

УДК 551.465

КОНЦЕНТРАЦИЯ И ДИФФУЗНЫЕ ПОТОКИ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ “ПОРОВЫЕ ВОДЫ–НАДДОННЫЕ ВОДЫ” В ЭСТУАРИИ РЕКИ ОБИ

© 2021 г. Г. В. Борисенко^{1, *}, Е. П. Маккавеев², П. А. Стунжас¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

*e-mail: gennady.val.borisenko@gmail.com

Поступила в редакцию 19.11.2019 г.

После доработки 08.06.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

В ходе 76-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2019 г. был выполнен разрез Обская губа – склон Карского моря. Посредством мультикорера получены пробы наддонной воды и 2-х слоев осадка толщиной по 1 см. В них измерены концентрации кремния, минерального и валового фосфора и органического азота. Рассчитана величина потоков этих биогенных элементов на границе вода–дно по разрезу, все они положительны, т.е. направлены из осадка в воду. Сравнение потоков кремния и фосфатов, полученных на разрезе в 2019 г., с потоками, измеренными на аналогичном разрезе в 2007 г., показали хорошее совпадение. Потоки кремния по разрезу меняются мало (менее чем в 2 раза), включая фронтальную зону смешения речных и морских вод. Потоки минерального фосфора имеют два максимума: в чисто речных водах и на склоне Карского моря. В области расположения линзы распресненных вод потоки фосфора могут иметь знакопеременный характер в зависимости от сезона года и состояния продукционно-деструкционных процессов. Предложен способ сравнения потоков разных биогенов на предмет установления характера изменчивости их по разрезу и выявления ошибок измерения.

Ключевые слова: Карское море, Обская губа, седиментация, диффузионные потоки, биогенные элементы

DOI: 10.31857/S0030157420060039

ВВЕДЕНИЕ

Институт океанологии РАН в 2019 г. провел 76-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море, который был частью программы по изучению морей Арктики. В ней большое внимание уделяется именно Карскому морю, в которое впадают такие крупные реки, как Обь и Енисей, образующие в нем линзы распресненных вод [2] с повышенной концентрацией биогенных элементов (биогенов) [7]. Особенно интересны процессы накопления биогенов в Обской губе, так как они достигают там очень больших значений и в значительной степени перерабатываются в устье губы при контакте речных и морских вод [3, 4]. Часть биогенов поступает в море и после биотрансформации захоранивается в осадках, что позволяет им в какой-то степени снова поступать в воду [5, 6]. Концентрации кремния и фосфора в осадках и их потоки в воду на разрезе Обская губа – склон Карского моря уже изучались в 2007 г. в 54-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”

[8]. В 2019 г. на том же судне этот разрез был практически повторен с применением более тонкой методики отбора проб и включением дополнительных компонент – валового фосфора и общего азота.

Для характеристик Обской губы очень важно положение границы пресных вод (за нее обычно принимается величина солености 1.5 епс). Так, до 2008 г. [10] в августе она в среднем располагалась на 71.85–72.25° с.ш. Последнее по времени районирование губы по солености приводится в [4] на основании подробной съемки 2010 г. (рис. 1): речная зона – до мыса Хоранасая (71.20° с.ш.), морская зона – по траверзу мыса Штормовой (71.6° с.ш.) и между ними – промежуточная (фронтальная) зона, в которой происходит смешение морских и речных вод. Однако, последние рейсы ИО РАН показали, что в июле речная вода наблюдалась гораздо севернее: в 2016 г. – на 72.55° с.ш. (соленость 0.9 епс), в 2019 г. – на 72.66° с.ш. (соленость 0.2 епс). Таким образом,

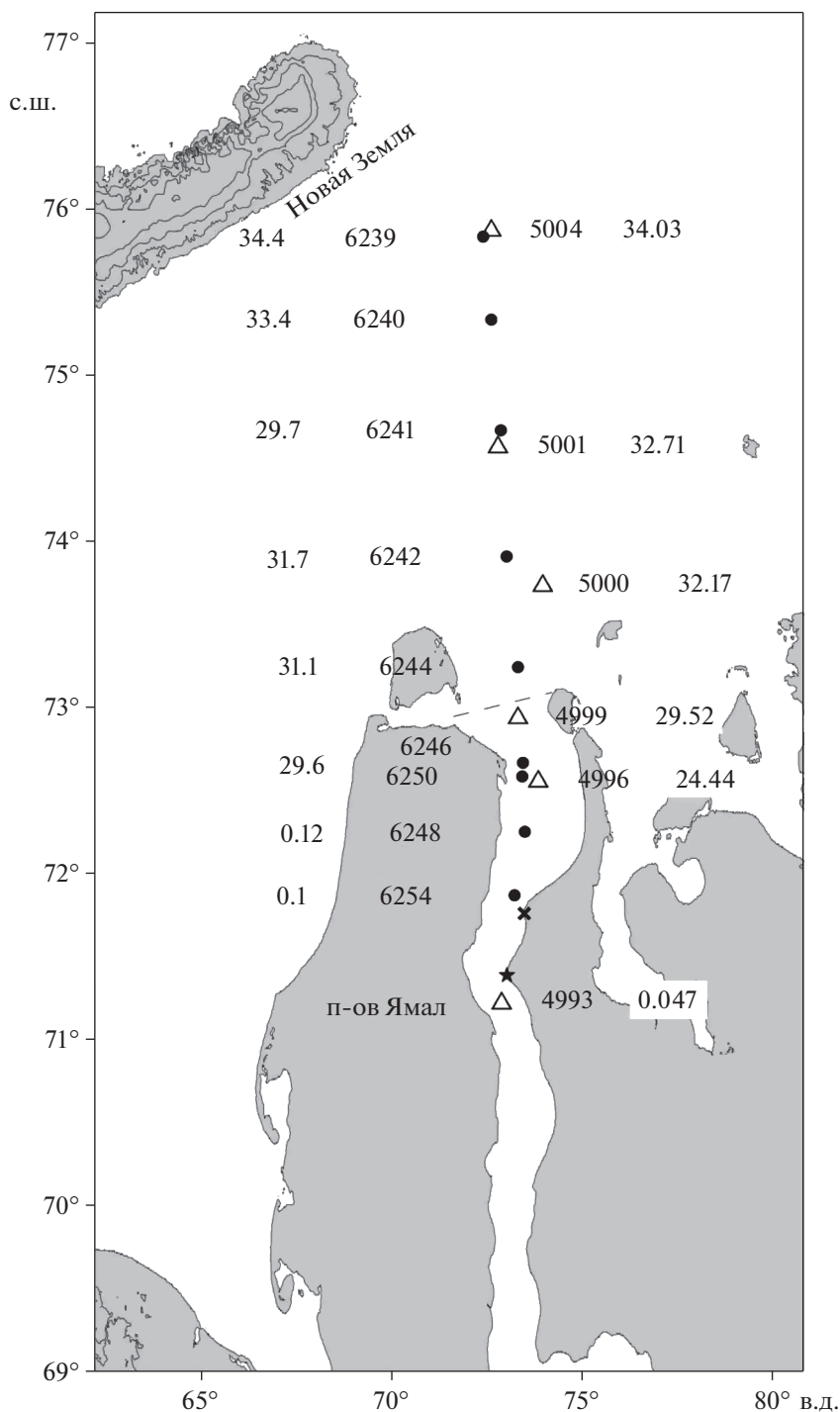


Рис. 1. Положение станций разрезов 2007 г. (треугольники) и 2019 г. (точки). Слева от точек показаны станции 2019 г. и соленость придонного слоя (в епс). Справа от треугольников – данные 2007 г. (станции и соленость придонного слоя в епс). Пунктиром показан фронт, разделяющий в 2019 г. речные и морские воды в поверхностном слое, а в придонном слое он проходил между ст. 6248 и 6250. Звездочкой обозначен мыс Хоранасалья, крестиком – мыс Штормовой.

как видно из рис. 1, в 2019 г. речная зона продвинулась примерно на 100 км севернее, чем по схеме [4].

Для Обской губы предложено и другое районирование [11], основанное на том, что годовой

сток в нее всех рек (в среднем 530 км³) не намного превышает объем самой губы (около 400 км³, по данным съемки 2010 г.) Поэтому полное обновление вод в губе происходит в среднем за 8 месяцев, а летом там можно выделить зимние (грунтовые)

и весенние (паводковые) воды, сильно отличающиеся по свойствам. Границы между этими водами подвижны и зависят от метеоусловий.

Цель настоящей статьи — выяснить закономерности распределения концентраций кремния, минерального фосфора, валового фосфора и общего азота на границе вода—дно и рассчитать потоки этих биогенов в воду на разрезе Обская губа—Карское море по материалам 2019 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа основана на данных 76-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” (июль—август 2019 г.). Отбор наддонных и поровых вод проводился на разрезе Обская губа — Карское море. Протяженность разреза была порядка 500 км, самая северная точка разреза имела координаты 75.82° с.ш. и 72.37° в.д., самая южная точка 73.18° с.ш. и 71.87° в.д. и находилась около мыса Штормовой (Обская губа). Карта станций пробоотбора представлена на рис. 1. Соленость придонного слоя воды менялась от 34 до 0.16 епс, т.е. станции делались как в чисто морских, так и чисто речных водах, включая зону их смешения. Измерение придонной солености производилось с помощью океанографического зонда SBE911 на расстоянии 1 м от дна.

Отбор проб производился при помощи мультикорера KC model 71.500 с трубками диаметром 10 см и высотой 60 см. Наддонную воду отбирали из грунтовой трубки сифоном по слоям толщиной 5—10 см, затем слоями толщиной 1 см отбирали донные осадки. Число взятых слоев осадка зависело от вида грунта и положения мультикорера на дне. На большей части станций удалось взять 2 слоя, на станциях 6241 и 6248 — только один слой.

Иловые воды отжимали из свежего материала донных осадков объемом 70 мл с помощью центрифуги ELM1 CM-6M при 3000 об/мин в течение 30 мин. Общий выход пробы был примерно 40—50 мл. Полученные пробы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0.45 мкм (Millipore, Germany). В пробах определяли содержание растворенных кремния, неорганического и валового фосфора, общего азота, а также щелочности и кислорода (для определения последних использовались специальные сосуды малого размера). Использовались методики, принятые в океанологической практике [9, 13]. Анализы проводились в судовой лаборатории не позднее, чем через 2 ч после отбора.

Оценка потоков на границе вода—дно производилась согласно методике, описанной в [14]. Суть оценки потоков веществ и элементов через границу вода—дно по этому методу, также именуемому градиентным, следующая: производится

отбор наддонной воды и послойный отбор осадка (слои толщиной 1 см) с последующим отжимом поровых вод при помощи центрифуги, полученный супернатант фильтруется и анализируется методиками, представленными выше. Таким образом, исследователь получает данные по содержанию биогенных элементов в поровой воде пограничных слоев (вода—дно).

В работе [12] была приведена адаптация закона диффузии Фика, учитывающая пористость осадка, извилистость ходов, скорость диффузии данного иона в частицах определенной размерности и градиент концентрации вещества по линейной (расстояние между слоями, в м) составляющей:

$$J = -\phi D_s \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (1)$$

где: J — величина потока по границе вода—дно, ϕ — пористость осадка (оценивалась согласно литературным данным, равна 0.95—0.98 [1]), D_s — коэффициент диффузии измеряемого иона через границу вода—дно (моль · с) dC/dx — приращение концентрации к линейному расстоянию между точками отбора.

В приложении приводится пример оценки потоков для кремния, азота и фосфора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В 2019 г. разрез в поверхностном слое пересекал линзу сильно распресненных вод (станции 6241—6244), а фронтальный раздел проходил между ст. 6244 и ст. 6246, где была встречена чисто речная вода. Но в придонном слое, который описывается в статье, речная вода начиналась только со ст. 6248, поэтому именно ее мы будем называть фронтом. Координаты станций на разрезах 2019 г. приведены в табл. 1. Работы в 2019 г. проводились вскоре после освобождения Обской губы ото льда, в одном из наиболее многоводных месяцев — июле и начале августа. В это время в поверхностном слое фиксируются сравнительно высокие концентрации кремния и нитратов [3], и в 2019 г. они были отмечены как в речных водах, так и в линзе распресненных вод.

Главным фактором осадконакопления в Карском море является поступление взвеси с водами Оби и Енисея, а также с течениями из Баренцева моря [8]. Положение разреза выбиралось так, чтобы захватить как речные воды, так и северо-западный склон Карского моря. Так как ст. 6239 имеет глубину 173 м, тогда как остальные — менее 35 м, то на ней у дна, естественно, понижено содержание кислорода (81% от насыщения) и повышены концентрации биогенов, так что результаты, полученные на данной станции, обсудим ниже отдельно.

Таблица 1. Координаты станций разреза в 2019 (№№ 6239–6254) и 2007 гг. (№№ 4993–5004)

Станция	Широта, (с.ш.)	Долгота, (в.д.)	Станция	Широта, (с.ш.)	Долгота, (в.д.)
6239	75.83	72.37	5004	75.88	72.58
6240	75.33	72.58			
6241	74.67	72.83	5001	74.58	72.75
6242	73.91	72.99	5000	73.75	73.94
6244	73.24	73.28	4999	72.95	73.28
6246	72.67	73.42			
6248	72.25	73.47			
6250	72.58	73.40	4996	72.56	73.82
6254	71.87	73.20	4993	71.23	72.85

Таблица 2. Содержание биогенных элементов на станциях разреза в Обской губе в наддонной и двух слоях иловой воды. S_0 и S_b – соленость поверхностного и придонного слоев соответственно (епс). Единицы измерения Si, PO_4 , P_{tot} , N_{org} – μM

Ст.	Г-т	Si	PO_4	P_{tot}	N_{org}	P_{org}	S_b	S_0
6239	над.	<i>8.12</i>	<i>0.53</i>	<i>0.8</i>	<i>19.8</i>	<i>0.27</i>	<i>34.4</i>	<i>28.1</i>
	ил1	207	1.49	4.41	79.9	2.92		
	ил2	257	2.04	5.99	107	3.95		
6240	над.	<i>0.23</i>	<i>0.28</i>	<i>0.56</i>	<i>11.2</i>	<i>0.28</i>	<i>33.4</i>	<i>24.5</i>
	ил1	124	1.26	4.26	130	3		
	ил2	230	2.83	9.93	246	7.1		
6241	над.	<i>20.9</i>	<i>0.35</i>	<i>0.68</i>	<i>18.5</i>	<i>0.33</i>	<i>29.7</i>	<i>7.6</i>
	ил1	183	1.81	10.7	307	8.89		
6242	над.	<i>21.4</i>	<i>0.57</i>	<i>0.91</i>	<i>19.6</i>	<i>0.34</i>	<i>31.7</i>	<i>8.8</i>
	ил1	253	2.12	6.15	85.4	4.03		
	ил2	441	2.67	12.9	122	10.2		
6244	над.	<i>32.8</i>	<i>0.9</i>	<i>1.28</i>	<i>26.4</i>	<i>0.38</i>	<i>31.1</i>	<i>6.1</i>
	ил1	230	1.26	3.15	1.59	1.89		
	ил2	284	2.52	4.57	171	2.07		
6246	над.	<i>22.5</i>	<i>0.64</i>	<i>1.17</i>	<i>6.99</i>	<i>0.53</i>	<i>29.6</i>	<i>0.3</i>
	ил1	214	1.41	9.77	108	8.36		
	ил2	269	1.26	10.6	123	9.3		
6250	над.	<i>29</i>	<i>0.39</i>	<i>0.95</i>	<i>13.1</i>	<i>0.56</i>	<i>28.5</i>	<i>0.27</i>
	ил1	208	1.34	4.41	175	3.07		
	ил2	257	1.81	21.4	275	19.6		
6248	над.	<i>198</i>	<i>0.86</i>	<i>4.73</i>	<i>41.2</i>	<i>3.87</i>	<i>0.12</i>	<i>0.12</i>
	ил1	361	2.28	11.8	123	9.52		
6254	над.	<i>220</i>	<i>0.86</i>	<i>1.58</i>	<i>40.3</i>	<i>0.72</i>	<i>0.16</i>	<i>0.16</i>
	ил1	312	3.07	6.93	11.1	3.86		
	ил2	376	9.27	14.9	163	5.63		

Примечание. Наддонные воды выделены курсивом.

Сначала рассмотрим концентрации биогенов на границе вода–осадок, а потом их потоки. Из табл. 2 и рис. 2 видно, что при общей тенденции роста содержания наддонного кремния от ст. 6240 к ст. 6254, выделяются ст. 6246 и 6250, где происходит его спад. Для слоя ил1 и ил2 большими значениями концентрации кремния выделяется ст. 6242, а пониженными – станции 6246–6250.

Для наддонного минерального фосфора (PO_4) так же, как и для кремния, имеется тенденция роста концентраций к губе, которая нарушается пониженными концентрациями на станциях 6246, 6250. Осадок (слой ил1 и ил2) содержит сравнительно мало PO_4 по сравнению с речной ст. 6254, особенно его мало на станциях 6246 и 6250. Распределение концентраций общего фосфора (P_{tot})

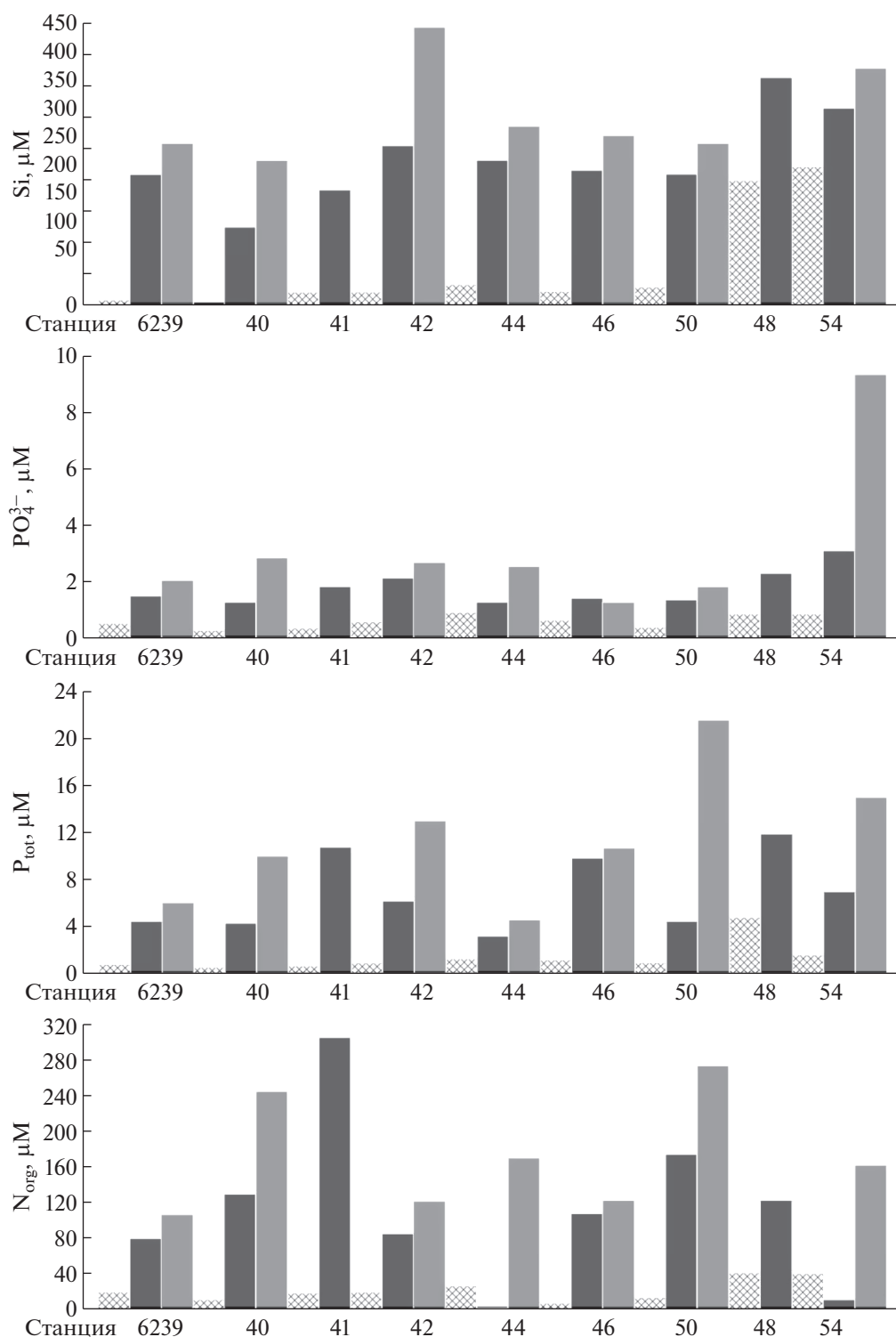


Рис. 2. Концентрации кремния, общего азота, минерального фосфора и валового фосфора в наддонной воде (светлые столбики), в воде слоя ил1 (черные столбики) и в воде слоя ил2 (серые столбики).

в наддонной воде имеет тот же характер, что и PO_4 , т.е. минимум наблюдали на станциях 6246–6250, а максимум – на фронте – ст. 6248 (абсолютный максимум на разрезе $4.73 \mu\text{M}$). В осадке (слой ил1 и ил2) минимальные значения были на

ст. 6244, а на ст. 6250 в слое ил2 был абсолютный максимум – $21.4 \mu\text{M}$.

Для органического азота в наддонной воде распределение похоже на таковое для общего фосфора, т.е. минимум на станциях 6246 (абсо-

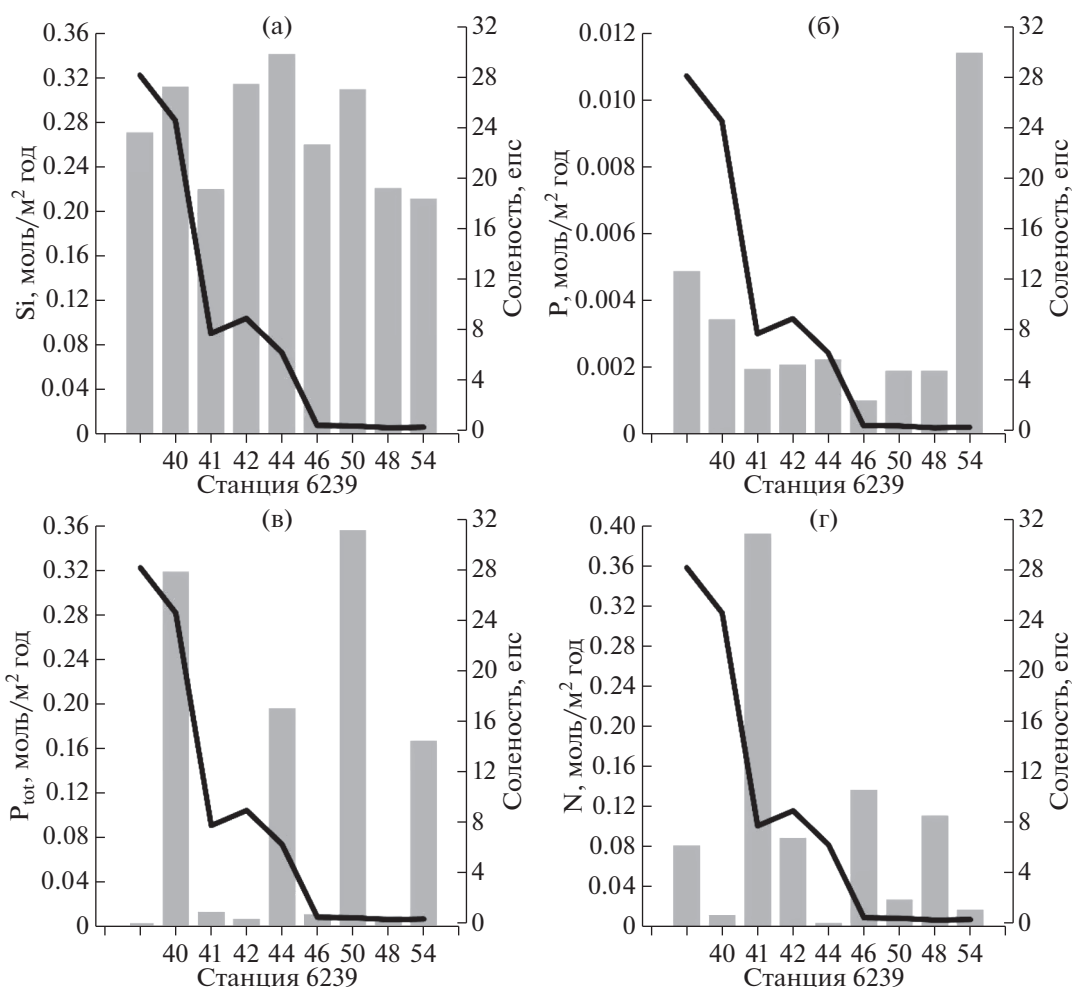


Рис. 3. Величины потоков по станциям: (а) – кремний, (б) – фосфаты, (в) – валовый фосфор, (г) – общий азот. Линией показано изменение придонной солености (епс).

лютный) и 6250. Для осадка (слой ил1 и ил2) выделяются два максимума: один – на станциях 6240–6241, второй – на ст. 6250, а между ними определить тенденцию изменения концентраций трудно.

Таблица 3. Величины потоков (моль/м² год) кремния, фосфатов, валового фосфора и общего азота по станциям 2019 г.

Станция	Горизонт	Si	PO ₄	P _{tot}	N
6239	Над-ил1	0.27	4.90E-03	3.68E-03	0.08
6240	Над-ил2	0.31	3.46E-03	3.18E-01	0.01
6241	Над-ил1	0.22	1.98E-03	1.36E-02	0.39
6242	Над-ил1	0.31	2.10E-03	7.11E-03	0.09
6244	Над-ил2	0.34	2.26E-03	1.96E-01	0.00
6246	Над-ил1	0.26	1.04E-03	1.17E-02	0.14
6250	Над-ил2	0.31	1.93E-03	3.55E-01	0.03
6248	Над-ил1	0.22	1.93E-03	9.59E-03	0.11
6254	Над-ил2	0.21	1.14E-02	1.67E-01	0.02

Потоки биогенов из осадка были положительными (табл. 3, рис. 3). Потоки кремния, учитывая точность измерения и сравнение с другими биогенами, получились практически постоянными, что несколько странно. Поток минерального фосфора (без учета глубокой ст. 6239 и речной 6254) кажется либо постоянным, либо даже уменьшающимся к губе. Но на этом фоне выделяется минимальный поток на ст. 6246. Потоки валового фосфора столь сильно изменчивы, что говорить о какой-либо тенденции трудно.

Определение общего азота требует обязательного автоклавирования проб и считается самым трудным из всех определений биогенов, так как нередко показывает большой разброс данных. Так произошло и у нас при определениях N_{org} в слое ил1, хотя данные для других слоев более гладкие. Абсолютный минимум (всего 1.59 μM) получен на ст. 6244. Это значение даже меньше, чем величина содержания валового фосфора, поэтому оно было забраковано, а для расчета взяты

Таблица 4. Концентрации (μM) и потоки ($\text{моль}/\text{м}^2 \text{ год}$) кремния и минерального фосфора по данным ИО РАН 2007 г.

Станция	Горизонт	Si (конц)	PO ₄ (конц)	Si (поток)	PO ₄ (поток)
5004	Прид.	7.1	0.71		
	ил1	228	0.88	0.300	2.31E-04
5001	Прид.	20.19	1.9		
	ил1	261	1.47	0.327	-5.83E-04
5000	Прид.	24.68	2.25		
	ил1	68.7	1.7	0.060	-7.46E-04
4999	Прид.	22.67	3.16		
	ил1	236.5	1.46	0.290	-2.31E-03
4996	Прид.	28.14	0.82		
	ил1	193	0.93	0.224	1.49E-04
4993	Прид.	63.37	2.12		
	ил1	527	6.66	0.629	6.16E-03

данные из слоя ил2. Примерно такую же ситуацию наблюдали и на ст. 6254, хотя здесь концентрация N_{org} больше, чем P_{tot} , но меньше, чем в наддонной воде. Поэтому и это значение было забраковано и заменено данным в слое ил2. Сложное положение и с абсолютным максимумом N_{org} 307 μM на ст. 6241. К сожалению, здесь удалось взять пробу только из слоя ил1, но близкие величины концентраций (246 и 275 μM) были получены только для слоя ил2 на ст. 6240 и 6250 соответственно. Поэтому и это значение для расчета потоков было отнесено к слою ил2. В значениях таким образом рассчитанных потоков выделяется максимум на ст. 6241 (0.39 $\text{моль}/\text{м}^2 \text{ год}$) и близкий к нулю поток на ст. 6244.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала остановимся на пропущенной выше ст. 6239. На этой станции были получены высокие значения содержания всех биогенов, а также их потоков, за исключением валового фосфора. И причина, наверное, не только в ее большей глубине, но и в положении станции на склоне. Туда может поступать взвесь как с мелководного шельфа, так и с водами, поступающими из Баренцева моря.

Если говорить о результатах наблюдений на остальной части разреза, все величины (кроме потоков кремния) получились сильно колеблющимися. Причинами этого могут быть как многообразные природных действующих факторов, так и ошибки измерения. Измерительные ошибки мы решили проверить двумя способами: сравнением с данными экспедиции ИО РАН 2007 г., когда был проведен аналогичный разрез (см. рис. 1), и особым представлением наших данных.

Данные 2007 г. по концентрациям и потокам кремния и минерального фосфора, рассчитанные нами, даны в табл. 4. По кремнию данные близки к таковым 2019 г., за исключением речной ст. 4993 с очень высокой концентрацией кремния в иловой воде (527 μM), но так далеко на юге работы в 2019 г. не проводились. В 2007 г. на ст. 5000 в иловой воде отмечена минимальная концентрация (и, соответственно, поток) кремния, так же как на ст. 6241 в 2019 г. Поток кремния мало менялся по разрезу, так как на речных станциях высокая концентрация кремния в иловой воде компенсировалась высокой же его концентрацией в наддонной воде, что наблюдается только в июне—июле. В сентябре—октябре можно ожидать более высоких потоков кремния в районе станций 6248, 6254. Таким образом, данные 2007 г. по кремнию, в целом, подтверждают наши результаты.

По минеральному фосфору данные 2007 г. в иловой воде близки к данным 2019 г., что является косвенным подтверждением правильности наших результатов. Но в придонной воде концентрация фосфора в 2007 г. в среднем была выше, так что на трех станциях разреза (4999—5001) потоки фосфора (расчет наш) получились отрицательными, а в 2019 г. все потоки получились положительными.

Второй способ проверки: общее представление о величинах всех 4-х потоков и их распределении по разрезу можно получить из обобщающего рис. 4. Здесь характеристики потоков даны в виде отношения концентраций биогенов в слоях осадка ил1 и ил2 на разрезе от ст. 6239 (слева) к ст. 6254. Фактически эта величина пропорциональна потоку между этими слоями (без учета диффузионных коэффициентов) и ее можно сравнивать для разных веществ. Если накопление всех компонент происходило в идеальных условиях: стационарно во времени, за счет единого

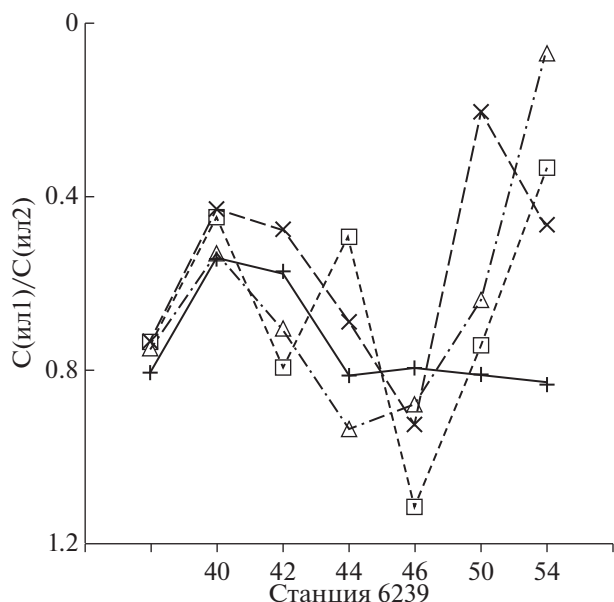


Рис. 4. Отношение концентраций биогенов в слоях осадка ил1 и ил2 на разрезе от ст. 6239 (слева) к ст. 6254. Кремний — прямой крест, минеральный фосфор — квадрат, валовый фосфор — наклонный крест, общий азот — треугольник.

биологического процесса и без сильной трансформации уже в осадке и т.д. — то это отношение должно быть близким на каждой станции для всех наших параметров, так как они все образовались единым биологическим путем. Кроме того, отклонение отдельных точек от общей зависимости дает повод анализировать причину отклонения, одной из которых может быть ошибка измерений. А его согласованное изменение по разрезу, по нашему предположению, могло бы указывать на какие-то особенности образования концентраций биогенов в осадке: сам источник биогенов, а также скорость отложения, особенности грунта и др. На рис. 4 усредненная величина всех отношений выглядит как волна с максимумом на ст. 6240, минимумом на станциях 6244–6246. Такой вывод, в целом, совпадает и с описанием потоков, сделанным выше с учетом свойств наддонной воды.

Теперь можно сделать дополнительные заключения о потоках. Основная особенность потоков кремния состоит в том, что они почти постоянны на речной половине разреза, включая фронтальную зону. Причем, если бы работы проводились в сентябре–октябре, когда концентрация кремния в речных водах $\approx 60 \mu\text{M}$ [3], это увеличило бы поток всего на 20%, т.е. его изменчивость была бы даже меньше, чем на рис. 3А. Отсюда следует, что концентрация кремния $527 \mu\text{M}$ в 2007 г. на ст. 4993, составляющая примерно 50% от растворимости аморфного кремния (створок диатомо-

вых), могла быть завышена, как и рост потока на этой станции примерно в 2 раза.

Первая особенность потоков фосфатов — повышенная величина в речных водах, которая может быть обусловлена высоким содержанием фосфатов в речной воде во все сезоны года. Вторая — понижение потоков под линзой распресненных вод на выходе из губы, включая фронтальную зону. В 2019 г. все потоки получились положительными, а в 2007 г. они были здесь отрицательными по причине высоких концентраций в придонной воде. Но работы 2007 г. проводились в сентябре, когда уже преобладали процессы деструкции фитопланктона, а в 2019 г. — в июле, т.е. на пике продуктивности. Можно предположить, что потоки фосфатов могут менять знак по сезонам года. Это препятствует большому накоплению фосфатов в осадке и объясняет их пониженные средние величины в этом месте. Повышенный поток фосфатов на ст. 6239 (и 5004) уже был объяснен выше: поступление взвеси по склону с мелководья и приток воды, обогащенной биогенами, из Баренцева моря.

Насколько эти соображения относятся к органическим формам фосфора и азота, из-за разброса полученных величин потоков сказать трудно. Но из рис. 4 можно сделать вывод, что характер изменения по разрезу для органических форм может быть похож на таковой для минерального фосфора. В этом направлении требуется проведение дальнейших работ с привлечением дополнительного материала: скорости образования осадков, количества в них органики и т.п. Это же относится и к процессам во фронтальной зоне.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № 0149-2019-0008 и проекта РНФ № 19-17-00196 “Трансформация растворенного стока в устьевых областях рек России различных климатических зон”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вершинин А.В., Розанов А.Г. Химический обмен на границе вода–дно в океанах и морях. М.: ГЕОС, 2002. 164 с.
2. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
3. Лапин С.А. Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 984–993.
4. Лапин С.А. Пространственно-временная изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик Обской Губы как основа оценки ее биопродуктивности. Автореферат дисс. на соискание к.г.н. М.: 2012.
5. Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С. и др. Процессы трансформации взвеси в осадок в Кар-

- ском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 643–643.
6. *Лейн А.Ю., Кравчишина М.Д., Политова Н.В. и др.* Трансформация взвешенного органического вещества на границе вода–дно в морях российской Арктики (по изотопным и радиоизотопным данным) // Литология и полезные ископаемые. 2012. С. 115–115.
 7. *Маккавеев П.Н., Стунжас П.А.* Гидрохимическая характеристика вод Карского моря // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 662–667.
 8. *Розанов А.Г.* Редокс-система донных отложений западной части Карского моря // Геохимия. 2015. № 11. С. 1015–1031.
 9. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Под ред. Сапожникова В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
 10. *Становой В.В.* Изменчивость термохалинной структуры воды в эстуариях Карского моря // Тр. ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 103–130.
 11. *Стунжас П.А., Маккавеев П.Н.* Объем вод Обской губы как фактор формирования гидрохимической неоднородности // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 622–622.
 12. *Boudreau V.P.* Diagenetic models and their implementation. Berlin: Springer, 1997. V. 505. 414 p.
 13. *Methods of seawater analysis / Grasshoff K., Kremling K., Ehrhardt M. (Eds.).* 3d Ed. John Wiley & Sons, 2009. 340 p.
 14. *Schultz H.D.* Quantification of early diagenesis: Dissolved constituents in pore water and signals in the solid phase // Marine Geochemistry. 2nd Ed. / Schulz H.D.,

Zabel M. (Eds.). Berlin. Heidelberg. New York: Springer, 2006. P. 73–124.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Расчет потоков биогенных элементов на примере расчета кремния для ст. 6239

Концентрация H_4SiO_4 в водной толще, соприкасающейся с осадком (0 мм) = 8.12 μM , в поровой воде (10 мм) = 206.96 μM .

Разница концентраций между двумя слоями = 206.96 – 8.12 = 198.84 μM = 0.199 mol/m^3 .

Интервал глубин между двумя точками равен: 10 мм (10–0) = 0.010 м.

Коэффициент диффузии кремния в морской воде при температуре 2°C = $5 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, фосфора $2.49 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, азота (NO_3^-) $9.03 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ [14].

Пористость верхнего слоя осадков, согласно литературным данным [1].

Извилистость ходов рассчитывается по формуле $\theta = 1 - \ln(\phi^2)$ [12], для пористости = 0.95 она равна 1.1.

Диффузионный коэффициент в осадке (Ds), таким образом, равен = $5 \times 10^{-10}/1.1 = 4.54 \times 10^{-10}$.

Для станции 6239 поток кремния (1) равен:

$$J = 0.95 \times 4.54 \times 10^{-10} \times 0.199/0.01 = 8.59\text{E-}09 \text{ моль}/\text{м}^2 \text{ с} = 2.70\text{E-}01 \text{ моль}/\text{м}^2 \text{ год.}$$

Поток положительный, из осадка.

Concentration and Diffusion of Biogenic Elements in the System “Interpore Water–Bottom Water” on the Ob River Estuary

G. V. Borisenko^{a, #}, E. P. Makkaveev^b, P. A. Stunzhas^a

^aShirshov Institute of oceanology RAS, Moscow, Russia

^bLomonosov Moscow State University, faculty of geography, Moscow, Russia

[#]e-mail: gennady.val.borisenko@gmail.com

During the IO RAS expedition aboard the R/V Akademik Mstislav Keldysh in 2019, the section of the Ob Bay – the slope of the Kara Sea was made. Using a multicorer, samples of the bottom water and 2 layers of sediment 1 cm thick were obtained. The concentrations of silicon, mineral and total phosphorus and organic nitrogen were measured in them. The magnitude of the fluxes of these biogenic elements at the water–bottom boundary along the section was calculated; they are all positive, i.e. directed from the sediment to the water. Comparison of fluxes of silicon and phosphates obtained in the section in 2019 with the fluxes measured in a similar section in 2007 showed good agreement. Silicon fluxes along the section vary little (less than 2 times), including the frontal zone of mixing of river and sea waters. Mineral phosphorus fluxes have two maxima: in pure river waters and on the slope of the Kara Sea. In the area of the location of the lens of freshened waters, the fluxes of phosphorus can have an alternating character, depending on the season of the year and the state of production and destruction processes. A method is proposed for comparing the fluxes of different nutrients in order to establish the nature of their variability along the section and to identify measurement errors.

Keywords: Kara Sea, Ob estuary, fluxes, sedimentation, nutrients