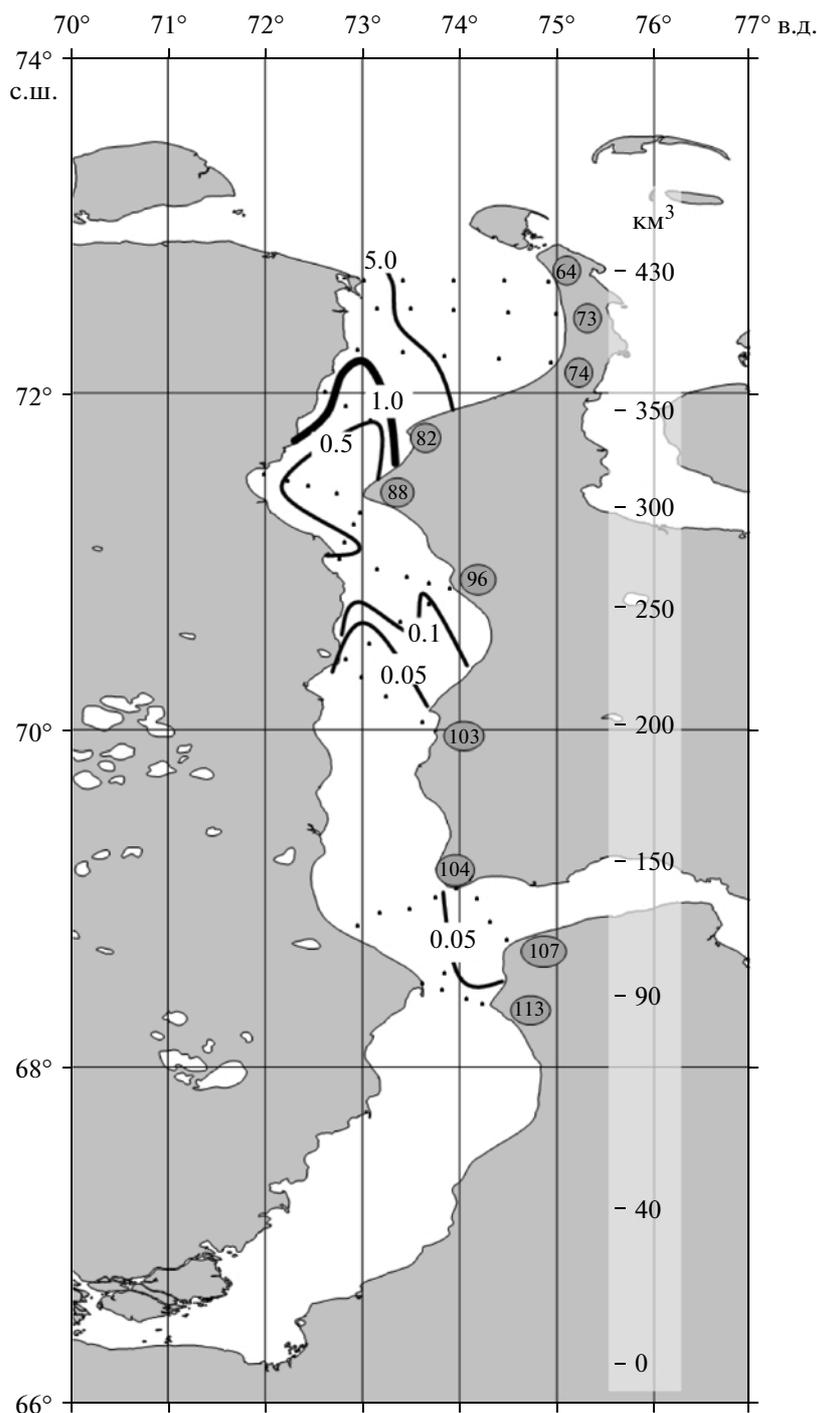


Рис. 10. Положение в Обской губе вод разной минерализации (2-я съемка). Обозначения см. на рис. 2.

метры средне минерализованных вод (2-я съемка) могли бы образоваться из таковых низко минерализованных вод (1-я съемка) при условии добавки в них примерно 1% соленых вод ($S = 30$ г/л, $Alk = 2.4$ мг-экв/л). Поступление морских вод с такими параметрами в область низко минерализованных вод представить трудно, т.к. эти воды пространственно сильно разьединены. Более ве-

роятным выглядят другие механизмы осолонения: за счет выноса более соленых вод с мелководья на стрежень, ветровое образование струй в поверхностном слое, перенос солей по воздуху за счет разбрызгивания, поступление солей из нижнего более соленого слоя за счет турбулентного перемешивания. Последний способ самый естественный и распространенный, так как он на-

Таблица 3. Объемы разных типов вод, их минерализация, средние гидрохимические характеристики и средне-квадратичные отклонения (1- и 2-я съемка)

Типы вод	Объем, км ³	Минерализация, мг/л	pH, ед. pH	Alk, мг-экв/л	O ₂ , %	Si, мкМ	NO ₃ , мкМ
1-я съемка							
Низко минерализованные	176	47 ± 19	7.53 ± 0.36	0.60 ± 0.24	89.7 ± 14	30 ± 16	0.2 ± 0.4
Средне минерализованные	100	350 ± 210	7.71 ± 0.21	1.17 ± 0.22	92.9 ± 4	133 ± 43	5.0 ± 3.4
Сильно минерализованные	62	12.3 ± 11г/л	7.63 ± 0.14	1.69 ± 0.33	84.4 ± 9.4	120 ± 46	4.7 ± 1.9
2-я съемка							
Низко минерализованные	130	42 ± 14	7.53 ± 0.18	0.72 ± 0.22	87.3 ± 0.6	53 ± 20	1.51 ± 0.96
Средне минерализованные	118	400 ± 240	7.42 ± 0.02	0.63 ± 0.06	86.1 ± 1	35 ± 6	0.84 ± 0.35
Сильно минерализованные	90	10.3 ± 7 г/л	7.56 ± 0.06	1.36 ± 0.39	88.2 ± 5.8	50 ± 10	2.1 ± 0.7

блюдался на большом числе северных станций в обе съемки. Однако для него характерен вертикальный градиент солености, в то время как в средне минерализованных водах (2-я съемка) такого градиента практически не было. Поэтому здесь более вероятны первые способы осолонения, хотя в этом вопросе еще много неясного.

Тем не менее, можно отметить, что все эти способы интенсифицируются ветрами, и могли начаться примерно на месяц ранее 2-й съемки. В этом случае к талым водам начинают примешиваться воды с более высокой соленостью, соответственно и доля их будет больше, чем чисто морских вод. Однако сделать даже примерный расчет свойств так получающейся воды пока затруднительно. Причем осложняющим обстоятельством может быть еще и неконсервативность щелочности за счет окисления органики. Два процесса по широте действуют в противоположные стороны: Alk за счет окисления при продвижении на север падает, а за счет большей примеси морских вод увеличивается. В будущем для определения процессов формирования вод кроме биогенных элементов были бы очень важны измерения ионов основного солевого состава, которые являются более консервативными параметрами, чем щелочность.

Вопрос, поставленный во введении, каким образом в рейсах ИО РАН могли наблюдаться простые линейные соотношения Si–M и Alk–M, кажется теперь довольно простым. Как показано выше, в северной части губы идут процессы, усредняющие концентрации биогенов и приводящие к средним величинам Alk примерно 0.6–0.7 мг-экв/л, что видно из рис. 6а и очень хорошо согласуется с результатами рейсов ИО РАН [13]. Так образуемые воды (Alk ~ 0.6–0.7 мг-экв/л, Si ~ 60 мкМ) будут приближаться к морской границе губы и за время до начала следующего паводка – июня, ее достигнут (сток по табл. 2 примерно 160 км³). Эти воды с паводком вынесутся в море и могут стать основой распресненной линзы с обской водой. К осени того года (когда ИО РАН обычно имеет возможность провести рейс) очень

разнородные зимние и паводковые воды тоже будут вытеснены из губы, и там, особенно при редко расположенных станциях, будет наблюдаться сглаженная усредненная картина, как во 2-й съемке. А воды в губе и в распресненной линзе будут похожи. Поэтому выводы о возможности выделения в Карском море вод Обской губы, сделанные ранее [13, 21], нам кажутся справедливыми, хотя там была упущена важная деталь – это были воды губы разных лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие в губе столь сильно отличающихся по составу вод как зимние и паводковые надо учитывать при рассмотрении экологической обстановки в губе, что до последнего времени, насколько нам известно, упускалось из виду.

Смена разных вод в губе создает впечатление, что изменение концентрации биогенных элементов можно объяснить активными биологическими процессами создания и деструкции C_{орг} [9, 15]. Цитируем [9]: “Первичная продукция в “речной” части губы, величины которой оцениваются в 2–3 гС/м² сут, создается исключительно на предвегетационном запасе биогенов, причем лимитирующим элементом является минеральный азот. По величинам первичной продукции вся Обская губа может быть отнесена к числу наиболее продуктивных прибрежных акваторий Мирового океана”. Но, учитывая показанное выше присутствие в губе вод различного возраста, нам представляется, что оценки величины первичной продукции по динамике биогенных элементов делать некорректно, и поэтому они существенно завышены.

Главной причиной изменения содержания биогенных элементов, как по пространству губы, так и во времени (между 1- и 2-й съемками), нам представляется смена вод различного генезиса, а не потребление биогенных элементов фитопланктоном.

Новые исследования Обской губы, включающие работы в июле–августе, или даже в более

ранние месяцы со льда могли бы значительно прояснить смену вод в губе и их продуктивность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А.* Общая гидрохимия. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 208 с.
2. *Артамонова К.В., Лапин С.А., Лукьянова О.Н. и др.* Особенности гидрохимического режима Обской губы в период открытой воды // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 3. С. 357–366.
3. *Бабич Д.Б., Большианов Д.Ю., Зайцев А.А. и др.* Региональные особенности формирования эстуарно-дельтовых систем Арктического побережья Сибири / Эстуарно-дельтовые системы России и Китая / Под ред. Коротаева В.Н. и др. М.: ГЕОС, 2007. С. 112–240.
4. *Ганнус И.А., Лукьянова О.Н., Аржанова Н.В.* Пространственно-временная изменчивость гидрохимического режима Обской губы // Международная научная конференция “Морские исследования полярных областей Земли в Международном полярном году 2007/08”. СПб.: ГУ “ААНИИ”, 2010. С. 55.
5. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река–море. М.: Изд-во Матушкина И.И., 2012. 452 с.
6. *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.
7. *Кузнецов В.В., Ефремкин И.М., Аржанова Н.В. и др.* Современное состояние экосистемы Обской губы и ее рыбохозяйственное значение // *Вопросы промысловой океанологии*. М.: Изд-во ВНИРО, 2008. Вып. 5. № 2. С. 129–154.
8. *Лапин С.А.* Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 6. С. 984–993.
9. *Лапин С.А.* Пространственно-временная изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик Обской губы как основа оценки ее биопродуктивности. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. географ. н. М.: Изд-во ВНИРО, 2012. 25 с.
10. *Лапин С.А., Мазо Е.Л., Маккавеев П.Н.* Комплексные исследования Обской губы (июль–октябрь 2010 г.) // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 758–762.
11. *Лисицин А.П., Виноградов М.Е.* Международная высокоширотная экспедиция в Карское море (49-й рейс научно-исследовательского судна “Дмитрий Менделеев”) // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 643–651.
12. *Маккавеев П.Н., Гордеев В.В., Стунжас П.А. и др.* Гидрохимический сток р. Оби в зимний период (по материалам работ в декабре 2001 г.) / Эколого-биогеохимические исследования в бассейне Оби / Под ред. Зуева В.В. и др. Томск, 2002. С. 8–20.
13. *Маккавеев П.Н., Стунжас П.А., Хлебопашев П.В.* О выделении вод Оби и Енисея в распресненных линзах Карского моря в 1993 и 2007 гг. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 740–747.
14. *Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: Прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
15. *Пивоваров С.В.* Химическая океанография Арктических морей России. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 86 с.
16. *Полякова Е.И., Кассенс Х.* Диатомеи сибирских морей Арктики / Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики / Под ред. Кассенс Х. М.: МГУ, 2009. С. 427–447.
17. *Природа Ямала* / Под ред. Добринского Л.Н. Екатеринбург: УИФ Наука, 1995. 408 с.
18. *Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана* / Ред. Сапожников В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
19. *Самойлов И.В.* Устья рек. М.: Географгиз, 1952. 526 с.
20. *Современные методы гидрохимических исследований океана* / Ред. Бордовский О.К., Иваненков В.Н. М.: ИО АН СССР, 1992. 200 с.
21. *Стунжас П.А.* Разделение вод Енисея и Оби в Карском море по щелочности и кремнию // *Океанология*. 1995. Т. 35. № 2. С. 215–219.
22. *Флинт М.В.* 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 667–682.
23. *Тищенко П.Я., Вальман К., Василевская Н.А. и др.* Вклад органического вещества в щелочной резерв природных вод // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 2. С. 211–219.

Volume of Ob Bay Water as a Factor Forming its Hydrochemical Heterogeneity

P. A. Stunzhas, P. N. Makkaveev

The article presents a new analysis of two hydro-chemical surveys in 2010, conducted by VNIRO and IO RAS. It is shown unique among the all world's rivers feature set: river Ob–Ob Bay. The volume of water of the Ob Bay greater than the average Ob's runoff for the year, and slightly less than runoff of all rivers flowing into it. Therefore, a full renewal of the bay waters requires considerable time. Inner-year flow distribution is such that even during the summer in Bay observed as floodwaters and winter runoff Ob's water having very different hydrochemical characteristics. So this fact but not biological transformation water as previously thought, is the cause of most of the variability of water in the bay. Running Ob's water comes to maritime boundary Bay only next spring and with spring floods are submitted to the Kara Sea, forming a lens desalinated waters there. Previous autumn surveys of IO RAS in the Ob Bay found that the water in the lenses are very similar to autumn water in the bay, although it was water Ob different years, which is not taken into account formerly.