

УДК 551.465

## ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОД ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2015 г. П. Н. Маккавеев<sup>1</sup>, З. Г. Мельникова<sup>1</sup>, А. А. Полухин<sup>1</sup>, С. В. Степанова<sup>1</sup>,  
П. В. Хлебопашев<sup>1</sup>, А. Л. Чульцова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва

<sup>2</sup>Северо-Западное отделение Института океанологии им. П.П. Шишова РАН, Архангельск  
e-mail: makkaveev55@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2013 г.

Гидрохимические исследования Карского моря входили в программу работ комплексной экспедиции 59-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”. Основные гидрохимические работы проводились на разрезах по Енисейскому заливу, вдоль восточного и западного отрогов желоба Святой Анны и через Новоземельский желоб. Кроме того, практически все время работала проточная система, в которой на ходу определялась величина рН поверхностной воды и отбирались пробы для гидрохимических анализов. Был проведен широкий комплекс гидрохимических анализов, включавший определение основных биогенных элементов (кремния, различных форм азота и фосфора), содержания растворенного кислорода и величин общей щелочности и рН. В статье показана гидрохимическая обстановка юго-западной части Карского моря, приведены основные результаты и проведено сравнение с результатами предыдущих комплексных экспедиций: 49-й рейс НИС “Дмитрий Менделеев” в 1993 г. и 54-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2007 г.

DOI: 10.7868/S0030157415040115

### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения за гидрохимическим режимом Карского моря начались в 30-х годах XX века, наибольшее количество данных по гидрохимии было получено с 1964 по 1980 гг. в экспедициях ААНИИ [12]. Но можно считать, что наиболее полными как по набору определявшихся параметров, так и по общему комплексу работ были экспедиции ИО РАН, проведенные в конце XX и начале нашего века [3, 14]. Гидрохимические работы в 59-м рейсе продолжили исследования гидрохимической структуры Карского моря, проведенные в комплексных экспедициях ИО РАН в 1993 и 2007 гг.

Особенности гидрохимического режима Карского моря определяются многими причинами, главным образом тем, что море широко открыто для вод центрального Арктического бассейна и относительно изолировано от проникновения с запада теплых атлантических вод. Влияние материкового стока в Карском море, пожалуй, наибольшее по сравнению с другими арктическими морями. На море приходится 41% всего стока с суши в Северный Ледовитый океан или 56% стока рек сибирского сектора Арктики [2, 8].

Гидрохимическая структура вод Карского моря отличается большой изменчивостью как по акватории моря, так и во времени. Это связано с непостоянством и контрастностью гидрометеорологических условий и с тем, что в формировании вод

моря принимают участие воды различного происхождения, главным образом, воды центрального Арктического бассейна и обильный материковый сток. Относительный вклад того или иного источника значительно меняется как во времени, так и по акватории моря [6].

Гидрохимические работы в 2011 г. по спектру определений были значительно шире, чем в 1993 г. По сравнению с работами 2007 г. более широко использовались определения по ходу судна в проточной ячейке (330 часов), что позволило более полно охарактеризовать поверхностные воды моря. Также значительное внимание было уделено работам с иловыми и придонными водами.

Основными задачами гидрохимических исследований были: обеспечение биологических исследований характеристиками абиотической составляющей экосистем (растворенный кислород, основные биогенные элементы, неорганические соединения углерода); исследование гидрохимической структуры вод (включая придонные и иловые воды); исследования распределения элементов “трассеров” в водах (кремний, неорганический углерод) для изучения распространения вод речного стока рек Обь и Енисей по акватории моря и их роли в формировании поверхностных вод.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб проводился 5-ти литровыми пластиковыми батометрами Нискина комплекса “Розетта” в соответствии с ГОСТ 51592-2000 “Общие требования к отбору проб”. Сразу же после отбора проводилась фиксация проб на растворенный кислород и аммонийный азот. Пробы на определение рН, биогенных элементов (силикаты, фосфаты, формы азота) и щелочности отбирались в пластиковую посуду 0.5 л без консервации. При работе в водах с большим количеством взвешенного вещества (вода в губах и заливах, в зоне смешения речных и морских вод) пробы для определения биогенных элементов предварительно фильтровались через фильтры 0.45 мкм [16]. В пробах с заметной окраской воды колориметрические определения минерального фосфора и силикатов велись по соответствующей методике [10, 13].

По ходу судна проводились определения величины рН в проточной системе, установленной отрядом исследования поверхностных вод моря. Измерения проводились в проточной ячейке, где находился датчик температуры и электрод для измерения рН. Запись измеряемых параметров и координат судна проводилась каждые 30–60 с. Для регистрации гидрохимических параметров по ходу судна применялся 4-х канальный иономер “Эконикс-Эксперт 001” производства НПП “Эконикс-Эксперт” (Россия, Москва). Из проточной ячейки отбирались пробы для определения в лаборатории величин общей щелочности, содержания растворенного кислорода и кремния.

Из трубок Ниемисто (диаметр 5 см) проводился отбор проб для определения градиента содержания кислорода и растворенного углерода в слое воды над осадками. Отбор проводился сифоном из силиконовой трубки с 2–4 горизонтов из слоя 1–20 см над осадком. Специально для этой цели были подготовлены флаконы малого объема (около 30 мл) для отбора проб на кислород.

Содержание кислорода в морской воде определялось титрованием по методу Винклера [13]. Величина рН определялась на иономере “Эконикс Эксперт 001.4”, для калибровки использовались образцовые буферные растворы ГОСТ 8.135-74. Определение общей титруемой щелочности (Alk) проводилось методом прямого титрования (метод Бруевича) с визуальным определением точки конца титрования [13]. Определение содержания растворенного неорганического и валового фосфора (фосфаты), растворенного неорганического кремния (силикатов), нитритного азота (нитриты), нитратного азота (нитраты), аммонийного азота (ион аммония) проводились колориметрически в соответствии с [9, 10, 13]. Определение общего (валового) азота и фосфора проводилось методом мокрого сжигания [10]. Расчет содержа-

ния растворенной двуокиси углерода и различных форм растворенного неорганического углерода проводилось рН-Alk методом по термодинамическим уравнениям карбонатного равновесия с применением концентрационных констант диссоциации угольной кислоты Роя [16] с поправками для вод со свойствами, отличными от морской воды [1, 15]. Для исследования тонкой структуры распределения кислорода использовался датчик SBE-43.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В 2011 г. как основные этапы работ можно выделить: разрез по Енисейскому заливу, разрезы вдоль восточного и западного отрогов желоба Святой Анны и разрез через Новоземельский желоб. Все эти разрезы характеризовали различные, значительно отличающиеся друг от друга районы западной части Карского моря.

**Енисейский разрез** проводился в период 18–22 сентября (от ст. 5010 до ст. 5026). Начальная, самая южная, станция разреза была выполнена в водах, где по всему вертикальному профилю не прослеживалось влияние соленых вод. Но может ли она характеризовать особенности химического стока реки, в данный период сказать сложно, поскольку для Енисея, как и для других крупных рек, характерна значительная неоднородность стока по створу русла [4]. Диапазон изменения гидрохимических параметров на данном разрезе был наибольшим для всего исследованного района, что естественно для зон контакта морских и речных вод (табл. 1). На разрезе по гидрохимическим параметрам отчетливо видна зона смешения (контакта) речных и морских вод. Эта зона, как и у большинства крупных рек, имеет сложное строение и состоит из 2 частей – вертикальной фронтальной зоны, расположенной между станциями 5012 и 5013, и горизонтальной, следы которой прослеживаются практически до конца разреза. Наиболее хорошо границы фронтальной зоны видны по распределению общей щелочности (рис. 1) и растворенного кремния (рис. 2).

К сожалению, “нормальная” динамика гидрохимических параметров в переходной зоне от речных к морским водам была нарушена. В районе ст. 5018 разрез пересек “язык” распресненной воды, где соленость поверхностных вод падала практически до 5 psu. Особенно заметно пересечение этой воды на распределении общей щелочности (рис. 1). На разрезе выделяются две основные области, где проходит массовое осаждение и окисление в верхнем слое осадков органического вещества. Во-первых, это ст. 5015, где в придонных водах наблюдается рост всех биогенных элементов и снижение содержания растворенного кислорода до 4.68 мл/л, или менее 60% (рис. 3). Значительное увеличение здесь содержания об-

**Таблица 1.** Средние значения и пределы наблюдавшихся величин гидролого-гидрохимических параметров вод на разрезе в Енисейском заливе 18–22 сентября 2011 г.

Параметр	Речные воды	Переходная область	Морские воды
Горизонт, м	12 0–32	7 0–16	30 0–63
Температура	9.36 8.66–9.63	4.63 0.53–7.96	–0.86 –1.56–2.01
Минерализация, г/л	0.136 0.063–0.518	21.237 1.415–29.972	32.307 31.000–34.000
Кислород, мл/л	7.84 7.73–8.04	7.48 4.69–8.58	7.48 5.74–10.95
Кислород, %	97.9 97.1–99.0	95.4 59.6–108.6	85.7 67.3–105.5
pH, ед. NBS	7.94 7.79–8.11	7.85 7.32–7.99	7.81 7.65–7.99
Щелочность, мг-экв/л	1.008 0.934–1.069	1.837 0.974–2.258	2.304 2.204–2.405
Фосфор, мкг-ат/л	0.18 0.02–0.23	0.45 0.12–2.34	0.77 0.18–1.40
Фосфор общий, мкг-ат/л	1.70 0.18–2.19	1.23 0.40–10.39	1.19 0.91–2.34
Кремний, мкг-ат/л	107.93 103.10–113.59	26.14 1.71–112.5	10.81 1.47–20.64
Азот аммонийный, мкг-ат/л	1.52 0.00–3.46	1.47 0.48–8.04	1.21 0.51–1.91
Азот нитратный, мкг-ат/л	0.26 0.19–0.36	0.80 0.00–7.30	3.91 0.11–6.77
Азот нитритный, мкг-ат/л	0.23 0.09–0.27	0.06 0.01–0.13	0.13 0.04–0.20
Азот общий, мкг-ат/л	18.93 9.44–24.46	15.76 3.74–45.62	14.13 6.45–21.11
Углерод неогранич., мг С/л	12.52 11.71–13.34	21.83 12.22–26.89	27.38 26.25–28.91

щего фосфора (более 10 мкг-ат/л) и аммонийного и общего азота (до 6.8 и 45.6 мкг-ат/л соответственно) свидетельствует о высокой интенсивности деструкционных процессов и “молодости” органического вещества осадков.

Вторая область разложения органического вещества находится ниже по течению (станции 5020 и 5021), где рельеф дна залива образует впадину, отгороженную от мористой части участком с небольшими глубинами. Повышение содержания биогенных элементов выражено здесь слабее, чем выше по течению. Наиболее заметно повышение содержания нитратного азота (рис. 4) и снижение относительного содержания кислорода (до 70–80%). Преобладание полностью окисленных форм

азота и незначительное увеличение фосфатов свидетельствует о том, что органическое вещество, находящееся в верхнем слое осадков и придонной воде, уже прошло основные стадии окисления.

Можно предположить, что область окисления выше по течению (ст. 5014) связана с массовым осаждением растворенных и взвешенных веществ на геохимическом барьере, что подтверждается и распределением минерализации вод. Вторая область, связанная с окислением органики, возникла, скорее всего, на “орографическом” барьере [8], где изменение динамических характеристик потока и особенность рельефа дна залива создают условия для осаждения несомой водой взвеси.

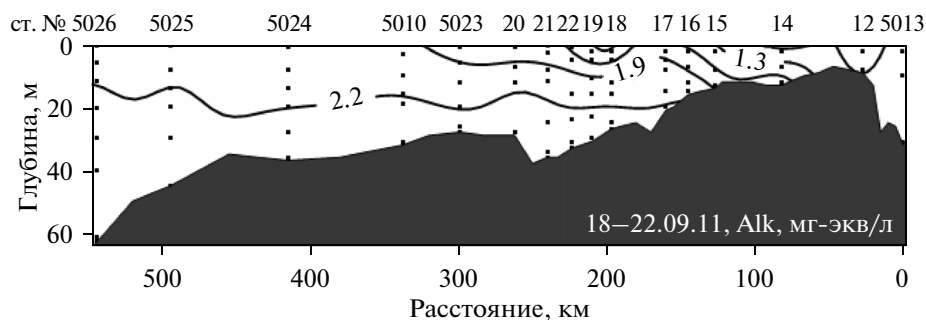


Рис. 1. Распределение величины общей щелочности (мг-экв/л) на Енисейском разрезе.

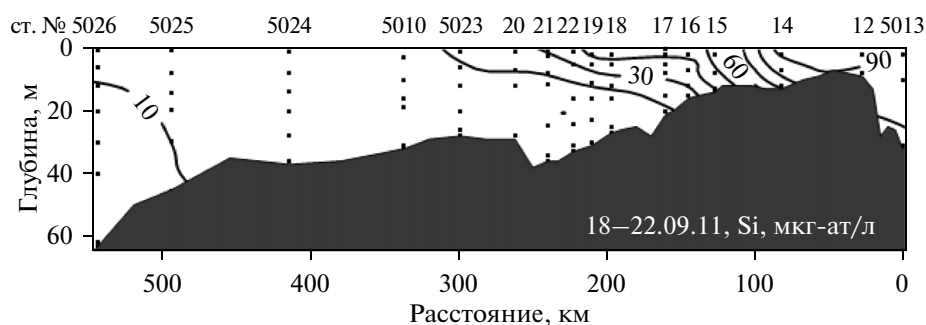


Рис. 2. Распределение содержания растворенного кремния (мкг-ат/л) на Енисейском разрезе.

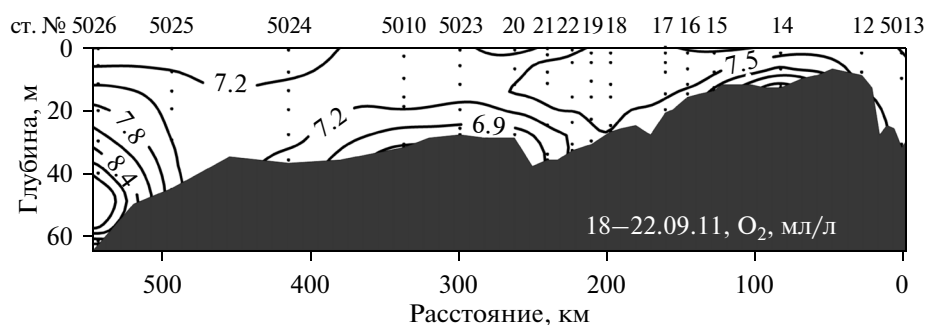


Рис. 3. Распределение растворенного кислорода (мл/л) на Енисейском разрезе.

Судя по распределению растворенного кислорода и степени его насыщения, биологическая активность вод в заливе была невысокой. Насыщение вод кислородом только в поверхностных водах было близко к насыщению, как правило, от 98 до 101% (табл. 1). С другой стороны, содержание биогенных элементов не могло лимитировать фотосинтетическую деятельность. Такое распределение гидрохимических параметров может свидетельствовать не только о сезонном снижении фотосинтетической активности, но и о высоком содержании органического вещества в речных водах. Как и для большинства высокоширотных рек, относительно невысоким на разрезе было содержание нитратного азота, которое часто было близким или не превышало содержание нитрит-

ного азота. Это связано с небольшой скоростью протекания биохимических процессов из-за низкой температуры и/или с тем, что процессы разложения органического вещества находятся в начальной стадии и окисление азота органического вещества еще не полностью завершено.

На большинстве станций разреза проводились гидрохимические анализы в придонной воде (на 2–4 горизонтах от дна) и иловой воде верхнего слоя осадка. Как правило, в придонной воде градиенты содержания кремния и фосфора были незначительными. Видимо, достаточно высокие скорости течения приводили к выравниванию гидрохимических характеристик. Для кислорода как более динамичного параметра влияние тече-

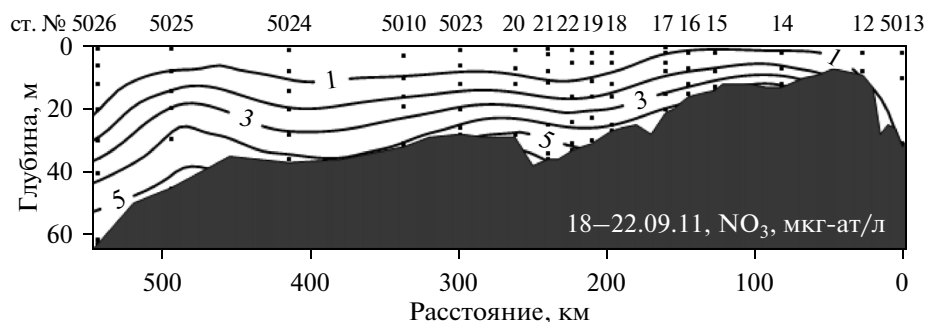


Рис. 4. Распределение содержания нитратного азота (мкг-ат/л) на Енисейском разрезе.

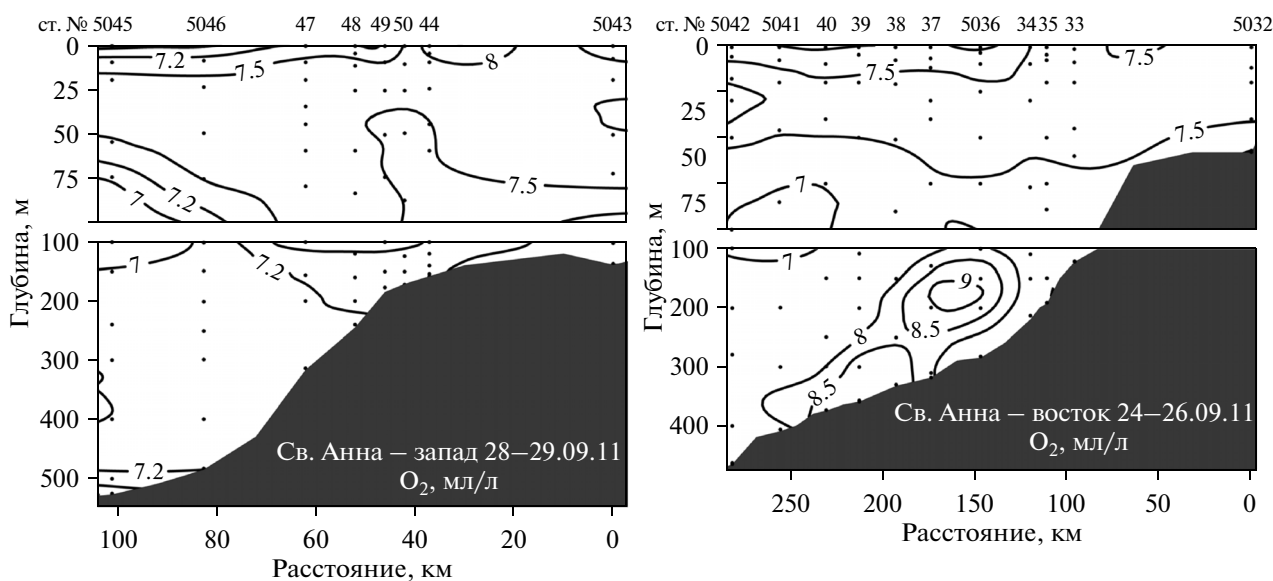


Рис. 5. Распределение содержания растворенного кислорода (мл/л) на разрезах вдоль западного и восточного отрогов желоба Святой Анны.

ния было не столь заметным и на большей части станций в непосредственной близости к поверхности осадка (1 см), как правило, наблюдалось падение содержания кислорода на 0.5–0.8 мл/л.

**Разрезы в желобе Святой Анны.** Во время рейса были выполнены 2 разреза вдоль западного и восточного отрогов желоба Святой Анны, через которые в основном проходит обмен моря с водами центрального Арктического бассейна. Восточный разрез (станции 5032–5042) был выполнен 24–26 сентября, западный (станции 5043–5050) 28–29 сентября (табл. 2).

По распределению гидрохимических параметров оба разреза отличаются друг от друга. В первую очередь, это выражается в том, что на восточном разрезе можно предположить сползание вод по склону. В глубинных слоях вод на станциях 5036–5038 было повышено содержание растворенного кислорода (рис. 5), что, однако, не отразилось на степени его насыщения. Повышенным было и со-

держание растворенного неорганического фосфора (рис. 6) и кремния (рис. 7). Содержание нитратного азота, напротив, было понижено в придонных водах этих станций (рис. 8). Такое явление, когда на гидрохимическую структуру вод оказывают влияние воды, стекающие с мелководных участков, достаточно типично для вод Арктического бассейна, особенно в период, когда начинается выхолаживание вод на шельфе. В малоградиентных водах это приводит к формированию специфической “слоистой” структуры распределения гидрохимических параметров.

В южной части обоих разрезов прослеживалось воздействие материкового стока в поверхностных водах (ст. 5032 на восточном разрезе и ст. 5043 на западном разрезе). Но если на восточном разрезе это были воды с относительно невысоким содержанием кремния, очень низкой величиной рН и малым содержанием растворенного неорганического углерода, то поверхностные во-

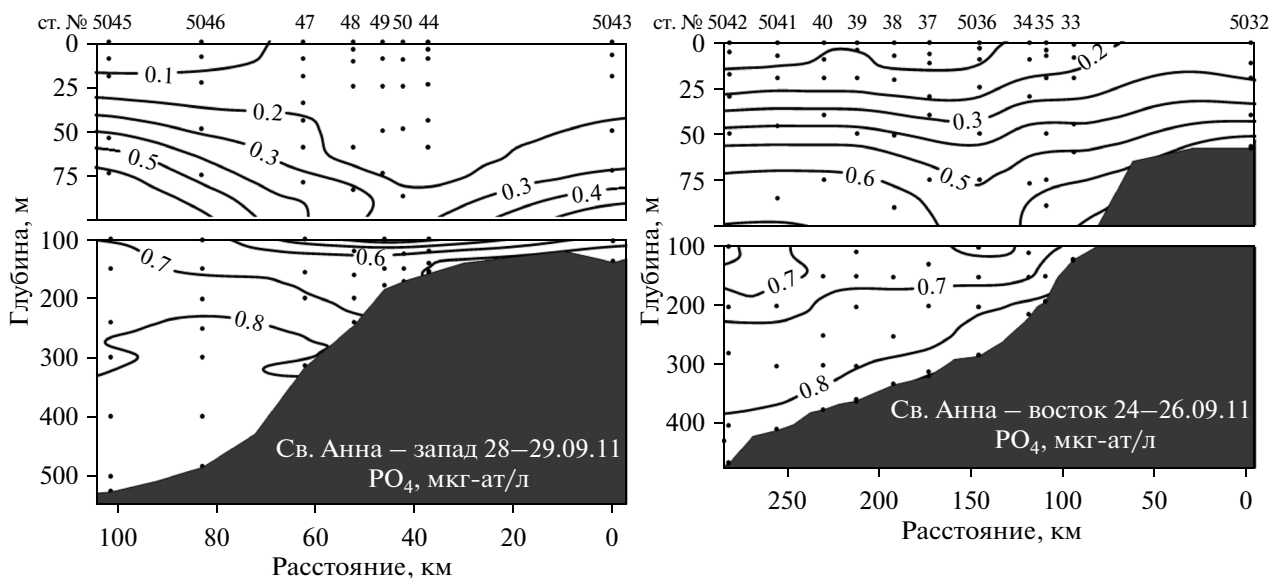


Рис. 6. Распределение содержания растворенного неорганического фосфора (мкг-ат/л) на разрезах вдоль западного и восточного отрогов желоба Святой Анны.

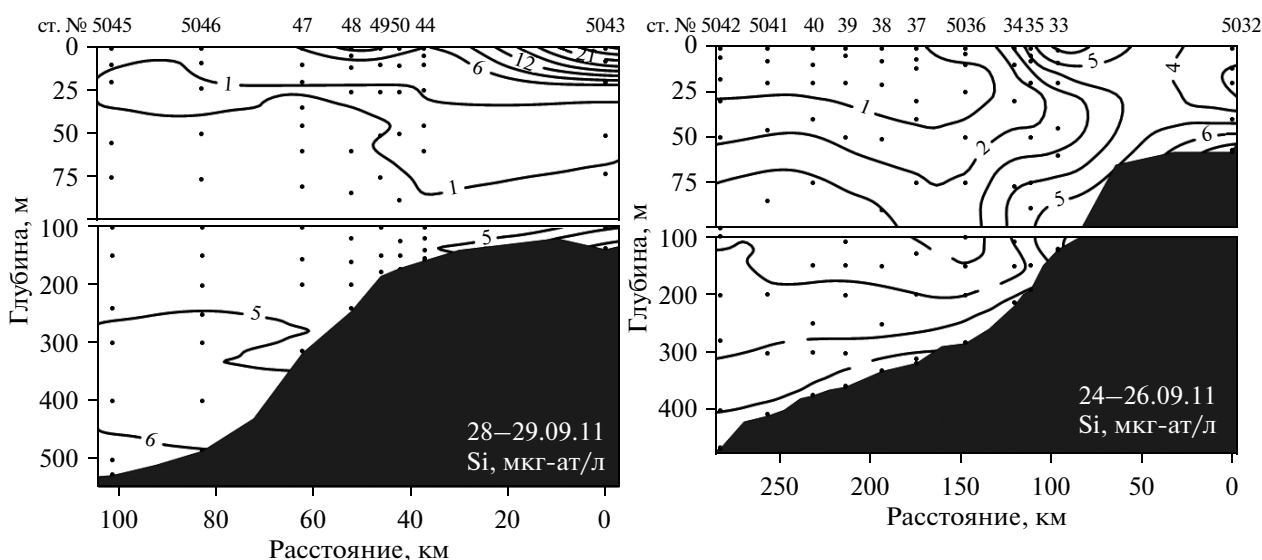


Рис. 7. Распределение содержания растворенного кремния (мкг-ат/л) на разрезах вдоль западного и восточного отрогов желоба Святой Анны.

ды на западном разрезе обладали очень высоким содержанием растворенного кремния, незначительным понижением величины общей щелочности и содержания общего растворенного неорганического углерода. На величине остальных гидрохимических показателей материковый сток на западном разрезе практически не отражался. Возможно, что различное соотношение углерода и кремния в этих водах связано с тем, что в формировании этих вод принимали участие материковые воды различного происхождения.

В то же время у обоих разрезов было много общих черт. Во-первых, это интересная особен-

ность в распределении кислорода. Практически на всех станциях обоих разрезов в слое 20–30 м наблюдалось пресыщение вод кислородом. Если на поверхности степень насыщения вод составляла около 90%, то в этом слое относительное содержание кислорода было 100–105% и более (максимальное значение 109%). Этот слой находился немного ниже галоклина. Происхождение этого слоя, скорее всего, можно объяснить тем, что весной значительные массы воды, выносимые с половодьем, перекрыли поверхностные морские воды, в которых в это время активно проходило весеннее цветение. Контакт этих вод с

**Таблица 2.** Средние значения и пределы наблюдавшихся величин гидролого-гидрохимических параметров вод на разрезах в западном и восточном отрогах желоба Святой Анны 24–29 сентября 2011 г.

Параметр	Поверхностный слой	Слой минимума температуры	Промежуточные воды	Глубинные воды
Св. Анна – восточный отрог желоба				
Горизонт, м	6 0–20	150 40–280	100–200	200–466
Температура	3.68 –1.35–4.81	–0.85 –1.68...–0.39	–0.34 –1.12–1.55	–0.33 –0.8–0.49
Соленость	31.290 27.270–33.575	34.643 33.744–34.850	34.784 34.408–34.895	34.919 34.849–34.950
Кислород, мл/л	7.45 6.54–10.78	7.58 7.20–10.56	7.59 6.71–10.56	7.73 6.94–10.30
Кислород, %	97.5 86.9–105.2	88.5 86.5–89.8	88.2 82.1–91.0	88.9 84.9–92.1
pH, ед. NBS	8.06 7.90–8.14	7.98 7.93–8.06	7.99 7.92–8.06	7.96 7.92–8.02
Щелочность, мг-экв/л	2.181 0.539–2.338	2.389 2.354–2.410	2.394 2.378–2.410	2.397 2.386–2.410
Фосфор, мкг-ат/л	0.10 0.03–0.29	0.69 0.47–1.03	0.70 0.54–1.03	0.81 0.71–1.01
Фосфор общий, мкг-ат/л	0.36 0.16–0.75	0.92 0.77–1.16	0.92 0.75–1.16	0.94 0.82–1.07
Кремний, мкг-ат/л	1.92 0.09–8.21	4.53 2.80–6.97	3.97 2.04–6.97	5.48 3.56–6.69
Азот аммонийный, мкг-ат/л	0.66 0.36–1.46	0.82 0.36–2.48	1.21 0.42–2.48	0.75 0.36–1.67
Азот нитратный, мкг-ат/л	0.15 0.00–0.69	9.62 5.76–12.48	9.94 6.57–12.95	12.77 10.94–14.06
Азот нитритный, мкг-ат/л	0.03 0.00–0.06	0.08 0.02–0.15	0.11 0.07–0.20	0.04 0.01–0.11
Азот общий, мкг-ат/л	12.03 9.59–19.08	17.64 15.49–19.21	20.33 18.23–23.86	28.75
Углерод неогранич., мг/л	24.80 5.92–26.69	27.64 27.19–27.92	27.63 27.19–28.02	27.78 27.39–28.02
Св. Анна – западный отрог желоба				
Горизонт, м	6 0–20	152 73–240	100–200	200–528
Температура	3.88 2.59–6.55	–0.70 –1.46...–0.15	0.11 –1.19–2.52	–0.25 –0.63–0.06
Соленость	30.950 19.850–33.855	34.608 34.250–34.894	34.702 34.386–34.894	34.924 34.828–34.966
Кислород, мл/л	7.50 6.67–9.40	7.31 7.14–7.71	7.22 6.86–7.71	7.21 7.04–7.79
Кислород, %	98.1 87.6–107.1	88.9 87.1–91.6	89.6 83.9–99.8	88.9 87.5–95.4

Таблица 2. Окончание

Параметр	Поверхностный слой	Слой минимума температуры	Промежуточные воды	Глубинные воды
pH, ед. NBS	8.09 7.97–8.16	8.01 7.95–8.08	8.02 7.95–8.12	8.00 7.96–8.04
Щелочность, мг-экв/л	2.207 1.720–2.374	2.386 2.354–2.402	2.392 2.378–2.410	2.399 2.378–2.410
Фосфор, мкг-ат/л	0.13 0.05–0.23	0.63 0.27–0.79	0.64 0.20–0.83	0.81 0.68–0.90
Фосфор общий, мкг-ат/л	0.37 0.23–0.45	0.97 0.91–1.00	0.86 0.50–1.00	0.99 0.84–1.09
Кремний, мкг-ат/л	6.68 0.95–30.6	4.25 1.04–5.98	4.20 1.23–7.78	5.51 3.89–7.07
Азот аммонийный, мкг-ат/л	1.03 0.57–2.00	1.24 0.69–2.15	1.26 0.57–2.30	0.73 0.48–1.79
Азот нитратный, мкг-ат/л	0.27 0.00–0.83	7.43 2.59–10.62	8.21 2.08–13.99	12.10 9.43–15.23
Азот нитритный, мкг-ат/л	0.05 0.02–0.08	0.09 0.04–0.20	0.09 0.03–0.17	0.05 0.02–0.14
Азот общий, мкг-ат/л	15.69 6.11–51.56	21.96 20.90–23.02	20.26 5.99–27.42	22.28 14.21–31.68
Углерод неогранич., мг С/л	25.45 23.33–26.67	27.48 26.87–27.84	27.44 26.68–27.85	27.64 27.36–27.87

атмосферой был прекращен, и кислород, содержащийся в них, был как бы “законсервирован”. Подобное явление наблюдалось на единичных станциях во время 54-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” и было описано и объяснено Стунжасом [5]. Но если в 2007 г. это явление встречалось на единичных станциях, то в 2011 г.

существование подповерхностного слоя повышенного содержания кислорода наблюдалось на большинстве станций открытой части моря.

К другой общей черте обоих разрезов можно отнести существование нитритного максимума в слое 50–100 м (рис. 9). В этом слое наблюдалось и увеличенное содержание аммонийного азота.

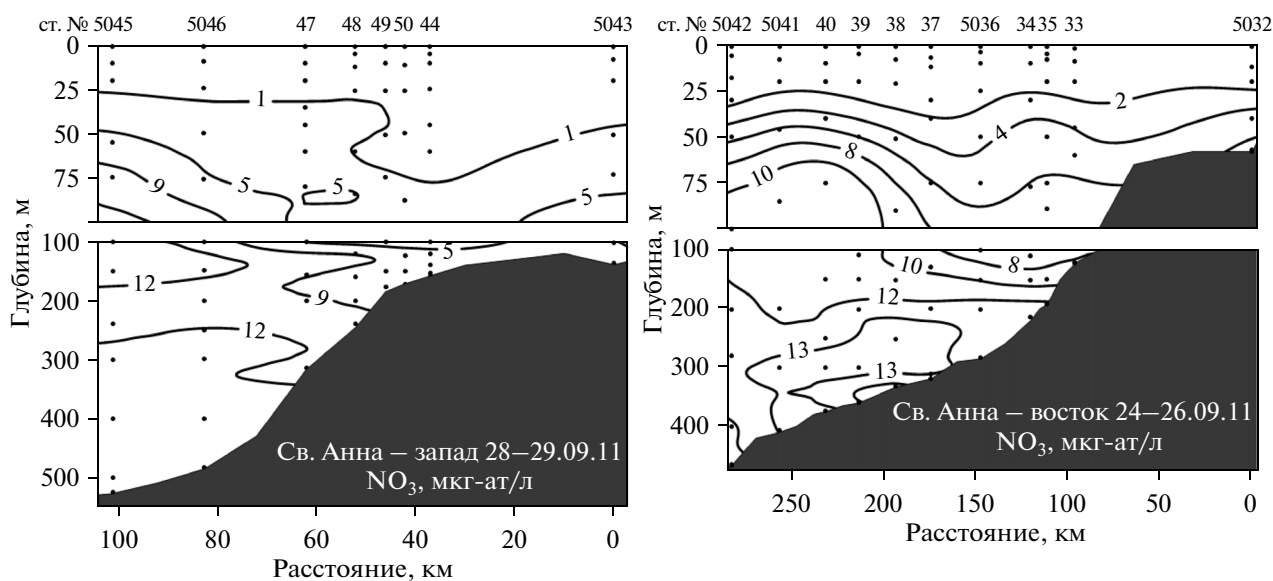


Рис. 8. Распределение содержания нитратного азота (мкг-ат/л) на разрезах вдоль западного и восточного отрогов жёлоба Святой Анны.



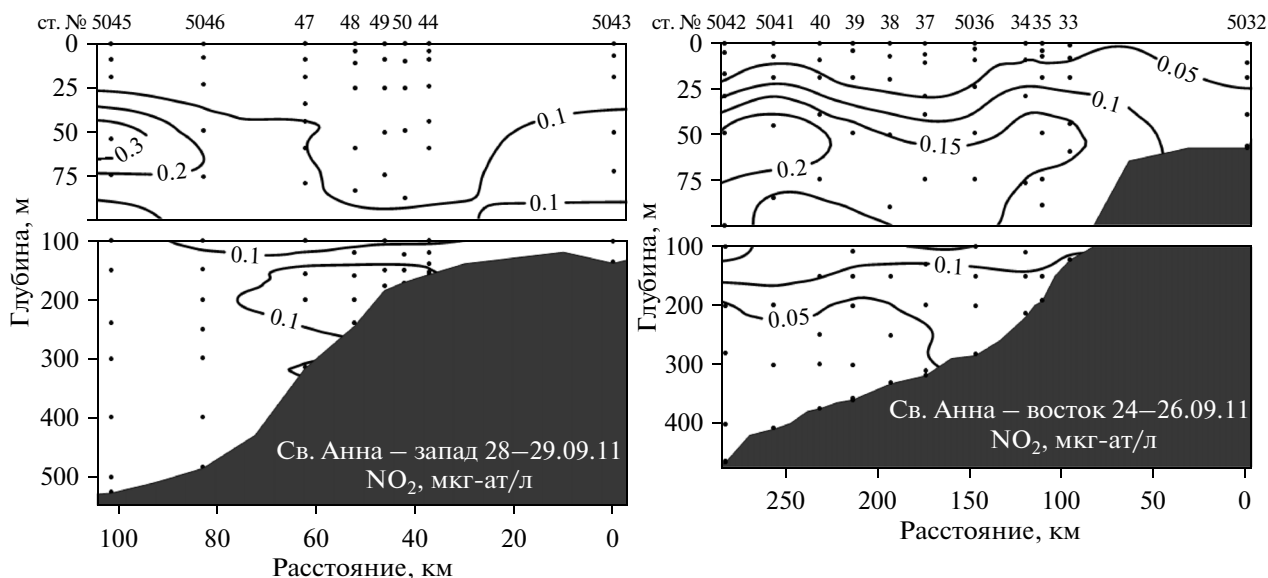


Рис. 9. Распределение содержания нитритного азота (мкг-ат/л) на разрезах вдоль западного и восточного отрогов желоба Святой Анны.

Ниже, в слое 100–200 м в мористой части разрезов увеличивалось содержание нитратного азота. Такое распределение форм растворенного азота может быть связано с тем, что в слое 50–100 м активно проходят процессы окисления органического вещества, поступившего из поверхностного слоя во время весенне-летнего цветения.

Распределение гидрохимических параметров в придонных водах разрезов вдоль отрогов желоба отличается от распределения на Енисейском разрезе. Если на речном разрезе в придонном слое проходило выравнивание гидрохимических параметров течением и вертикальные градиенты содержания растворенного кремния, фосфора и величины общей щелочности практически отсутствовали, то на станциях в желобе наблюдалось вполне закономерное увеличение этих параметров в придонном слое. Из 5 станций разрезов, где

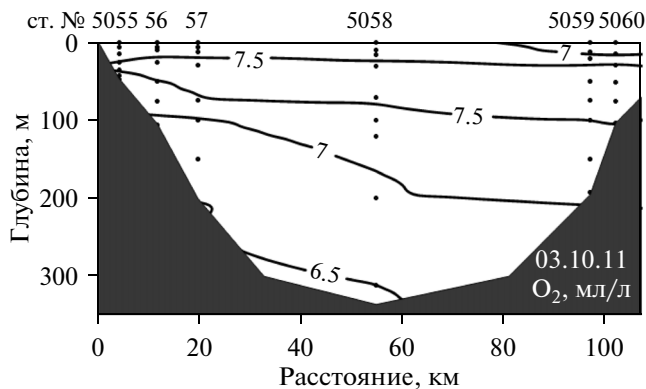


Рис. 10. Распределение растворенного кислорода (мл/л) на Новоземельском разрезе.

проводились наблюдения в придонном слое, на 2-х (станции 5033 и 5039) содержание кислорода в 10-см слое над осадком увеличивалось на 0.1–0.2 мл/л, на остальных станциях в этом слое наблюдалось падение содержания кислорода на 0.2–0.5 мл/л.

**Новоземельский разрез.** Работы на разрезе проводились 3 ноября 2011 г., станции 5055–5060 (табл. 3). Так же как и на разрезах вдоль отрогов желоба Святой Анны, наблюдался слой вод с повышенным содержанием растворенного кислорода. О наиболее вероятном происхождении этого слоя говорилось выше. Ниже его с глубиной содержание растворенного кислорода и степень его насыщения равномерно убывают (рис. 10). Величина общей щелочности и содержание растворенного неорганического фосфора (рис. 11 и 12) равномерно возрастают от поверхности до дна, для них, как и для содержания растворенного кислорода, наблюдался наклон изолиний к восточной части разреза.

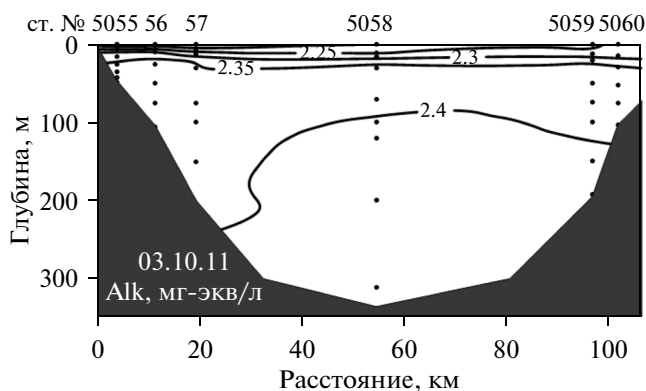
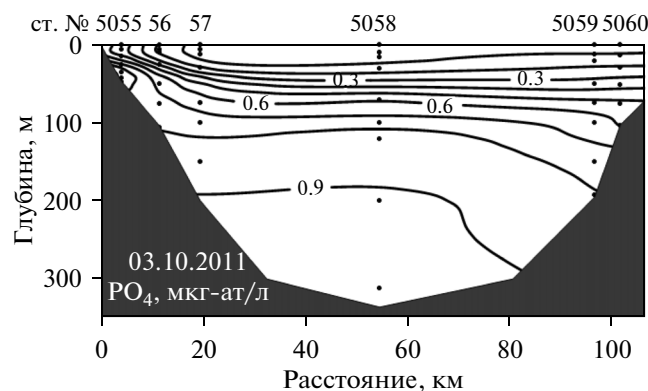
Низким было содержание растворенного кремния в верхнем слое вод. В 50-метровом поверхностном слое его содержание было от 0.3 до 3 мкг-ат/л (рис. 13). Только на поверхности в восточной части разреза под влиянием стока с Новой Земли содержание растворенного кремния возрастало до 5 мкг-ат/л. Это связано с тем, что во время весенне-летнего цветения запас кремния был практически полностью потреблен фитопланктоном. Влияние материкового стока, основного источника кремния, на данном разрезе было очень слабым, а вынос его из глубоких слоев в результате осенней интенсификации перемешивания еще не начался.

**Таблица 3.** Средние значения и пределы наблюдавшихся величин гидролого-гидрохимических параметров вод на разрезе через Новоземельский желоб 3 ноября 2011 г.

Параметр	Поверхностный слой	Слой минимума температуры	Промежуточные воды	Глубинные воды
Горизонт, м	0–20	70–100	100–200	200–311
Температура	7.06 5.57–8.39	–1.40 –1.55...–1.19	–0.99 –1.34...–0.03	–1.44 –1.62...–1.34
Соленость	31.897 30.117–33.550	34.397 34.328–34.478	34.544 34.476–34.614	34.645 34.601–34.708
Кислород, мл/л	6.94 6.76–7.27	7.42 7.26–7.53	7.06 6.85–7.51	6.64 6.46–6.97
Кислород, %	100.6 97.6–104.7	88.4 86.8–89.7	85.2 82.0–92.8	79.1 77.0–83.3
pH, ед. NBS	8.02 8.01–8.04	7.94 7.93–7.96	7.93 7.89–7.99	7.89 7.87–7.93
Щелочность, мг-экв/л	2.245 2.147–2.346	2.392 2.386–2.402	2.398 2.378–2.410	2.404 2.394–2.410
Фосфор, мкг-ат/л	0.15 0.04–0.68	0.78 0.61–1.03	0.78 0.55–0.94	0.93 0.91–0.94
Кремний, мкг-ат/л	2.12 0.33–5.17	4.04 3.27–4.64	5.85 2.32–7.16	9.75 7.16–12.33
Азот аммонийный, мкг-ат/л	1.05 0.49–2.15	0.97 0.62–1.34	1.41 0.80–2.18	0.93 0.80–1.10
Азот нитратный, мкг-ат/л	0.05 0.00–0.19	8.45 7.89–9.09	8.75 4.17–11.8	8.72 7.86–9.74
Азот нитритный, мкг-ат/л	0.03 0.02–0.05	0.04 0.02–0.07	0.08 0.03–0.20	0.06 0.03–0.13
Углерод неогранич., мг С/л	25.48 24.45–26.66	27.89 27.81–28.05	27.97 27.53–28.13	28.23 28.13–28.38

Распределение различных форм растворенного азота (нитритного, нитратного и аммонийного) было более сложным, чем других гидрохимических параметров. На горизонте около 50 м наблюдался максимум содержания нитритного и

аммонийного азота. Особенно это проявлялось на восточной и западной периферии разреза. В восточной части разреза в этом слое наблюдались наибольшие концентрации этих форм азота. Распределение нитратного азота на разрезе ха-

**Рис. 11.** Распределение величины общей щелочности (мг-экв/л) на Новоземельском разрезе.**Рис. 12.** Распределение содержания растворенного неорганического фосфора (мкг-ат/л) на Новоземельском разрезе.

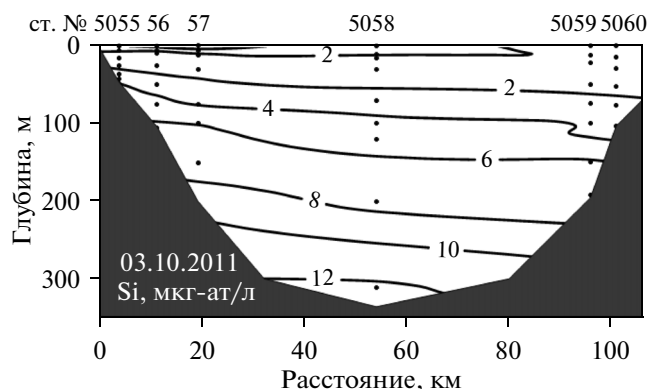


Рис. 13. Распределение содержания растворенного кремния (мкг-ат/л) на Новоземельском разрезе.

рактировалось наличием максимума на горизонте около 150 м. Этот максимум был более выражен в западной части разреза (рис. 14). Если рассматривать распределение гидрохимических параметров в верхнем слое вод (от поверхности до галоклина) на Новоземельском разрезе, то видно, что у берегов Новой Земли возрастает содержание растворенного азота, фосфора, величина общей щелочности и заметно падает содержание растворенного кремния (рис. 15). Такая же картина наблюдалась в поверхностных водах на разрезе через Новоземельский желоб в 2007 г. В работе [7] было показано, что источником азота и фосфора могут быть алевролитовые сланцы, слагающие берега. Так же как и в 2007 г., воздействие стока с Новой Земли на гидрохимическую структуру верхнего слоя морских вод прослеживалось более чем на 10 км от берега.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределения гидрохимических параметров в центральной части Карского моря и северной части Енисейского залива (содержание кислорода и

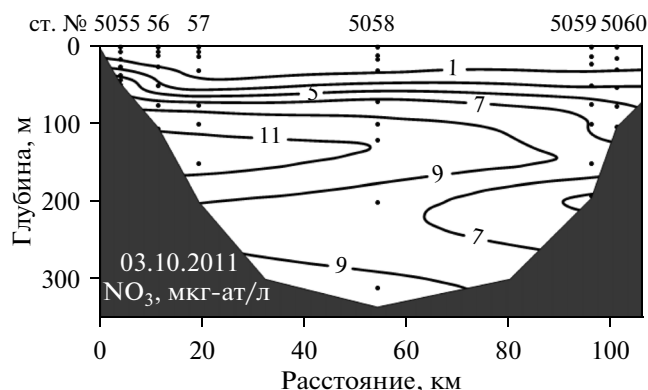


Рис. 14. Распределение содержания нитратного азота (мкг-ат/л) на Новоземельском разрезе.

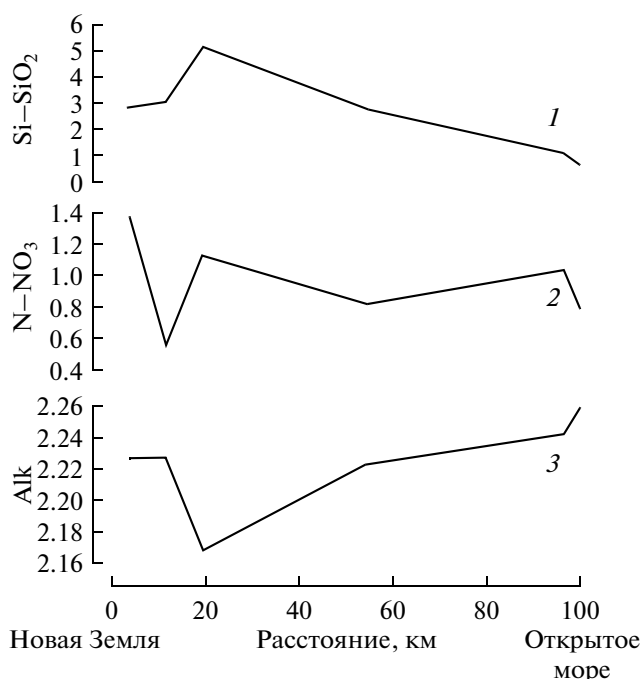


Рис. 15. Изменение в верхнем 10-метровом слое воды Новоземельского разреза содержания: 1 – растворенного неорганического кремния (мкг-ат/л); 2 – суммы нитратного и нитритного азота (мкг-ат/л); 3 – величины общей щелочности (мг-экв/л).

основных биогенных элементов) не выходило за пределы средних многолетних значений для данного сезона. В поверхностных водах количество биогенных элементов (главным образом фосфатов и нитратного азота) в период работ снижалось почти до аналитического нуля. Содержание фосфатов не опускалось до того, чтобы служить лимитирующим фактором для развития фитопланктона. Концентрация нитратного азота в верхнем слое вод морских разрезов часто была ниже предела обнаружения. Видимо, источником азота для развития фитопланктона был рецилинг биогенных элементов и/или потребление других форм азота (например, нитритов или аммония), что достаточно типично для высокоширотных морей. Как и ожидалось, воды моря были хорошо аэрированы, содержание кислорода и величина pH даже в глубине желобов оставались достаточно высокими.

Сравнивая результаты, полученные в данной экспедиции, с предыдущими исследованиями, можно отметить одну интересную особенность. По сравнению с предыдущими годами возросло влияние вод материкового стока на гидрохимический режим региона. С этим связано и то, что с 1993 г. наблюдается достаточно устойчивый сдвиг зоны контакта морских и речных вод (зоны смешения) к северу, как в Обской губе, так и в Енисейском заливе почти на 100 км. Год от года соле-

ная вода отступает к северу, вытесняемая речными водами. Годовой сток сибирских рек за период с начала 30-х годов до начала 90-х на фоне значительных межгодовых колебаний имеет явную тенденцию к увеличению [11].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты № 14-17-00681, полевые исследования и № 14-05-00095, обработка материалов).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков А.С., Павлова Г.Ю., Кропотов В.А. Карбонатная система // Химия морской воды и аутигенное минералообразование. М.: Наука, 1989. С. 49–111.
2. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
3. 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. 737–747.
4. Маккавеев П.Н., Гордеев В.В., Стунжас П.А. и др. Гидрохимический сток р. Оби в зимний период (по материалам работ в декабре 2001 года). Эколого-биогеохимические исследования в бассейне Оби / Ред. Зуев В.В. и др. Томск, 2002. С. 8–20.
5. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А., Мельникова З.Г. и др. Гидрохимическая характеристика вод западной части Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 730–739.
6. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А., Хлебопашев П.В. О выделении вод Оби и Енисея в распресненных линзах Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 740–747.
7. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Хлебопашев П.В. Поверхностный сток биогенных элементов с берега залива Благополучия (арх. Новая Земля) // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 610–617.
8. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: Прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
9. Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.242-92. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 264 с.
10. 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.
11. Савельева Н.И., Василевская Л.И., Семилетов И.П. и др. Климатическая изменчивость сезонного стока сибирских рек // Тр. Арктического регионального центра. Т. 2, Ч. 1. Гидрометеорологические и биогеохимические исследования в Арктике. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 9–21.
12. Синюков В.В. Развитие морских гидрохимических исследований (Черное, Азовское и Арктические моря). М.: Наука, 1993. 224 с.
13. Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. Бордовский О.К., Иваненков В.Н. М.: ИО АН СССР, 1992. 198 с.
14. Флинт М.В. 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 677–682.
15. Makkaveev P.N. The total alkalinity in the anoxic waters of the Black sea and in sea-river mixture zones. Intergovernmental Oceanographic Commission. Joint IOC-JGOFS CO2 Advisory Panel Meeting. Seven Session. Annex V. UNESCO, 1998.
16. Millero F.J. Thermodynamics of the carbon dioxide system in oceans // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. № 4. P. 661–677.

## Hydrochemical Characteristics of the Waters of the Western Part of the Kara Sea

P. N. Makkaveev, Z. G. Melnikova, A. A. Polukhin, S. V. Stepanova, P. V. Khlebopashev, A. L. Chultsova

Hydrochemical investigations of the Kara Sea were included in the program of complex expedition of the 59th cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”. The main hydrochemical works were carried out on sections along the Yenisei Bay, along the eastern and western branches of St. Anne Trough and through the Novaya Zemlya Trough. Furthermore, flow cell worked almost all the time. In this cell pH of surface water was determined on the run of the vessel and samples for hydrochemical analyzes were taken. There was an extensive range of hydrochemical analyzes, including identification of the nutrients (silicate, various forms of nitrogen and phosphorus), dissolved oxygen concentrations and values of total alkalinity and pH. The article shows hydrochemical conditions of southwestern part of the Kara Sea, the main results and a comparison with previous complex expeditions of the 49th cruise of the R/V “Dmitriy Mendeleev” in 1993 and the 54th cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in 2007.