

ДИНАМИКА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЕНИСЕЙСКОМ ЗАЛИВЕ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ

П. Н. Маккавеев, А. А. Полухин, Ю. Р. Налбандов, П. В. Хлебопашев
ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 22 мая 2019 г.

Представлены результаты исследований гидрохимической структуры вод в Енисейском заливе, а также в прилегающей к нему области шельфа Карского моря, находящейся под сильным влиянием материкового стока. Проведен расчет динамики растворенных форм кремния и фосфора в зоне смешения река-море и величины кажущегося потребления кислорода. Показано, что, несмотря на значительную сезонную и межгодовую изменчивость химического стока реки Енисей, зоны, где наблюдалось изменение содержания основных биогенных элементов, практически не меняли своего положения.

Ключевые слова: Карское море, Енисейский залив, речной сток, зона смешения, гидрохимическая структура, динамика биогенных элементов, биопродуктивность.

Введение

Из всех арктических морей Карское море наиболее подвержено влиянию речного стока [1], и в среднем 82% годового пресного стока в море — воды Обской губы и Енисея [2]. Сток этих рек весьма значителен, и можно считать, что по крайней мере вся центральная и западная часть Карского моря может быть отнесена к огромному приустьевому району системы рек Енисей — Обь [3]. В некоторые годы даже в поверхностном опресненном слое вблизи архипелага Новая Земля около трети воды принадлежит Енисею. Есть данные, что воды Енисея проникают и в море Лаптевых [1; 4], особенно при «восточном типе» переноса вод [5]. Естественно, что роль Енисея в формировании поверхностных вод Карского моря и частично моря Лаптевых вызывает значительный интерес к химическому стоку вод реки.

Объем и состав речного стока претерпевает значительные изменения на всем протяжении русла, но наиболее значительная трансформация химического состава воды и взвеси происходит в устьевых областях, чему способствуют изменения динамических характеристик потока и смешение вод. По отношению к переносимому растворенному и взвешенному веществу устьевые зоны обладают тремя связанными между собой функциями. Это транзит вещества,

его осаждение (переход из воды в донные осадки) и поступление в воду при растворении взвеси или при окислении органического вещества (ОВ). В пределах устьевых областей эти процессы практически всегда идут одновременно. Устьевые и приустьевые районы, где собирается все выносимое реками растворенное и взвешенное вещество, относятся к наиболее продуктивным районам Мирового океана, где образуется более 30% глобальной первичной продукции и вылавливается почти 90% рыбопродуктов [6; 7]. Устьевые области Оби и Енисея включают в себя обширные пресноводные заливы [8], в пределах которых особенно сильно проявляется изменение растворенного и взвешенного стока этих рек. Существует мнение, что далеко не все биогенные вещества, выносимые реками, проходят через зону смешения, а те, что прошли, не всегда могут легко усваиваться морской биотой. Без знания процессов, проходящих в устьевых областях, невозможно корректно оценить количество веществ, выносимых с материковым стоком, и их роль в продукционном потенциале моря. В связи с этим особое значение приобретает изучение трансформации химического стока, в том числе и биогенного, в устьевых областях.

Характеристика объекта исследования

Енисей — крупнейшая река российской Арктики с площадью водосбора 2440 тыс. км² и средним стоком за период 1936—2005 гг. от 493 до 675 км³ [9]. Средний годовой сток взвешенных наносов Ени-

сея оценивается в 13 млн т [10]. Верхней границей устьевой области Енисея, если определять ее по максимальной дальности распространения в реку колебаний уровня воды приливной волны при меженном стоке [2], считается участок русла у впадения Нижней Тунгуски. В устьевой области Енисея выделяются [11]: придельтовый район (Туруханск — Усть-Порт), дельтовый район (Усть-Порт — Байкалово), устьевое взморье с приустьевым баром Байкалово — Сопочная Карга и морская часть устьевой области. Определить морскую (нижнюю) границу устьевой области Енисея сложно. Для большинства рек рекомендуется выделять морскую границу устьевой области по максимальной дальности положения изогалины 90‰ от минерализации приемного бассейна при повышенном речном стоке, например при половодье [2]. Но енисейские воды могут быть во многих районах Карского моря и даже проникать в море Лаптевых. При морфологическом подходе границу можно выделять по изобате «оконтуривающей рельеф зоны обмеления прибрежной полосы водоема» [2], в данном случае можно и по свалу глубин.

Минерализация енисейских вод по средним многолетним данным составляет 0,036—0,245 г/кг [12]. Минимальная наблюдавшаяся минерализация (0,036 г/кг) зафиксирована в середине апреля, но тогда еще не могли подходить воды весеннего половодья, а скорее должны наблюдаться воды зимней межени, минерализация которых, по нашему мнению, должна быть выше. В работах экспедиций Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) минимальная минерализация была от 0,046 до 0,438 г/кг, на судне «Норильский никель» в апреле 2018 г. около порта Дудинка минерализация воды на поверхности составляла 0,025 г/кг.

Основная область контакта пресных и соленых вод располагается севернее мыса Сопочная Карга [8], именно здесь находятся обширные отмельные участки русла — выходной бар залива. В области бара идет активный процесс осаждения выносимого терригенного материала. В диапазоне солености до 8 psu формируются биологический, геохимический и седиментационный барьеры [6] и происходит наиболее значительная трансформация растворенного и взвешенного стока. Средняя многолетняя величина стока растворенного азота для Енисея составляет $53 \cdot 10^3$ т/год, минерального фосфора — $7,3 \cdot 10^3$ т/год, кремния — $4010 \cdot 10^3$ т/год [13].

Материалы и методы

Использованные в работе гидрологические и гидрохимические данные получены в экспедициях ИО РАН: это 49-й рейс научно-исследовательского судна (НИС) «Дмитрий Менделеев» (сентябрь 1993 г.) [14], 59-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь 2011 г.) [3], 128-й рейс НИС «Профессор Штокман» (август 2014 г.) [15], 66-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (июль 2016 г.). Кро-

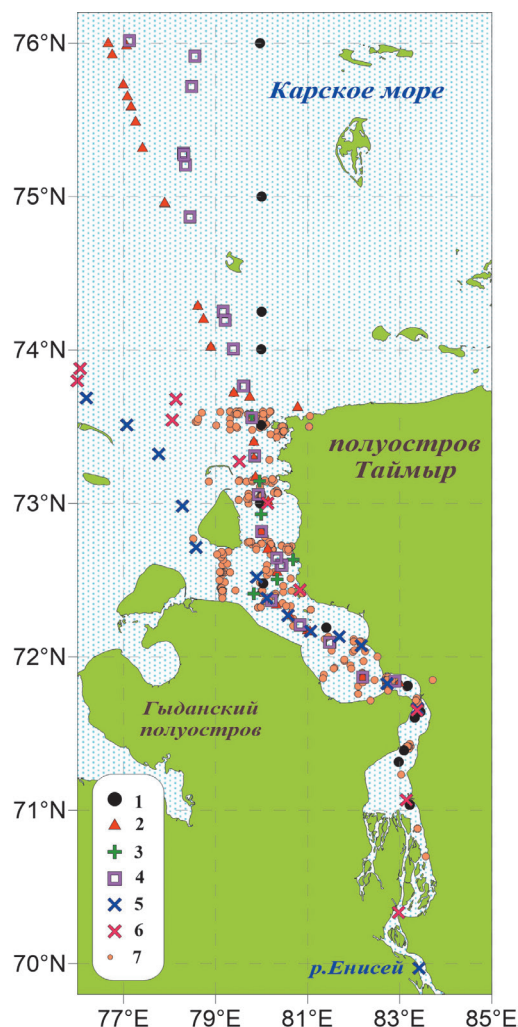


Рис. 1. Расположение станций в Енисейском заливе: 1 — НИС «Дмитрий Менделеев» (1993 г.), 2 — НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2011 г.), 3 — НИС «Профессор Штокман» (2014 г.), 4 — НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2016 г.), 5 — «Норильский никель» (2016 г.), 6 — «Норильский никель» (2018 г.), 7 — архивные материалы

Fig. 1. Location of oceanographic stations in the Yenisei Gulf: 1 — cruise of R/V «Dmitry Mendeleev» in 1993, 2 — cruise of R/V «Academician Mstislav Keldysh» in 2011, 3 — cruise of R/V «Professor Shtokman» in 2014, 4 — cruise of R/V «Academician Mstislav Keldysh» in 2016, 5 — cruise of «Norilsk Nickel» in 2016, 6 — cruise of «Norilsk Nickel» in 2018, 7 — archive data

ме того, в 2016 и 2018 гг. проводились попутные наблюдения в рейсах дизель-электрохода «Норильский никель» по маршруту Мурманск — Дудинка — Мурманск [16; 17]. В июне 2000 г. была проведена международная береговая экспедиция в районе Дудинки [18; 19]. В экспедициях 1993, 2007 и 2016 гг. на судах ИО РАН работы проходили на разрезах, выполнявшихся по судовой части залива от мостовой его части к зоне смешения. Всего гидрохимические определения в экспедициях ИО РАН проводились на 99 гидрологических станциях, выполненных с 1993 по 2018 гг. Расположение станций показано на рис. 1.

Эти результаты были дополнены архивными материалами из базы данных «Гидрохимия Мирового океана», созданной в лаборатории биогидрохимии ИО РАН [20]. Всего в этой базе по Енисейскому заливу содержатся данные 627 гидрологических станций, полученные с 1931 по 2011 гг.

Во всех экспедициях гидрохимические определения велись по стандартным методикам [21; 22], принятым в отечественной практике. При работе в водах с большим количеством взвешенного вещества пробы для определения биогенных элементов предварительно фильтровались через фильтры 0,45 мкм. В пробах с заметной глазу окраской воды колориметрические определения минерального фосфора и силикатов корректировались на цветность вод [21—22].

Был проведен расчет динамики содержания растворенного неорганического фосфора dP_{min} и растворенного кремния dSi по линии смещения река-море. Методика расчета, ранее примененная для растворенного неорганического углерода C_{tot} , подробно изложена в [23; 24]. Отрицательная величина разности реально наблюдавшейся и расчетной величин означает, что происходит поглощение из воды данного вещества, положительная — что имело место выделение этого вещества в воду.

Кроме того, по разрезу была подсчитана величина кажущегося потребления кислорода (AOU — Apparent Oxygen Utilization), которая представляет собой разность между равновесной концентрацией кислорода и его реальной концентрацией. Расчет величины равновесной с атмосферой концентрации кислорода O_{eq} (μM) проводился с использованием соотношения, приведенного в [25]. Избыток кислорода (AOU < 0) свидетельствует о преобладании продукционных процессов над деструкционными, его дефицит (AOU > 0) — об увеличении доли деструкционных процессов [26].

Определение характеристик химического стока рек — не столь простая задача. По одновременно измеренным и даже по «средним многолетним» значениям содержания того или иного гидрохимического параметра сложно достоверно судить о его содержании в речном стоке. В зависимости от фазы гидрологического режима состав стока может серьезно меняться. Происходит сезонная смена источников питания, а для средних и малых рек еще значительна роль гидрометеорологических условий в бассейне водосбора. Известно, что зимние концентрации растворенных химических элементов в реках умеренных и высоких широт увеличиваются в несколько раз благодаря тому, что атмосферные, склоново-грунтовые и почвенно-грунтовые источники питания практически полностью подавляются, основную роль играют подземные источники [27; 19]. Возрастает содержание биогенных элементов, особенно кремния и азота в нитратной и аммонийной формах. Увеличивается и минерализация воды. Кроме сезонных изменений, состав растворенного стока может испытывать и межгодовые изменения, которые зависят от увлажнения бассейна водосбора, следовательно, и от

объема стока. Работы на судне «Норильский никель» выполнялись в период ранней весны еще до вскрытия реки в 2016 г. (30 марта — 5 апреля) или сразу после волны половодья в 2018 г. (29 июня — 1 июля). Экспедиция 2016 г. на НИС «Академик Мстислав Келдыш» проходила практически за волной половодья (24—28 июля). В 2014 г. работы шли в период летней межени (22 августа), а в 1993 и 2011 гг. — на смене летнего и осеннего состояния.

Вклад в изменчивость химического состава вод Енисея вносит еще и присутствие вод, поступающих с различных участков водосбора, которые могут достаточно долго сохранять индивидуальные свойства в виде отдельных струй. По данным работ 2000 г. по створу Енисея, содержание фосфатов на поверхности менялось от 0,36 до 0,60 μM, нитратного и аммонийного азота — от 0,38 до 0,80 и от 0,61 до 1,06 μM соответственно [18; 28]. Еще для Енисея значение имеет приток с местного водосбора дельты (так называемый боковой приток) на участке замыкающий створ — вершина дельты, его величина оценивается более чем в 40 км³ в год [9].

И наконец, при работах с мористой части далеко не всегда удается достичь полностью пресных вод, захватывающих весь профиль до дна. При наших работах чисто речных вод удавалось достичь в 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев», 59-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» и при попутных работах на судне «Норильский никель». Когда нет уверенности, что удалось достичь именно речной воды, для оценки гидрохимических характеристик можно применить регрессионный анализ. Подобный подход был удачно применен при исследовании распределения речных вод по акватории Карского моря [29; 30]. В табл. 1 приведены величины самой низкой минерализации вод и некоторые гидрохимические характеристики, полученные при минимальных значениях минерализации в этих экспедициях и полученные по уравнению регрессии.

Применение уравнения регрессии для оценки гидрохимических характеристик речной воды, возможно, позволяет избежать ошибок, связанных с неоднородностью состава речных вод. Воды приустьевой зоны представляют собой продукт смешения вод приемного бассейна и речной воды. Расчет по уравнению регрессии дает характеристики некой «средней речной воды», поступающей с материковым стоком и смешанной с поверхностными морскими водами. С некоторыми допущениями по этой «средней воде» можно судить о составе вод, характеризующем некий промежуток времени.

Результаты и обсуждение

Одним из наиболее распространенных индикаторов присутствия речных вод признается величина отношения общей щелочности к солёности (Alk/S), называемая удельной щелочностью (УЩ). При УЩ более 0,07 можно уверенно говорить о значительном присутствии речных вод [1; 3]. Распределение величины УЩ на разрезах, выполненных в 1993, 2011

и 2016 гг., показало, что во время всех съемок поверхностные воды всего разреза были под ощутимым воздействием материкового стока. Но сильнее всего воздействие Енисея проявилось в 2011 г. Речные воды были обнаружены севернее, чем в другие годы, и по всему разрезу слой вод с присутствием материкового стока (УЩ более 0,07) был значительно мощнее. Это может быть объяснено тем, что в 2011 г. сток реки был наибольшим — 658 км³. В 1993 и 2016 гг. величина стока была 551 и 531 км³ соответственно.

Зона смешения речных и морских вод, как и у большинства крупных рек, имеет сложное строение и состоит из двух частей — вертикальной фронтальной зоны, расположенной в речной части, и горизонтальной, следы которой прослеживаются практически до конца разрезов (рис. 2). В 2016 г. видна только часть горизонтального эстуарного фронта, до речных вод, занимающих весь столб воды, дойти не удалось. Минимальная минерализация, отмеченная на разрезе в 2016 г., составляла 0,44 г/кг, что почти на порядок выше, чем с 1993 по 2011 гг. (см. табл. 1). Но величина

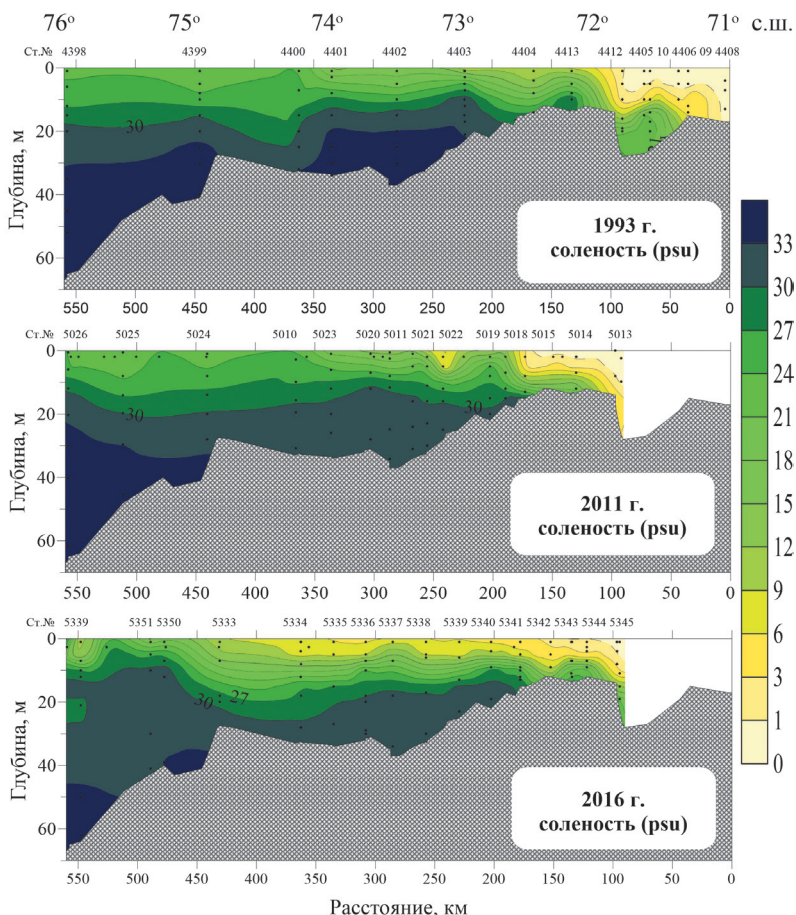


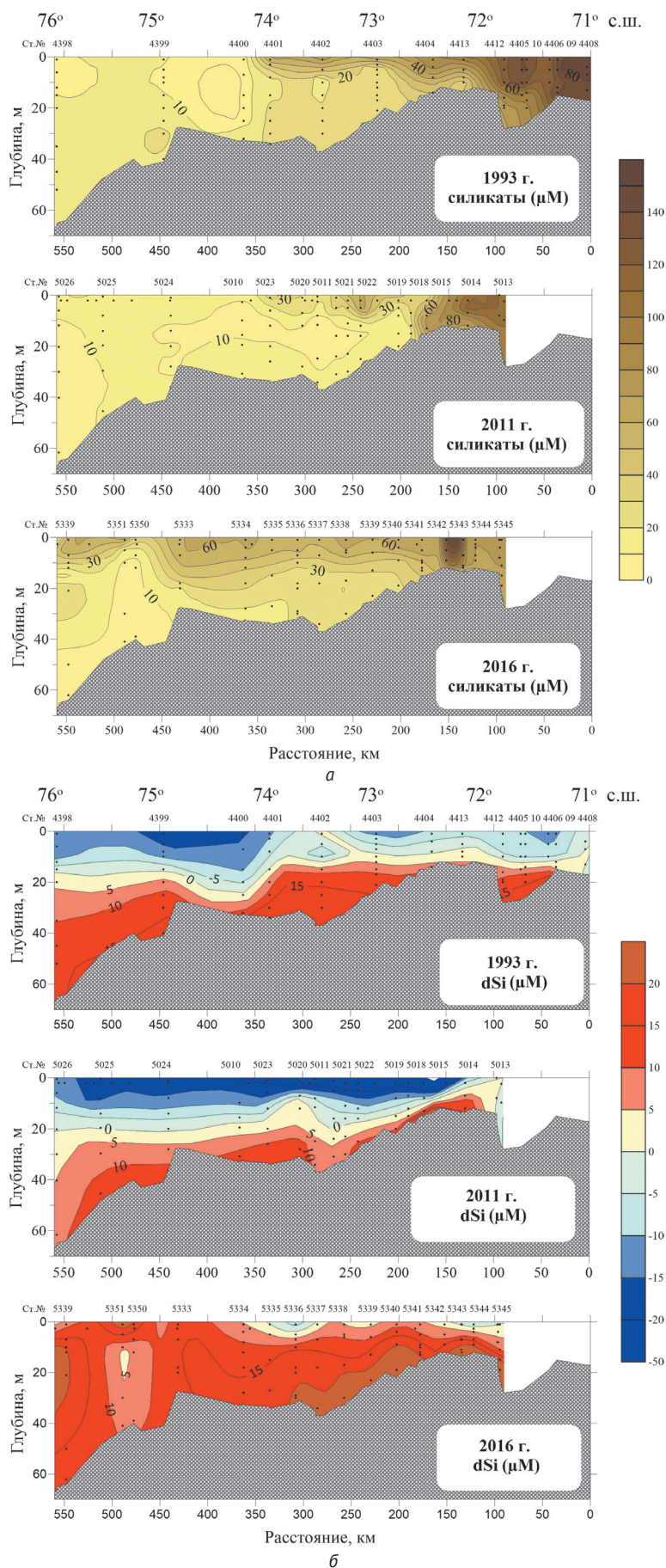
Рис. 2. Распределение солености (psu) на разрезе в Енисейском заливе по результатам работ 1993, 2011 и 2016 гг.
Fig. 2. Sectional distribution of salinity (psu) in the Yenisei Gulf based on the data of cruises in 1993, 2011, and 2016

Таблица 1. Величина гидрохимических параметров в Енисейском заливе по результатам измерений при минимальной минерализации и рассчитанных по уравнениям регрессии для минерализации 0,04 г/л

Источник данных	S_{min} , ед. psu	Alk, мг-экв/л	Si, μ M	PO_4 , μ M	$NO_2 + NO_3$	NH_4
49-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (сентябрь 1993 г.)	0,046	1,193 * 0,897 **	82,00 * 78,04 **	0,20 * 0,14 **	1,33 *	5,23 *
59-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь 2011 г.)	0,063	0,958 * 0,969 **	111,82 * 99,14 **	0,19 * 0,19 **	0,33 *	1,93 *
128-й рейс НИС «Профессор Штокман» (август 2014 г.)	1,093	0,705 * 0,597 **	56,65 * 66,13 **	1,35 * 0,79 **	1,08 *	5,69 *
66-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (июль 2016 г.)	0,438	0,690 * 0,530 **	68,75 * 79,3 **	0,12 * 0,09 **	0,29 *	0,10 *
Судно «Норильский никель» (апрель 2016 г.)	0,120	1,59 * 1,62 **	118,5 * 128,8 **	0,61 * 0,50 **	15,08 *	
Судно «Норильский никель» (июнь 2018 г.)	0,025	0,462 *	87—101 *	0,58—0,80 *	1,46 *	
Архивные данные (теплое время года)	0,036	1,193 * 0,686 **	112,16 * 60,7 **	0,19 * 0,20 **	0—3 *	0—12 *

* Измерения при минимальной минерализации.

** Расчет по уравнению регрессии.



на Alk и содержание силикатов в 2016 г. в южной части разреза имели более характерные для речных вод значения. Величина Alk была почти в половину меньше, чем в другие годы, а содержание кремния в полтора раза выше.

На разрезах наибольшее содержание силикатов наблюдалось в самой южной (речной) части за исключением 2016 г., когда максимальное содержание кремния (145 μM) было отмечено практически на створе Сопочной Карги, а выше по течению снижалось до 60–70 μM. С глубиной и по направлению к мористой части содержание кремния уменьшалось. Минимум (2–4 μM) отмечался в водах с максимальной соленостью (рис. 3а).

Очень отличалось распределение величины dSi по разрезам. В 1993 и 2007 гг. практически во всем поверхностном слое до 20 м силикаты активно поглощались из воды, величина dSi доходила до –80 μM в 2007 г. Вероятно, это результат деятельности диатомового фитопланктона, хотя свой вклад могла внести и сорбция кремния в зоне смешения вод. Увеличение содержания силикатов наблюдалось в придонном слое. Величина dSi была от +27 μM до +70 μM. В 2016 г. практически на всем разрезе наблюдалось увеличение силикатов до 98 μM. Отрицательные или нулевые величины dSi отмечены на поверхности на нескольких станциях (рис. 3б). По [8] содержание силикатов в заливе составляло от 70 до 110 μM. По данным [18], средняя концентрация силикатов в реке была 80 μM, по архивным данным — от 0,1 до 295,5 μM.

Распределение растворенного неорганического фосфора (фосфатов) на разрезах было не столь сложным. Наименьшее их

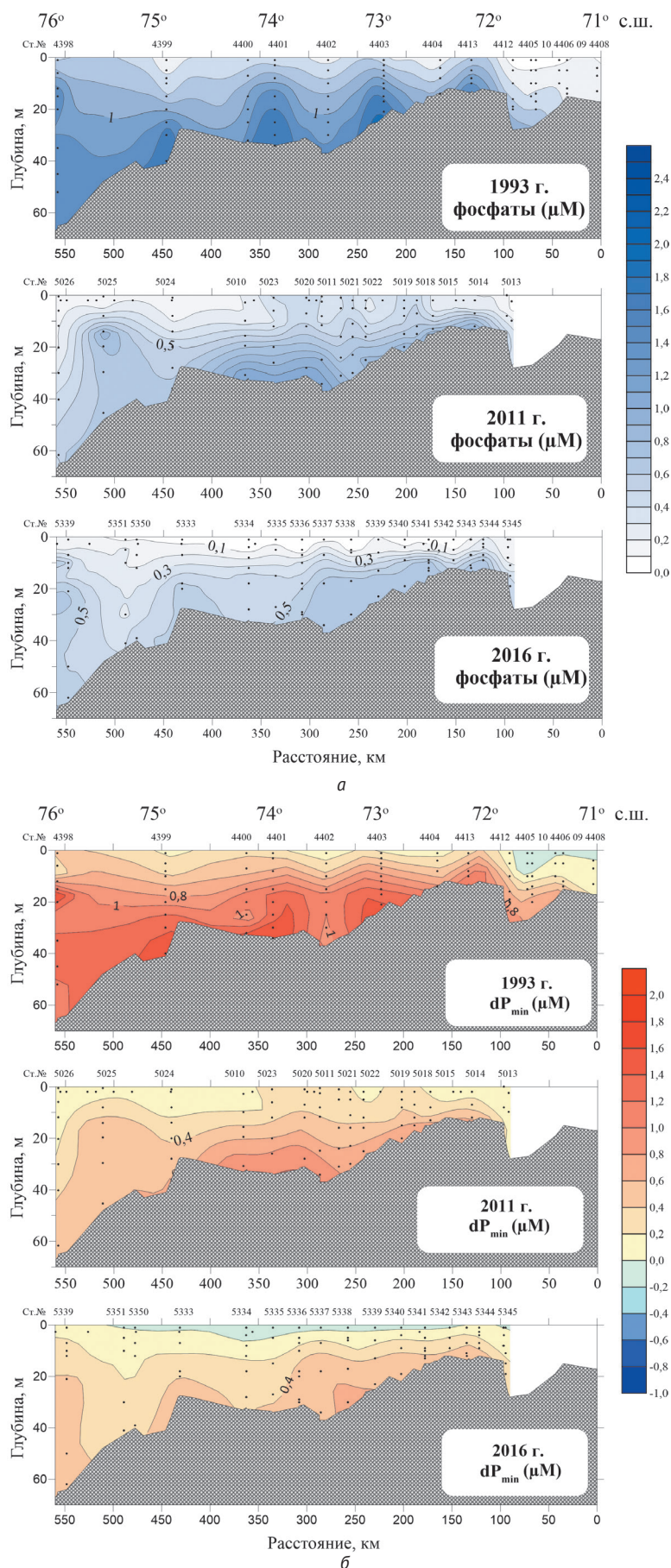
Рис. 3. Распределение на разрезе в Енисейском заливе: а — содержания растворенного кремния (μM), б — величины dSi (μM), по результатам работ 1993, 2011 и 2016 гг.

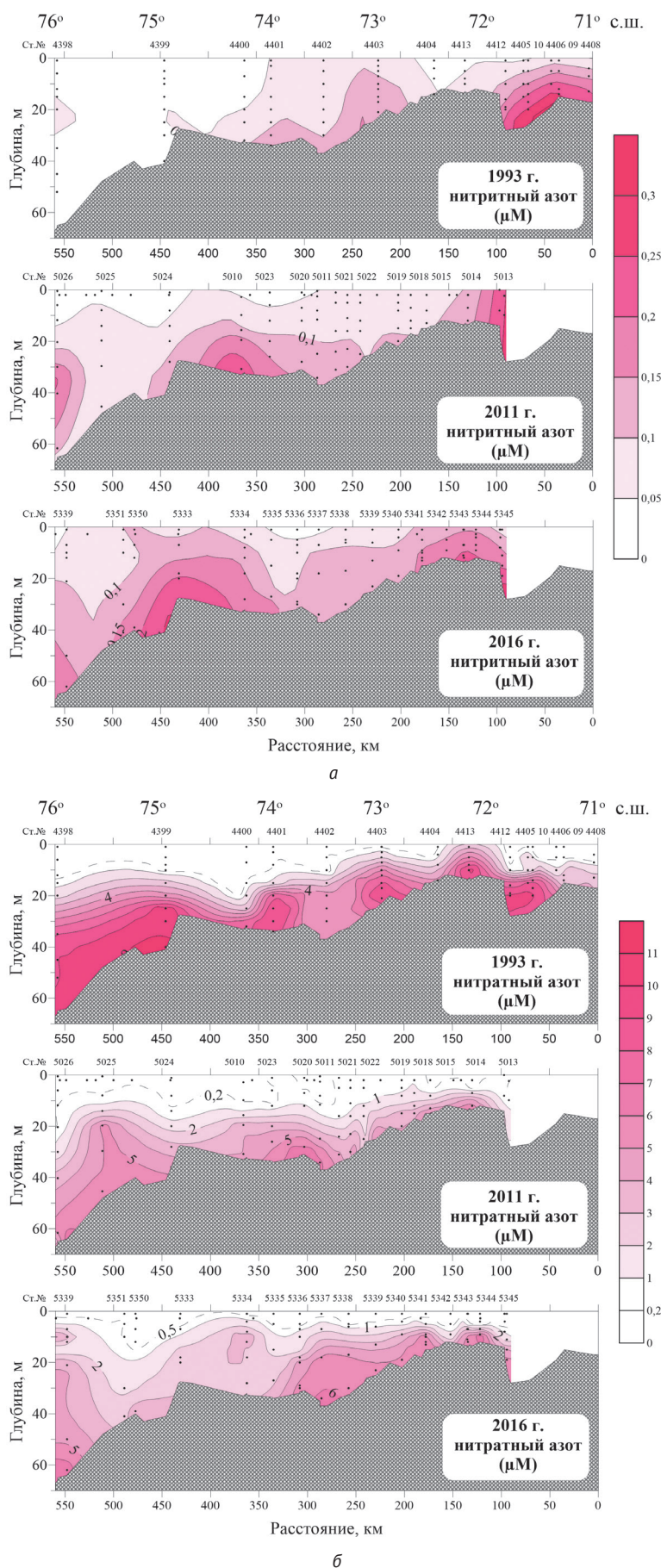
Fig. 3. Sectional distribution in the Yenisei Gulf: а — content of dissolved silicon (μM), б — dSi values (μM) based on the data of cruises in 1993, 2011, and 2016

содержание отмечалось в поверхностном слое, где проходит поглощение их в процессе фотосинтеза. С глубиной содержание фосфатов росло, особенно глубже скачка плотности. В придонных водах часто отмечались локальные максимумы содержания фосфатов в местах, где есть условия для накопления в осадках ОВ. В первую очередь это геохимический барьер при контакте морских и речных вод и отрицательные формы рельефа на дне русла. Это наблюдалось и во время всех съемок, причем практически в одних и тех же местах по разрезу. В 1993 г. содержание фосфатов было выше по всему столбу воды, чем по другим съемкам. Так, среднее содержание фосфатов в верхнем 10-метровом слое в 1993 г. было $0,43 \mu\text{M}$, в остальные годы — около $0,2 \mu\text{M}$. По данным [18], среднее многолетнее содержание фосфатов в воде Енисея — $0,32 \mu\text{M}$, по архивным материалам — от аналитического нуля до $3,8 \mu\text{M}$. Величина dP в 1993 г. показывает, что процессы выделения неорганического фосфора в воду шли в три-четыре раза активнее, чем в другие годы (dP от $-0,11$ до $+2,42 \mu\text{M}$). Поглощение фосфатов наблюдалось только в тонком 5-метровом слое. В 1993 г. это наблюдалось только в речной части разреза, до контакта с морской водой. В 2016 г. поглощение фосфатов наблюдалось в центральной части разреза (рис. 4).

По данным [18], среднее многолетнее содержание нитратного азота (нитратов) в воде Енисея — в пределах $1,0$ – $2,8 \mu\text{M}$, а по данным экспедиции в июне 2000 г. — в среднем $0,7 \mu\text{M}$. По архивным данным, концентрация нитратов в водах нижнего

Рис. 4. Распределение на разрезе в Енисейском заливе: а — содержания растворенного неорганического фосфора (μM), б — величины dP (μM). По результатам работ 1993, 2011 и 2016 гг.
Fig. 4. Sectional distribution in the Yenisei Gulf: а — content of dissolved mineral phosphorus (μM), б — dP values (μM). Based on the data of cruises in 1993, 2011, and 2016





течения Енисея и в заливе — от аналитического нуля до $9,85 \mu\text{M}$, среднее — $4,1 \mu\text{M}$. Это близко к данным 1993—2016 гг. Распределение нитратов (рис. 5а) по разрезам близко к распределению фосфатов. Минимальное, вплоть до аналитического нуля, содержание в поверхностных водах (до 10—20 м). Повышенное содержание нитратов в нижней части разреза совпадает с минимальными значениями насыщения кислорода и максимальным содержанием фосфатов.

Согласно архивным данным содержание нитритного азота (нитритов) в нижнем течении реки и в заливе менялось от аналитического нуля до $1,14 \mu\text{M}$. Содержание нитритов по результатам работ 2000 г. — $0,01$ — $0,08 \mu\text{M}$. Во время работ на разрезе на судах ИО РАН максимальное содержание нитритов в придонных водах речной части разреза ($0,47 \mu\text{M}$) отмечено в 2016 г. Во все годы повышенное содержание нитритов было в придонных водах речной части, где проходил геохимический барьер, связанный с контактом речных и морских вод (рис. 5б). Второй максимум наблюдался тоже в придонных водах непосредственно перед свалом глубин, между 74° и 75° с. ш. Если рассматривать распределение нитритов в верхнем 10-метровом слое, в 2016 г. их содержание значительно выше, чем в остальные годы, что может свидетельствовать о незавершенности процессов окисления O_2 .

Значительно отличалось распределение аммонийного азота по разрезу в различные годы. В 1993 г. его максимальное содержание ($11,6 \mu\text{M}$) отмечено в придонных водах у выхода в за-

Рис. 5. Распределение на разрезе в Енисейском заливе: а — содержания нитратного азота (μM), б — нитритного азота (μM). По результатам работ 1993, 2011 и 2016 гг.

Fig. 5. Sectional distribution in the Yenisei Gulf: а — content of nitrate nitrogen (μM), б — nitrite nitrogen (μM). Based on the data of cruises in 1993, 2011, and 2016

лив Каменного Енисея. До Горла содержание аммонийного азота достаточно высокое по всей толще (около 1 μM) без значимых экстремумов. Севернее Сопочной Карги содержание аммонийного азота начинает убывать к мористой части до практически аналитического нуля. В 2011 г. мы не заходили столь глубоко в залив. Максимумы содержания аммонийного азота отмечены немного ниже Горла в придонных водах (6,8 μM) и на поверхности воды (1,4 μM). Ниже по течению распределение по разрезу достаточно ровное и высокое — 0,8—1,2 μM . В 2016 г. содержание аммонийного азота по всему разрезу небольшое, в среднем 0,15 μM . Заметного повышения в придонных водах не обнаружено. В 2016 г. незадолго до отбора проб прошло половодье, ОБ, накопленное в осадках за этот период, еще не начало активно окисляться. Кроме того, мощный весенний паводок привел к обновлению вод залива. По архивным данным, содержание аммонийного азота наблюдалось от аналитического нуля до 11,6 μM .

Если судить по распределению растворенного кислорода и степени его насыщения во время проведения работ 1993, 2011 и 2016 гг., биологическая активность вод в заливе была невысокой. В верхнем 10-метровом слое среднее содержание кислорода было 7,0—7,8 мл/л, а насыщение — от 66% до 105% по всем трем сямкам. В 1993 г. насыщение вод кислородом более 100% наблюдалось в поверхностных водах в центральной и мористой частях разреза, в 2011 г. практически по всему разрезу отмечен слой повышенного содержания кислорода на границе скачка плотности (примерно от 10 до 20 м). Существование такого слоя весьма характерно для Карского моря в летний сезон [31]. В 2016 г. наблюдались только фрагменты этого слоя в мористой части разреза. Содержание растворенного кислорода в речной части разреза было невысоким, но росло по направлению к мористой части. Это связано с понижением температуры вод северной части разреза, с преобладанием процессов окисления ОБ в речных водах и усилением вклада фотосинтетических процессов, характерным для границы речных и морских вод. Насыщение вод кислородом большей части вод было ниже 100%.

Естественно, распределение величины AOU по разрезу близко к распределению насыщения вод кислородом (рис. 6). Увеличение AOU проходило в 1993 г. в узком поверхностном слое центральной и мористой частей разреза. В 2011 и 2016 гг. области увеличения содержания кислорода отмечены фрагментарно в слое галоклина. В придонных водах кислород активно поглощается (до 340 μM), особенно в отрицательных формах рельефа русла. Но признаков гипоксии, которая часто возникает в приустьевых районах [32], не наблюдалось, насыщение кислородом не опускалось ниже 50%.

По гидрохимическим характеристикам видно, что на разрезе есть три основные области, где проходит

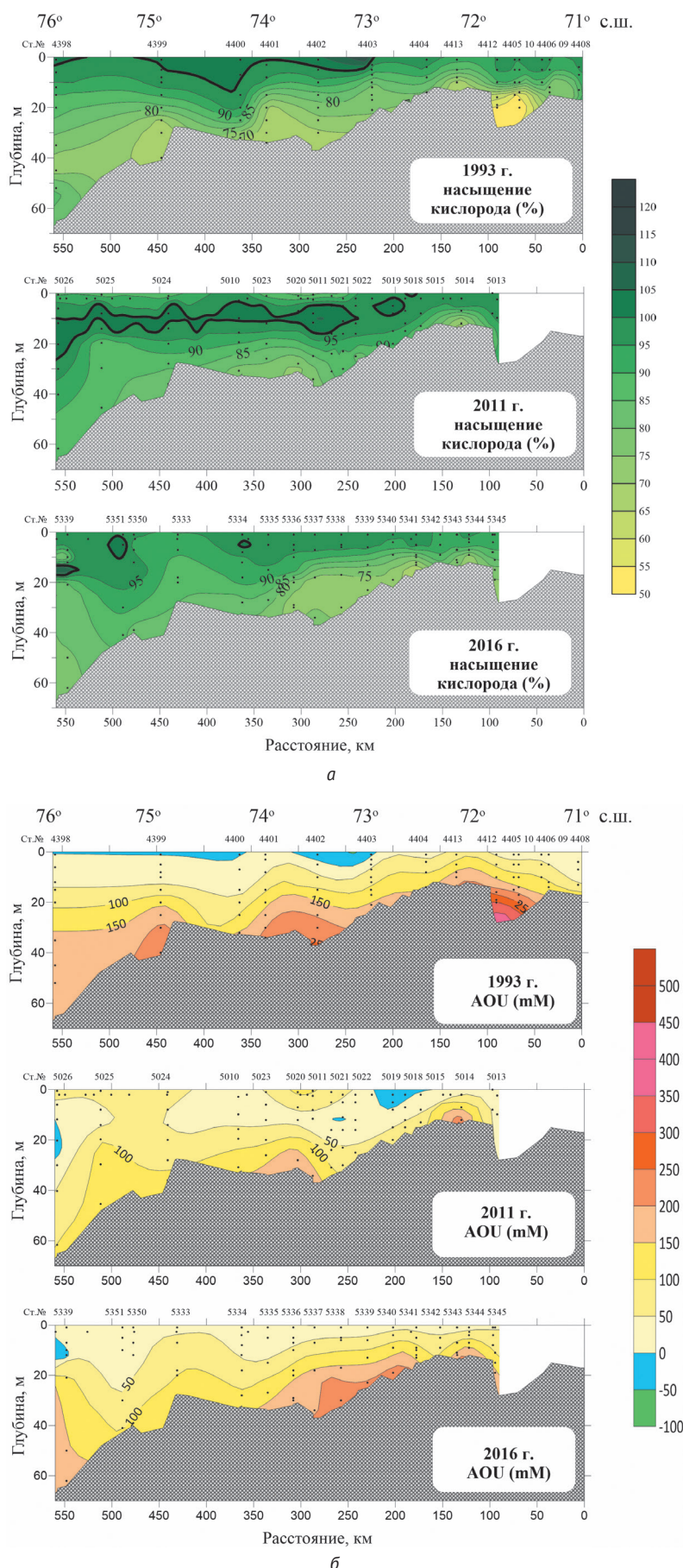
массовое осаждение и окисление в верхнем слое осадков ОБ. Это область южнее 72° с. ш., связанная с массовым осаждением растворенных и взвешенных веществ на геохимическом барьере, что подтверждается и минерализацией вод. В придонных водах наблюдаются рост всех биогенных элементов и снижение содержания растворенного кислорода. Увеличение здесь содержания фосфатов, аммонийного и общего азота свидетельствует о высокой интенсивности деструкционных процессов и «молодости» ОБ в осадке.

Две другие области разложения ОБ находятся ниже по течению (между 73° и 74° и севернее 75° с. ш.) и скорее всего возникли на «орографическом» барьере, где изменение динамических характеристик потока и особенность рельефа дна залива создают условия для осаждения взвеси и где рельеф дна залива образует заметное понижение, отгороженное от мористой части участком с небольшими глубинами. Повышение содержания биогенных элементов и снижение содержания кислорода выражены здесь слабее, чем выше по течению. Наиболее заметно здесь повышение нитратного азота. Преобладание полностью окисленных форм азота и незначительное увеличение фосфатов свидетельствуют о том, что ОБ, находящееся в верхнем слое осадков и придонной воде, уже прошло основные стадии окисления.

В 2011 г. была проведена оценка диффузионных потоков биогенных элементов на границе вода-дно [33]. На части станций разреза проводились гидрохимические анализы в придонной воде (на двух-четырёх горизонтах в слое 0,5 м от дна) и в иловой воде верхнего слоя осадка. Оценка диффузионных потоков на границе вода-дно была проведена методом «иловых вод» [34]. Коэффициент диффузии ионов для разведенных растворов был рассчитан по [35].

По гранулометрическому составу исследуемые осадки в пределах Енисейского залива принадлежали к тонкой фракции (пелиты, алевропелиты). Вероятно, в силу большой поверхности и, следовательно, интенсивности ионного обмена потоки биогенных элементов из осадка были относительно невелики [33]. Интенсивность поступления химических элементов из верхнего слоя осадков составляла для фосфора от –0,005 до 0,029 $\mu\text{M}/\text{м}^2$ в сутки, для кремния от –0,452 до 1,566 $\mu\text{M}/\text{м}^2$ в сутки, для общего азота от 0,112 до 4,114 $\mu\text{M}/\text{м}^2$ в сутки и для общего углерода от –0,353 до 0,210 $\mu\text{M}/\text{м}^2$ в сутки.

По интенсивности потоков C_{tot} и биогенных элементов можно выделить пять зон в зависимости от удаленности от устья Енисея. Первая — непосредственно у самого устья, где интенсивность потоков была минимальной на всем разрезе. Вторая зона, где Енисей впадает в залив, — это первый максимум интенсивности потоков биогенных элементов через границу вода-дно. Здесь находится область лавинной седиментации, и можно ожидать наибольшей



скорости осадконакопления. Третья зона — участок уменьшения величины потоков химических элементов из осадка. Наиболее тяжелая часть взвеси уже выпала в осадок выше по течению, а скорость течения еще достаточно высока для переноса тонкой взвеси. Четвертая зона располагается на бровке шельфа, здесь снова наблюдается увеличение потоков химических элементов из-за осаждения тонкой взвеси, как поступающей из Енисейского залива, так и переносимой прибрежными течениями по шельфу. Далее на склоне снова наблюдается минимум величин потоков, что можно считать пятой зоной. Для иловых вод осадков данной зоны характерны низкие концентрации химических элементов по сравнению с зонами максимумов. Это может быть связано с тем, что часть осадков сползает по склону. Скорость современного осадконакопления здесь невысока. Интересно, что в глубоководных осадках у подошвы склона снова наблюдается повышение величины потоков, но это уже вне приустьевой зоны реки.

Если сравнить содержание некоторых гидрохимических параметров на южных, наиболее пресных частях Обского и Енисейского разрезов (табл. 2), можно заметить, что почти во все годы содержание растворенного кремния, карбонатного углерода и величина Alk в водах Енисейского залива были выше, чем в Обской губе. В 2016 г., наоборот, содержание этих параметров в Обской губе было не только значительно выше средних многолетних величин, но и выше, чем в водах Ени-

Рис. 6. Распределение на разрезе в Енисейском заливе: а — насыщения вод кислородом (%), толстой линией показана изолиния 100% насыщения; б — величины кажущегося потребления кислорода (μM). По результатам работ 1993, 2011 и 2016 гг.

Fig. 6. Sectional distribution in the Yenisei Gulf: а — oxygen saturation of water (%), bold line shows the isoline of 100% saturation; б — values of apparent oxygen consumption (μM). Based on the data of cruises in 1993, 2011, and 2016

Таблица 2. Значение общей щелочности, содержания растворенного кремния и карбонатного углерода в водах с минимальной соленостью в Обской губе и Енисейском заливе по результатам экспедиций разных лет

Год	Щелочность, мг-экв/л		Кремний, µМ		Неорганический углерод, мг/л	
	Обь	Енисей	Обь	Енисей	Обь	Енисей
1993	0,71	1,23	37	81	9	15
2000	—	—	62—67	76—82	—	—
2007	0,66	—	65	—	8	—
2011	—	1,02	—	107	—	13
2013	0,98	—	30	—	12	—
2014	0,40	0,75	9	55	5	9
2016	1,13	0,75	91	60	13	10

сейского залива. Возможно, это связано с тем, что в этом году удалось застать в Енисейском заливе остаток весенней воды. В Обской губе, напротив, полые воды в этот год еще не достигли северной ее части, что связано с тем, что время весенней высокой воды в Оби растянуто во времени по сравнению с Енисеем [30].

Заключение

В работе [8] отмечено, что основное отличие гидрохимического режима Енисейского залива и Обской губы связано с отношением величины стока и объема этих заливов, т. е. от коэффициента водообмена. По этому показателю Обскую губу можно скорее сравнивать с водохранилищем [11], на выходе из которого воды значительно изменены и их состав мало похож на состав вод Оби. Из эстуария Енисея в море поступают относительно малотрансформированные речные воды. Автор пишет, что смешение речных и морских вод в Енисейском заливе «происходит преимущественно по консервативному принципу». Приведенные нами данные показывают, что в пределах залива происходят значительные изменения содержания растворенного углерода и биогенных элементов и их распределение в заливе значительно отличается от консервативного за исключением величины Alk.

Содержание биогенных элементов не могло лимитировать фотосинтетическую активность. Ненулевое содержание биогенных элементов может свидетельствовать не только о сезонном снижении фотосинтетической активности, но и о высоком содержании ОВ в речных водах. Как и для большинства высокоширотных рек, относительно невысоким на разрезе было содержание нитратного азота, которое часто не превышало содержание нитритного азота. Это связано с небольшой скоростью протекания биохимических процессов из-за низкой

температуры и/или с тем, что процессы разложения ОВ находятся в начальной стадии и окисление азота органического вещества еще не полностью завершено.

По гидрохимическим показателям на разрезе выделяются две основные области, где проходит массовое осаждение и окисление ОВ в верхнем слое осадков, где в придонной воде наблюдалось значительное увеличение содержания минерального фосфора, соединений азота и двуокиси углерода. Это так называемый первый геохимический барьер, где в придонных водах наблюдались рост всех биогенных элементов и значительное снижение содержания растворенного кислорода. Эта область окисления связана с массовым осаждением растворенных и взвешенных веществ на геохимическом барьере.

Вторая область разложения ОВ находится ниже по течению, где рельеф дна залива образует заметное понижение, отгороженное от мористой части участком с небольшими глубинами. Здесь, на «орографическом» барьере, изменение динамических характеристик потока и особенность рельефа дна залива создают условия для осаждения несомой водой взвеси. Наиболее заметны повышение содержания нитратного азота и снижение относительного содержания кислорода. Преобладание полностью окисленных форм азота и незначительное увеличение фосфатов свидетельствуют о том, что ОВ, находящееся в верхнем слое осадков и придонной воде, уже прошло основные стадии окисления.

С этими зонами связаны и высокие скорости потоков биогенных веществ из осадков в воду. Там же, где возможна высокая скорость движения придонных вод, напротив, наблюдается низкая интенсивность потоков биогенных элементов. Здесь происходит осаждение преимущественно грубой фракции взвешенного материала. Биогенные элементы не задерживаются в таких осадках, а значительная

прочность к разрушению частиц этих осадков препятствует постоянному потоку элементов из них.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН № 0149-2019-0008 и проекта РНФ № 19-17-00196.

Литература

1. Смирнов А. А. Проникновение речных вод в Карское море и море Лаптевых // Тр. Арктич. науч.-исслед. ин-та. — 1955. — Т. 72, вып. 2. — С. 92—104.
2. Михайлов В. Н. Устья рек России и сопредельных стран: Прошлое, настоящее и будущее. — М.: ГЕОС, 1997. — 413 с.
3. Маккавеев П. Н., Мельникова З. Г., Полухин А. А. и др. Гидрохимическая характеристика вод западной части Карского моря // Океанология. — 2015. — Т. 55, № 4. — С. 540—551. — DOI: 10.7868/S0030157415040115.
4. Carmack E., Winsor P., Williams W. The contiguous panarctic Riverine Coastal Domain: A unifying concept // Progress in Oceanography. — 2015. — Vol. 139. — P. 13—23. — DOI: 10.1016/j.poc.2015.07.014.
5. Зацепин А. Г., Завьялов П. О., Кремянецкий В. В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // Океанология. — 2010. — Т. 50, № 5. — С. 698—708.
6. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. — 1994. — Т. 34, № 5. — С. 735—747.
7. Гордеев В. В. Геохимия системы река-море. — М.: Изд-во Матушкина И. И., 2012. — 452 с.
8. Лапин С. А. Особенности формирования пресноводного стока в эстуарных системах Оби и Енисея // Тр. ВНИРО. — 2017. — Т. 166. — С. 139—150.
9. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Ред. Н. И. Алексеевский. — М.: ГЕОС, 2007. — 585 с.
10. Gordeev V. V., Martin J. M., Sidorov I. S., Sidorova M. V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // American J. of Science. — 1996. — Vol. 296 (6). — P. 664—691.
11. Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ. — М.: Перо. 2014. — 399 с.
12. Никаноров А. М., Иванов В. В., Брызгалов В. А. Реки российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. — Ростов н/Д.: Изд-во «НОК», 2007. — 280 с.
13. Романкевич Е. А., Ветров А. А. Цикл углерода в арктических морях России. — М.: Наука, 2001. — 301 с.
14. Лисицын А. П., Виноградов Е. М. Международная высокоширотная экспедиция в Карское море (49-й рейс научно-исследовательского судна «Дмитрий Менделеев») // Океанология. — 1994. — Т. 34, № 5. — С. 643—651.
15. Флинт М. В., Поярков С. Г. Комплексные исследования экосистемы Карского моря (128-й рейс научно-исследовательского судна «Профессор Штокман») // Океанология. — 2015. — Т. 55, № 4. — С. 723—726. — DOI: 10.7868/S0030157415040073.
16. Сажин А. Ф., Мошаров С. А., Романова Н. Д. и др. Планктонное сообщество Карского моря ранней весной 2016 г. // Океанология. — 2017. — Т. 57, № 1. — С. 246—248. — DOI: 10.7868/S0030157417010178.
17. Федулов В. Ю., Беляев Н. А., Колоколова А. Н., Сажин А. Ф. Базовые геохимические параметры верхнего слоя вод юго-западной части Карского моря в зимний период // Океанол. исслед. — 2018. — Т. 46, № 1. — С. 115—122. — DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).9.
18. Holmes R. M., Peterson B. J., Zolotov V. V. et al. Nutrient Chemistry of the Ob' and Yenisey Rivers, Siberia: Results from June 2000 Expedition and Evaluation of Long-term Data Sets // Marine Chemistry. — 2001. — Vol. 75. — P. 219—227. — DOI: 10.1016/S0304-4203(01)00038-X.
19. 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. В. В. Зуев, А. В. Куровских, С. Л. Шварцев. — Томск, 2002. — С. 8—20.
20. Гусарова А. Н., Чернякова А. М., Вакуленко Н. В. Об основах создания банка гидрохимических данных // Эколог. системы и приборы. — 2000. — № 10. — С. 34—37.
21. Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.242-92. — СПб.: Гидрометеиздат, 1993. — 264 с.
22. 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.
23. Маккавеев П. Н. Растворенный неорганический углерод в водах Карского моря и устьях рек Оби и Енисей // Океанология. — 1994. — Т. 34, № 5. — С. 668—672.
24. Маккавеев П. Н., Полухин А. А., Селиверстова А. М. и др. Динамика биогенных элементов в приустьевом районе реки Лены: результаты экспедиций в сентябре 2015 и 2017 гг. // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 56—67. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-56-67.
25. Weiss R. F. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater // Deep-Sea Res. — 1970. — Vol. 17. — P. 721—735.
26. Libes S. Introduction to Marine Biogeochemistry. — 2nd ed. — San Diego: Academic Press, 2009. — 909 p.
27. Воронков П. П. Гидрохимия местного стока Европейской территории СССР. — Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1970. — 187 с.
28. Makkaveev P. N., Stunzhas P. A., Khlebopashev P. V. et al. Flux of nutrients from Ob' and Yenisey rivers to the Arctic Ocean: Results from June 2000 expedition // Proceedings of the Arctic Regional Centre. — Vol. 3, Chap. 2: Hydrochemistry and Greenhouse Gases. — Vladivostok, 2001. — P. 97—106.

29. Стунжас П. А. Разделение вод Енисея и Оби в Карском море по щелочности и кремнию // Океанология. — 1995. — Т. 35, № 2. — С. 215—219.
30. Полухин А. А., Маккавеев П. Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря // Океанология. — 2017. — Т. 57, № 1. — С. 25—37. — DOI: 10.7868/S0030157417010142.
31. 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.
32. Скибинский Л. Э., Иванов Г. И., Романкевич Е. А., Пономаренко Т. В. Экологическое состояние Печорского моря // Печорское море: Системные исследования. — М.: Изд-во «Море», 2003. — С. 365—392.
33. Кодрян К. В., Леин А. Ю., Маккавеев П. Н. и др. Потоки биогенных элементов на границе вода-дно в Енисейском заливе (59 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») // Геология морей и океанов: Материалы XX Международной научной конференции (школы) по морской геологии. — Т. 4. — М.: ГЕОС, 2013. — С. 65—69.
34. Вершинин А. В., Розанов А. Г. Химический обмен на границе вода-дно в океанах и морях. — М.: ГЕОС, 2002. — 164 с.
35. Boudreau B. P. Diagenetic models and their implementation: modelling transport and reactions in aquatic sediments. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1997. — 414 p.

Информация об авторах

Маккавеев Петр Николаевич, доктор географических наук, заведующий лабораторией, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: makkaveev55@mail.ru.

Полухин Александр Анатольевич, кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: polukhin@ocean.ru.

Налбандов Юрий Ростиславович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: yuri.nalbandov@yandex.ru.

Хлебопашев Павел Вадимович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: pvkh1999@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Маккавеев П. Н., Полухин А. А., Налбандов Ю. Р., Хлебопашев П. В. Динамика биогенных элементов в Енисейском заливе в период открытой воды // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 69—82. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-69-82.

DYNAMICS OF NUTRIENTS IN THE YENISEI GULF DURING THE OPEN WATER PERIOD

Makkaveev P. N., Polukhin A. A., Nalbandov Yu. R., Khlebopashev P. V.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on May 22, 2019

Abstract

The article presents the results of studies of the hydrochemical structure of waters in the Yenisei Gulf, as well as in the adjacent shelf area strongly influenced by the continental runoff. The most significant transformation of the chemical composition of water and suspended solids occurs in the estuarine areas. Changes in the dynamic characteristics of the flow and mixing processes of waters of different composition and origin contribute to this transformation. The estuarine areas, where all dissolved and suspended matter accumulates, are among the most productive areas of the World Ocean. Without knowledge of the processes occurring in the estuarine areas, it is impossible to estimate correctly the amount of substances carried with the continental runoff, this being of particular importance.

The hydrological and hydrochemical data used in the work were obtained in oceanographic expeditions of the SIO RAS in September 1993, September 2011, August 2014, and July 2016. We also used archive data of the Biohydrochemistry Lab. The dynamics of the dissolved forms of silicon and mineral phosphorus in the river-sea estuarine area and the apparent values of oxygen consumption are calculated. The zones of emission and ab-

sorption of nutrients within the estuarine area prove to be practically unchanged in their position despite significant seasonal and interannual variability of the Yenisei chemical runoff. We can highlight two main areas, where mass sedimentation and oxidation of organic matter take place according to hydrochemical tracers. The presented data show that within the Yenisei Gulf, there are significant changes in the content of dissolved carbon and nutrients and their distribution in the Gulf differs significantly from the conservative one. The distribution of hydrochemical parameters relative to mineralization, with the exception of alkalinity, differs from the linear one. The content of nutrients did not limit the development of the Gulf ecosystem during the research period.

Keywords: the Kara Sea, the Yenisei Gulf, river runoff, estuarine area, hydrochemical structure, nutrients dynamics, biological productivity.

The research was supported by the state assignment of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, theme No. 149-2019-0008 (in-situ data processing) and the Russian Scientific Foundation project No. 19-17-00196 (achieve data processing).

References

1. Smirnov A. A. Proniknovenie rechnykh vod v Karskoe more i more Laptevskiy. [Penetration of the river water into the Kara and Laptev Seas]. Tr. Arktich. nauch.-issled. in-ta, 1955, vol. 72, iss. 2, pp. 92—104. (In Russian).
2. Mikhailov V. N. Ust'ya rek Rossii i sprovedel'nykh stran: Proshloe, nastoyashchee i budushchee. [Estuarine areas of Russian and neighbor countries rivers: past, present and future]. Moscow, GEOS, 1997, 413 p. (In Russian).
3. Makkaveev P. N., Melnikova Z. G., Polukhin A. A. et al. Hydrochemical characteristics of the waters in the western part of the Kara Sea. Oceanology, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 485—496. DOI: 10.1134/S0001437015040116.
4. Carmack E., Winsor P., Williams W. The contiguous panarctic Riverine Coastal Domain: A unifying concept. Progress in Oceanography, 2015, vol. 139, P. 13—23. DOI: 10.1016/j.pocean.2015.07.014.
5. Zatsepin A. G., Zavalov P. O., Kremenetskiy V. V., Poyarkov S. G., Soloviev D. M. The upper desalinated layer in the Kara Sea. Oceanology, 2010, vol. 50, no. 5, pp. 657—667.
6. Lisitzin A. P. A marginal filter of the oceans. Okeanologiya, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 735—747.
7. Gordeev V. V. Geokhimiya sistemy reka-more. [Geochemistry of the river-sea system]. Moscow, Izd-vo Matushkina I. I., 2012, 452 p. (In Russian).
8. Lapin S. A. Osobennosti formirovaniya presnovodnogo stoka v estuaryakh sistemakh Obi i Eniseya. [Features of freshwater discharge in estuarine systems of Ob' and Yenisey]. Tr. VNIRO, 2017, vol. 166, pp. 139—150. (In Russian).
9. Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya. [Geoeological state of the Russian Arctic coast and environmental management]. Red. N. I. Alekseevskii. Moscow, GEOS, 2007, 585 p. (In Russian).
10. Gordeev V. V., Martin J. M., Sidorov I. S., Sidorova M. V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean. American J. of Science, 1996, vol. 296 (6), pp. 664—691.
11. Edel'shtein K. K. Gidrologiya ozer i vodokhranilishch. [Hydrology of lakes and reservoirs]. Moscow, Pero, 2014, 399 p. (In Russian).
12. Nikanorov A. M., Ivanov V. V., Bryzgalo V. A. Reki Rossiiskoi Arktiki v sovremennykh usloviyakh antropogen-nogo vozdustviya. [Russian Arctic rivers under anthropogenic impact]. Rostov n/D., Izd-vo "NOK", 2007, 280 p. (In Russian).
13. Romankevich E. A., Vetrov A. A. Tsikl ugleroda v arkticheskikh moryakh Rossii. [The carbon cycle in the Arctic seas of Russia]. Moscow, Nauka, 2001, 301 p. (In Russian).
14. Lisitsyn A. P., Vinogradov E. M. Mezhdunarodnaya vysokoshirotnaya ekspeditsiya v Karskoe more (49-i reis nauchno-issledovatel'skogo sudna "Dmitrii Mendeleev"). [The international high-latitude expedition to the Kara sea (the 49th cruise of the r/v Dmitry Mendeleev)]. Okeanologiya, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 643—651. (In Russian).
15. Flint M. V., Poyarkov S. G. Comprehensive research on the Kara Sea ecosystem (128th Cruise of research vessel Professor Shtokman). Oceanology, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 657—659. DOI: 10.7868/S0030157415040073.
16. Sazhin A. F. et al. The plankton community of the Kara Sea in early spring. Oceanology, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 222—224. DOI: 10.1134/S0001437017010179.
17. Fedulov V. Yu., Belyaev N. A., Kolokolova A. N., Sazhin A. F. Bazovye geokhimicheskie parametry verkhnego sloya vod yugo-zapadnoi chasti Karskogo morya v zimniy period. [Basic geochemical parameters of the upper layer in the south-western part of the Kara Sea in the winter]. Okeanol. issled, 2018, vol. 46, no. 1, pp. 115—122. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).9. (In Russian).
18. Holmes R. M., Peterson B. J., Zulidov V. V. et al. Nutrient Chemistry of the Ob' and Yenisey Rivers, Siberia: Results from June 2000 Expedition and Evaluation of Long-term Data Sets. Marine Chemistry, 2001, vol. 75, pp. 219—227. DOI: 10.1016/S0304-4203(01)00038-X.
19. Makkaveev P. N., Gordeev V. V., Stunzhas P. A. et al. Gidrokhimicheskii stok r. Obi v zimniy period (po materialam rabot v dekabre 2001 goda). [Hydrochemical flow of the Ob' River in the winter period (based on investigations in December 2001)]. Ekologo-biogeokhimicheskie issledovaniya v basseine Obi. Red. V. V. Zuev, A. V. Kurovskikh, S. L. Shvartsev. Tomsk, 2002, pp. 8—20. (In Russian).

20. Guseva A. N., Chernyakova A. M., Vakulenko N. V. Ob osnovakh sozdaniya banka gidrokhimicheskikh dannyykh. [About the basis of creation of hydrochemistry data archive]. *Ekolog. sistemy i pribory*, 2000, no. 10, pp. 34—37. (In Russian).
21. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh vod. RD 52.10.242-92. [Guidelines for the chemical analysis of marine waters]. RD 52.10.242-92. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993, 264 p. (In Russian).
22. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybnokhozyaistvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla raionov Mirovogo okeana. [Guidelines for the chemical analysis of marine and fresh water in the environmental monitoring of fishery reservoirs and promising for the fishing areas of the World Ocean]. Red. V. V. Sapozhnikov. Moscow, Izd-vo VNIRO, 2003, 202 p. (In Russian).
23. Makkaveev P. N. Rastvorenniy neorganicheskii uglerod v vodakh Karskogo morya i ust'yakh rek Ob' i Enisei. [The dissolved inorganic carbon in the Kara Sea and in the mouths of the Ob and Yenisei Rivers]. *Okeanologiya*, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 668—672. (In Russian).
24. Makkaveev P. N., Polukhin A. A., Seliverstova A. M. et al. Dinamika biogennykh elementov v priust'evom raione reki Leny: rezul'taty ekspeditsii v sentyabre 2015 i 2017 gg. [Dynamics of nutrients in estuarine area of the Lena river: results from cruises in September 2015 and 2017]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, no. 2 (30), pp. 56—67. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-56-67. (In Russian).
25. Weiss R. F. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep-Sea Res*, 1970, vol. 17, pp. 721—735.
26. Libes S. Introduction to Marine Biogeochemistry. 2nd edition. San Diego, Academic Press, 2009, 909 p.
27. Voronkov P. P. Gidrokhiimiya mestnogo stoka Evropeiskoi territorii SSSR. [Hydrochemistry of local runoff in the European territory of the USSR]. Leningrad, Gidrometeorol. izd-vo, 1970, 187 p. (In Russian).
28. Makkaveev P. N., Stunzhas P. A., Khlebopashev P. V. et al. Flux of nutrients from Ob' and Yenisey rivers to the Arctic Ocean: Results from June 2000 expedition. *Proceedings of the Arctic Regional Centre*. Vol. 3, chap. 2: Hydrochemistry and Greenhouse Gases. Vladivostok, 2001, pp. 97—106.
29. Stunzhas P. A. Razdelenie vod Eniseya i Obi v Karskom more po shchelochnosti i kremniyu. [Separation of waters of the Yenisei and Ob rivers in the Kara Sea by alkalinity and silicon content]. *Okeanologiya*, 1995, vol. 35, no. 2, pp. 215—219. (In Russian).
30. Polukhin A. A., Makkaveev P. N. Features of the continental runoff distribution over the Kara Sea. *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 19—30. DOI: 10.1134/S0001437017010143.
31. Makkaveev P. N., Stunzhas P. A., Mel'nikova Z. G. et al. Hydrochemical characteristics of the waters in the western part of the Kara Sea. *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 5, pp. 688—697.
32. Skibinskii L. E., Ivanov G. I., Romankevich E. A., Ponomarenko T. V. Ekologicheskoe sostoyanie Pechorskogo morya. [Ecological state of the Pechora Sea. Pechora Sea. Environmental investigations]. Pechorskoe more: Sistemnye issledovaniya. Moscow, Izd-vo "More", 2003, pp. 365—392. (In Russian).
33. Kodryan K. V., Lein A. Yu., Makkaveev P. N. et al. Potoki biogennykh elementov na granitse voda-dno v Eniseiskom zalive (59 reis NIS "Akademik Mstislav Keldysh"). [Nutrients flow in the water-bottom boundary layer in the Yenisey Gulf (59 cruise r/v "Akademik Mstislav Keldysh")]. *Geologiya morei i okeanov: Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (shkoly) po morskoi geologii*. Vol. 4. Moscow, GEOS, 2013, pp. 65—69. (In Russian).
34. Vershinin A. V., Rozanov A. G. Khimicheskii obmen na granitse voda-dno v okeanakh i moryakh. [Chemical exchange in the water-bottom layer in the oceans and the seas]. Moscow, GEOS, 2002, 164 p. (In Russian).
35. Boudreau B. P. Diagenetic models and their implementation: modelling transport and reactions in aquatic sediments. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1997, 414 p.

Information about the authors

Makkaveev Petr Nikolaevich, Doctor of Geography, Head of Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: makkaveev55@mail.ru.

Polukhin Alexander Anatolevich, PhD of Geography, Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: polukhin@ocean.ru.

Nalbandov Yuri Rostislavovich, Senior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: yuri.nalbandov@yandex.ru.

Khlebopashev Pavel Vadimovich, Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: pvkh1999@mail.ru.

Bibliographic description

Makkaveev P. N., Polukhin A. A., Nalbandov Yu. R., Khlebopashev P. V. Dynamics of nutrients in the Yenisei Gulf during the open water period. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 4 (36), pp. 69—82. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-69-82. (In Russian).