

УДК 550.42

²³⁴Th КАК ИНДИКАТОР ПОТОКОВ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В КАРСКОМ МОРЕ

© 1994 г. В.М. Купцов, А.П. Лисицын, В.П. Шевченко

Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 11.04.94 г.

По распределению растворенного и взвешенного ²³⁴Th в водах Карского моря рассчитано среднее время пребывания ²³⁴Th, связанного с взвешенным веществом. Для 2-х станций рассчитаны интегральные потоки взвешенного вещества для нескольких глубин; поток нарастает лишь в слое скачка, глубже он меняется незначительно. В распределении с глубиной величин дифференциальных потоков фиксируются два максимума: в поверхностном горизонте, где максимальна первичная продукция, и в слое скачка, где обычно концентрируется зоопланктон, осуществляющий активный перенос взвешенного вещества. Величины дифференциальных потоков определены на 10 станциях, их пространственное распределение контролируется величиной первичной продукции, которая в эстуариях обычно определяется мутностью речных вод.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее совершенным инструментом изучения потоков вещества в океане и морях безусловно являются седиментационные ловушки. Важными преимуществами их использования являются возможности прямого определения потоков, изучения их вещественного состава. Ловушки со сменными стаканами, устанавливаемые на длительное время, позволяют изучать сезонные изменения потоков и состава взвешенного вещества.

За последние два десятка лет успешно развиваются и изотопные методы исследования потоков с использованием короткоживущих радиоактивных изотопов ²³⁴Th и ²²⁸Th [Kaufman et al., 1981]. По распределению изотопов во взвешенной и растворенной формах морских и океанических вод определяется среднее время пребывания изотопа в его взвешенной форме. Поток рассчитывается по концентрации взвешенного вещества и времени его пребывания в исследуемом столбе воды. Методологические отличия в подходе к определению потоков обоими методами являются благоприятным фактором. Действительно, изотопными методами мы изучаем вещество в столбе воды, а с помощью седиментационных ловушек - вещество, покинувшее столб воды; появляются дополнительные возможности оценивать баланс вещества по двум независимым параметрам.

Наиболее разработаны в настоящее время изотопные методы определения потоков с

помощью изотопа ²³⁴Th. Скорость образования этого изотопа в океане определяется концентрацией ²³⁸U, при распаде которого и образуется ²³⁴Th, имеющий период полураспада 24.1 дня. Время пребывания ²³⁸U в океанических водах 2×10^5 лет, т.е. относительно ²³⁸U океанические воды являются хорошо перемешанными. Концентрации ²³⁸U в речном стоке, основном источнике поступления ²³⁸U в океан, более чем на порядок меньше по сравнению с его концентрацией в океане. Поэтому концентрация ²³⁸U в океане определяется только соленостью, что значительно упрощает исследования. Короткий период полураспада ²³⁴Th предопределяет возможность его использования только в поверхностных слоях океана, где высока концентрация взвешенного вещества и активны процессы биоседиментации. Для мелководного Карского моря при большом поступлении взвешенного вещества с речным стоком Оби и Енисея ²³⁴Th может оказаться эффективным индикатором переноса взвешенного вещества в пределах всей водной толщи.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробы воды для определения потоков взвешенного вещества отобраны во время 49-го рейса НИС «Дмитрий Менделеев» в августе-октябре 1993 г. Размещение станций приведено на рис. 1, координаты станций, глубины моря, солености, горизонты отбора проб - в табл. 1. На станциях 4382 и 4389 пробы воды отобраны на 5-6 горизонтах до глубин 35-50 м. Это дает

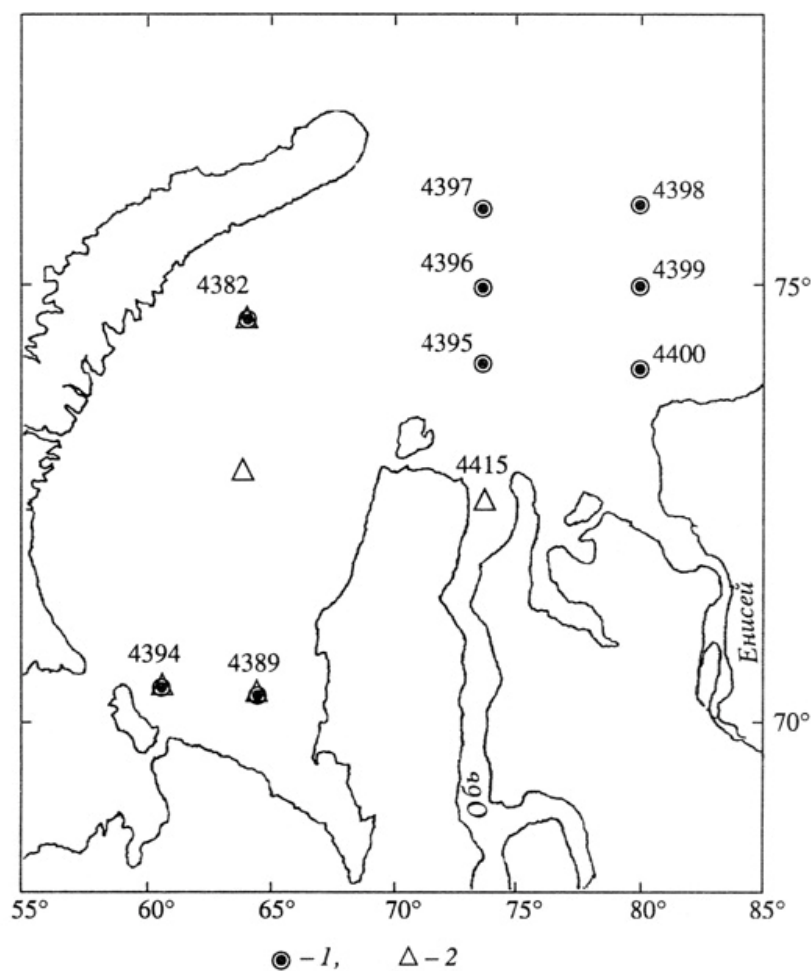


Рис. 1. Карта размещения станций (1 – станции, на которых исследовалось содержание ^{234}Th в воде и взвешенном веществе, 2 – станции, на которых устанавливались седиментационные ловушки).

возможность рассчитать для этих глубин величины интегральных потоков и, соответственно, их изменения с глубиной. На 7 станциях отобраны пробы поверхностных вод, проба поверхностной воды отобрана и на одной станции Баренцева моря (ст. 4375, координаты: $70^{\circ}53.2'$ с.ш.; $51^{\circ}02.5'$ в.д.; глубина моря 76 м).

В целом пробы поверхностных вод отобраны по двум разрезам от эстуариев рек Оби и Енисея в северном направлении. Южная граница разреза определяется низкой соленостью, при которой снижается концентрация ^{238}U и ^{234}Th до пределов регистрации. В западной части моря пробы отобраны на северной ст. 4382, соленость поверхностных вод на этой станции низка и, следовательно, этот район подвержен сильному влиянию речного стока Оби и Енисея. На двух южных станциях (станции 4389 и 4394) это влияние практически уже не прослеживается, в этом районе проявляется влияние Баренцевоморских вод сравнительно мелководного Печорского бассейна.

Содержание ^{234}Th определялось во взвешенном веществе, собранном седиментационными ловушками на станциях, приведенных на рис. 1. Для большей части этих станций проводились определения содержания ^{234}Th в поверхностных водах, их координаты и глубины моря приведены в табл. 1.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробы воды для анализа отбирались пластиковыми батометрами объемом 150 л. Концентрация взвешенного вещества определялась весовым методом. Несколько литров морской воды фильтровали через предварительно взвешенные ядерные фильтры с размерами пор 0.45 мкм. Фильтры высушивались при температуре 60°C до постоянного веса, по которому и определялась концентрация взвеси. Для определения среднего времени пребывания взвешенного вещества анализировалось содержание ^{234}Th в 80 л нефilterованной воды и во взвешенном веществе, полученным фильтрацией 40 л морской воды

(использовались фильтры такие же, как и для анализа концентрации взвешенного вещества). Методика определения ^{234}Th и расчетов среднего времени пребывания взвешенного вещества приведены в отдельной публикации, использовалась модель вертикального переноса Коале и Бруланда [Coale & Bruland, 1985], в которой не учитывалась адвекция и диффузия. По модели рассчитывалось время перехода ^{234}Th из растворенного состояния во взвешенное (τ_1) и время пребывания его во взвешенном состоянии (τ_2). При расчетах принималось, что τ_2 соответствует времени пребывания взвешенного вещества.

Таблица 1. Координаты станций, глубины моря, соленость вод, глубина отбора образцов воды и концентрация взвеси

№ станции	Координаты		Глубина моря, м	Глубина отбора образца, м	Соленость вод, ‰	Содержание взвеси, мг/л
	широта, сев.	долгота, вост.				
4375	70°53.2'	51°02.5'	75	0	28.50	0.29
4382	74°33.8'	64°07.3'	95	0	12.50	0.64
				3	12.50	0.77
				7	12.50	0.62
				10	12.53	0.68
				15	21.16	0.17
				25	24.56	0.10
				35	27.23	0.10
				50	28.94	0.08
				64	33.84	0.12
				75	33.96	0.14
85	33.96	0.11				
4389	70°30.3'	64°33.1'	96	0	30.65	0.13
4394	70°37.4'	60°37.2'	146	0	30.96	0.43
4395	74°13.7'	73°00.3'	30	0	16.87	0.46
4396	74°59.7'	73°05.2'	33	0	17.54	0.35
4397	75°59.4'	73°00.0'	137	0	14.90	0.59
4398	76°00.0'	79°57.9'	55	0	23.68	0.23
				6	23.87	0.23
				12	25.50	0.24
				15	29.29	0.41
				20	31.14	0.17
				35	33.84	0.07
45	33.94	0.35				
52	33.94	0.52				
4399	74°59.9'	80°00.6'	45	0	22.48	0.27
4400	74°15.0'	80°00.0'	35	0	24.41	0.25

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Практические результаты настоящего исследования связаны с изучением распределения интегрального и дифференциального потоков с глубиной, исследованием пространственного

распределения дифференциальных потоков в поверхностных горизонтах и изучением потоков ^{234}Th по результатам определения его содержания в веществе, собранном седиментационными ловушками.

Интегральный и дифференциальный потоки взвешенного вещества детально исследовались лишь на станциях 4382 и 4389. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 2. На ст. 4382 в пределах слоя скачка (глубина 10 м) очень сильно проявляется влияние речных вод.

Практически эти воды представляют смесь речных и морских вод в соотношении 2:1. Концентрация взвеси в этом слое испытывает небольшие колебания в пределах среднего значения -0.68 мг/л, ниже слоя скачка она резко снижается (в пределах нескольких метров более, чем в 6 раз) и глубже практически не меняется до 50 м.

Величина интегрального потока взвешенного вещества активно нарастает до глубин -15 м, т.е. до тех глубин, до которых прослеживается и значительная концентрация взвешенного вещества. Глубже величина потока испытывает незначительные колебания, но, по-видимому, небольшие приращения потока происходят и в интервале глубин 15-50 м, так как максимальное значение потока все же фиксируется на наиболее глубоком горизонте.

Как показывает распределение с глубиной дифференциального потока, наиболее интенсивно процессы флокуляции происходят в узком слое скачка. Величина потока в этом слое почти в два раза выше, чем в вышележащих горизонтах, а вклад в общий интегральный поток приблизительно равный. Приращение интегрального потока за счет нижележащих горизонтов (15-50 м) составляет не более 7-8%, и обусловлено это прежде всего низкой концентрацией взвешенного вещества, так как время пребывания взвешенного вещества в этих горизонтах практически в 1.5 раза ниже (табл. 2) по сравнению с вышележащими горизонтами. На одном из горизонтов величина дифференциального потока принимает даже отрицательное значение, что, возможно, свидетельствует о деструкции органического вещества, но скорее всего обусловлено изменением скорости или направления течений.

На ст. 4398 воды на поверхности более морские, соленость практически в два раза выше, а концентрация взвешенного вещества до слоя скачка в три раза ниже по сравнению со ст. 4382. Соответственно величина

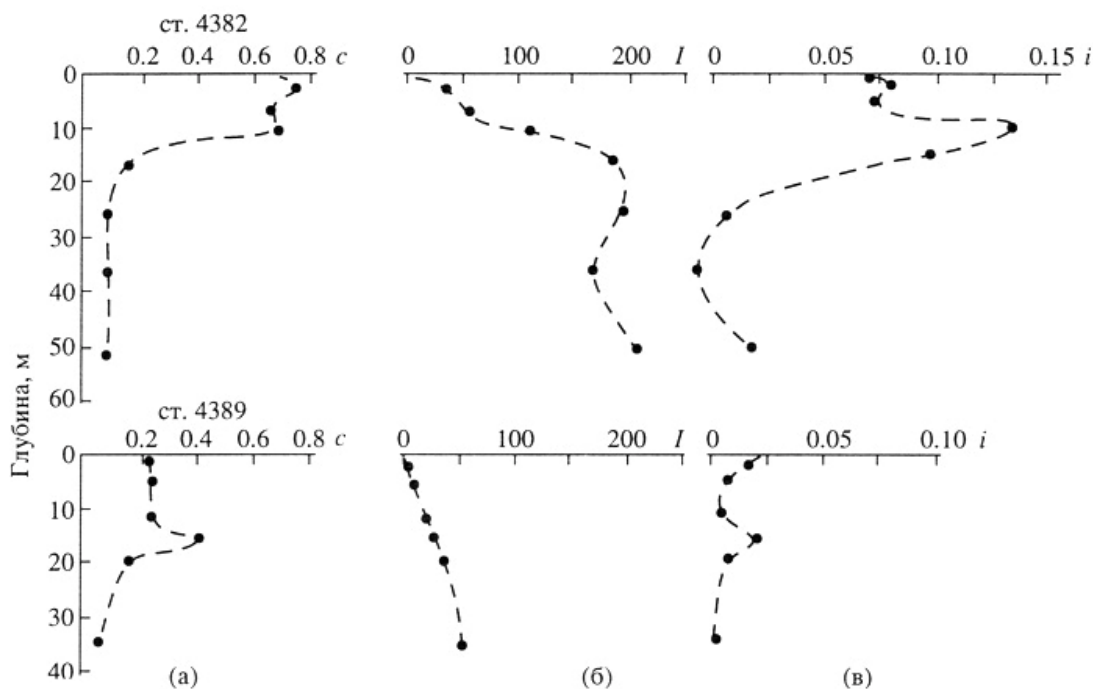


Рис. 2. Изменение концентрации, интегрального и дифференциального потоков взвешенного вещества с глубиной на станциях 4382 и 4389.

Таблица 2. Интегральный и дифференциальный потоки взвешенного вещества на станциях 4382 и 4389

№ станции	Горизонт, м	Глубина водного столба, м	Содержание взвешенного вещества в столбе, мкг/см ²	Время перехода во взвешенное вещество, дней	Время пребывания взвешенного вещества, дней	Потоки	
						интегральный, мкг/см ² день	дифференциальный, мкг/см ² день
4382	0	1.5	96.0	8.2	9.2	10.4	0.0693
	3	5.0	365.5	(14.3)	(9.5)	38.5	0.0803
	7	8.5	582.5	20.4	9.9	58.8	0.0580
	10	12.5	854.5	(15.7)	7.6	112.4	0.1340
	15	20.0	982.0	11.0	5.3	185.3	0.0972
	25	30.0	1082.0	13.5	5.6	193.2	0.0079
	35	42.5	1107.0	33.4	6.5	170.3	-0.0183
	50	57.5	1227.0	29.6	6.1	201.1	0.0205
4398	0	3.0	69.0	6.6	9.5	7.3	0.0242
	6	9.0	207.0	50.1	16.2	12.8	0.0092
	12	13.5	315.0	74.0	20.9	15.1	0.0051
	15	17.5	479.0	(52.4)	(19.4)	24.7	0.0240
	20	27.5	649.0	30.9	17.9	36.3	0.0116
	35	40.0	736.5	23.2	14.9	49.4	0.0105

Примечание. Значения времен пребывания в скобках получены не по экспериментальным данным, а рассчитаны как средние между ближайшими горизонтами.

интегрального потока на глубинах ниже слоя скачка на этой станции в 4 раза ниже, так как кроме низких концентраций взвешенного вещества время его жизни в водах на этой станции значительно выше. Дифференциальный поток максимален в поверхностном горизонте и в слое скачка, в слое скачка фиксируется и повышенная концентрация взвешенного вещества. Сравнительно низкие концентрации взвешенного вещества выше слоя скачка и в

самом слое заметно увеличили на глубине -40 м вклад в интегральный поток взвешенного вещества из слоя ниже скачка до 30%, то есть на этой станции влияние речного стока уже не является таким доминирующим, как на ст. 4382. Если аппроксимировать значения дифференциальных потоков на двух самых глубоких из измеряемых горизонтов до придонного горизонта, доля взвешенного вещества в интегральном потоке из

практически чисто морских вод увеличится до 50%.

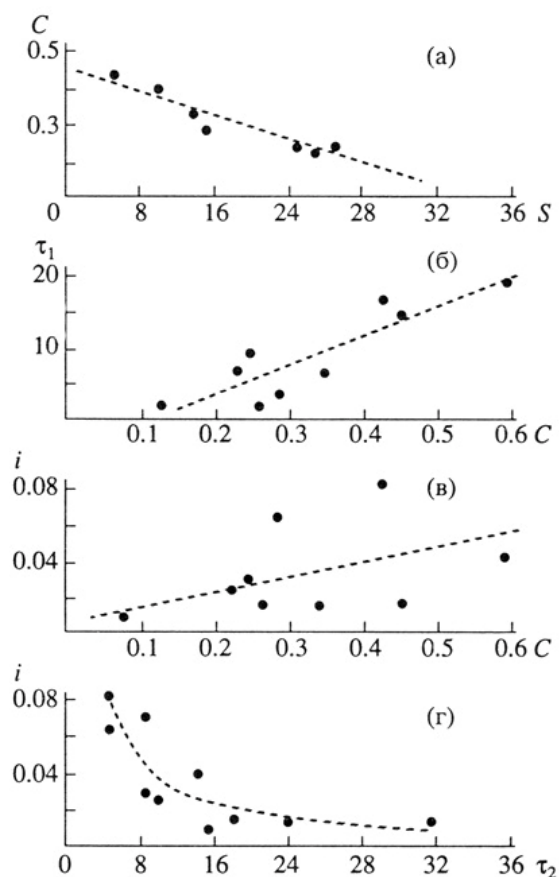


Рис. 3. Соотношения, связывающие основные параметры переноса взвешенного вещества. (а) – зависимость концентрации (C , $\text{мкг}/\text{см}^3$) от солености вод (S , ‰); (б) – зависимость времени перехода ^{234}Th из растворенной формы во взвешенную (τ_1 , дней) от концентрации взвешенного вещества (C , $\text{мкг}/\text{см}^3$); (в) – зависимость величины дифференциального потока (i , $\text{мкг}/\text{см}^2$ день) от концентрации взвешенного вещества (C , $\text{мкг}/\text{см}^3$); (г) – зависимость величины дифференциального потока (i , $\text{мкг}/\text{см}^2$ день) от времени пребывания взвешенного ^{234}Th (τ_2 , дней).

Потоки взвешенного вещества для поверхностного слоя (табл. 3) определены на 10 станциях, положение которых (кроме ст. 4375) приведено на рис. 1.

Для 6 станций по разрезам от эстуариев Оби и Енисея и на ст. 4382 основным источником взвешенного вещества, безусловно, является речной сток. Для этих станций высокий коэффициент корреляции ($r = 0.96$) фиксируется для зависимости концентрации взвеси от солености (рис. 3а), т.е. концентрация взвешенного вещества в поверхностном слое целиком контролируется степенью разбавления речных вод солеными морскими.

Неожиданно высокий положительный коэффициент корреляции ($r = 0.81$)

зафиксирован для зависимости времени перехода ^{234}Th из растворенной формы во взвешенную (τ_1). На первый взгляд это кажется противоестественным. Действительно, чем выше концентрация взвешенного вещества, тем скорее растворенный торий должен перейти во взвешенное состояние. Однако, как это было показано Коале и Бруландом [Coale & Bruland, 1985], обобщившим большое количество приведенных в литературе экспериментальных данных, величина τ_1 , в первую очередь определяется первичной продукцией. По-видимому, только биогенное вещество способно активно и быстро переводить растворенный торий во взвешенное состояние.

Биологическая продуктивность определяется двумя факторами: поступлением солнечной энергии и наличием питательных веществ, но для эстуариев определяющим фактором обычно является прозрачность вод [Артемьев, 1993]. Именно этим обстоятельством и обусловлена положительная корреляционная связь τ_1 и концентрации взвешенного вещества.

Величина дифференциального потока определяется как частное от деления концентрации взвешенного вещества на среднее время его пребывания τ_2 . Связь дифференциального потока с концентрацией взвеси неоднозначна (рис. 3в), коэффициент корреляции невелик ($r = 0.53$). Более тесная связь потока прослеживается с величиной среднего времени пребывания взвешенного вещества (τ_2). Коэффициент корреляции высок ($r = 0.83$), связь потока (i) с величиной $1/\tau_2$ описывается уравнением линейной регрессии: $i = 0.00093 + 0.355/\tau_2$.

Обобщив экспериментальные результаты разных авторов Коале и Бруланд [Coale & Bruland, 1985], показали, что величина τ_2 практически однозначно определяется потоком органического вещества, т.е. процессы биоседиментации являются доминирующими и для Карского моря. Наши данные подтверждают результаты, полученные этими авторами. В Карском море величина потока определяется не столько концентрацией взвешенного вещества, сколько его временем пребывания (τ_2), которое в конечном итоге зависит от биопродуктивности, увеличивающейся по мере уменьшения концентрации вещества речного стока (увеличения прозрачности вод).

Таким образом, механизм биоседиментации «включается» не сразу, а по мере увеличения прозрачности вод, которое связано, с одной стороны, с увеличением

солености (разбавлением вод), с другой - уменьшением концентрации взвешенного вещества вследствие его удаления в донные отложения.

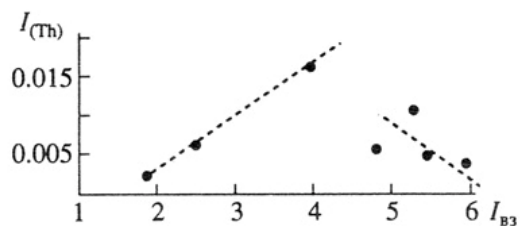


Рис. 4. Зависимость, связывающая потоки ^{234}Th ($I(\text{Th})$, расп/мин/см² день) и потоки взвешенного вещества ($I_{\text{вз}}$ (мкг/см² день), измеренные в седиментационных ловушках.

Таблица 3. Дифференциальные потоки взвешенного вещества из поверхностного слоя морских вод

№ станции	Время перехода во взвешенное вещество, τ_1 , дней	Время пребывания взвешенного вещества, τ_2 , дней	Поток взвешенного вещества, мкг/см ² день
4375	3.0	4.7	0.0617
4382	8.2	9.2	0.0696
4389	1.8	16.1	0.0081
4394	16.4	5.3	0.0811
4395	39.2	146.9	0.0031
4396	6.1	24.4	0.0143
4397	17.9	15.1	0.0391
4398	6.6	9.5	0.0242
4399	1.8	18.5	1.0146
4400	8.7	8.7	0.0287

На характерные особенности пространственного распределения дифференциальных потоков существенное влияние оказывает низкая биологическая продуктивность вод Оби, причина этого пока окончательно не выяснена. На ст. 4395, наиболее близко расположенной к эстуарии, фиксируется наименьшая из зарегистрированных в Карском море величина потока. Биоседиментационные процессы практически не действуют на этой станции, среднее время пребывания взвешенного вещества аномально велико (~150 дн.), но уже на ст. 4397, расположенной на ~1.5° севернее, величина потока увеличивается более чем на порядок.

Влияние аномальных вод Оби, по-видимому, обуславливает и распределение дифференциальных потоков по разрезу от эстуария Енисея. На этом разрезе наибольшая величина потока фиксируется на самой близкой

к эстуарию станции (ст. 4400). На остальных станциях отмечается влияние обских вод, наибольшее - на ст. 4399.

Высокие величины потока фиксируются на 2-х станциях в западной части моря (станции 4382 и 4394). На ст. 4382 сильно влияние речных вод, уже значительно потерявших взвешенное вещество речного стока. Поэтому биопродуктивность на этой станции высока, выше и относительное содержание органики во взвешенном веществе. Наиболее высокая величина потока регистрируется на ст. 4394, а аномально низкая (меньшая на порядок) на ст. 4389. Обе станции расположены сравнительно недалеко друг от друга в юго-западной части моря, соленость вод практически одинакова и близка к океанической, но практически в три раза отличаются концентрации взвешенного вещества и время его пребывания в водах. Эти отличия, безусловно, связаны с величиной первичной продукции, обусловленной прежде всего поставкой питательных веществ.

Достаточно высокая величина потока взвешенного вещества на ст. 4375 в Баренцевом море, по-видимому, является достаточно типичной для припечорского бассейна, примыкающего к проливу Карские ворота. Частично эти воды проникают в Карское море и оказывают влияние на величину первичной продукции и потоки взвешенного вещества.

Седиментационные ловушки. Потоки ^{234}Th и взвешенного вещества определены на 5 станциях, положение которых приведено на рис. 1. Во взвешенном веществе, собранном седиментационными ловушками, определялась величина интегральной активности ^{234}Th . Соотношение, связывающее эту величину с потоком ^{234}Th имеет вид:

$$Q(l) = \int_0^l I(l) \exp(-\lambda t) dt = I(l) (1 - \exp(-\lambda l)) / \lambda,$$

$Q(l)$ - величина интегральной активности ^{234}Th во взвешенном веществе, собранном седиментационной ловушкой, установленной на глубине l ; $I(l)$ - поток ^{234}Th для этой глубины; t - время экспонирования ловушки. Величина интегральной активности ^{234}Th , потоков ^{234}Th , и взвешенного вещества приведены в табл. 4.

Прежде всего обращают на себя внимание низкие величины потоков, зафиксированные седиментационными ловушками. Этим потокам соответствуют времена пребывания взвешенного вещества в слое скачка порядка 1 года, что практически невероятно и означает,

что ловушки не собрали полностью взвешенное вещество, либо потеряли его при подъеме.

Таблица 4. Потоки ^{234}Th и взвешенного вещества в седиментационных ловушках

№ станции	Глубина постановки ловушки, м	Время экспозиции ловушки, час	Соленость, ‰	^{234}Th		Поток взвешенного вещества, мкг/см ² день
				интегральная активность, расп/мин см ²	поток, расп/мин см ² день	
4382	60	288.7	33.84	0.072	0.00708	2.503
	100		33.96	0.120	0.01180	5.284
4386	33	625.0	33.54	0.050	0.00273	1.870
	43		33.74	0.077	0.00420	6.017
4389	28	601.3	34.15	0.320	0.01792	3.866
	48		34.30	0.170	0.00952	–
4394	77	577.8	34.34	0.120	0.00691	5.497
	117		34.50	0.120	0.00691	4.776
4415	19	79.5	31.42	0.64	0.20270	132.1

Как видно на рис. 3, отражающего зависимость потоков ^{234}Th и взвешенного вещества, пропорциональность между ними сохраняется только для ловушек, установленных на верхних горизонтах на станциях 4382, 4386, 4389, наиболее близких к слою скачка. Остальные ловушки располагались ближе к придонному горизонту, для них фиксируется скорее обратно пропорциональная зависимость между потоками, что скорее всего свидетельствует о поступлении взвешенного вещества из донных отложений с низкими концентрациями ^{234}Th .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Карское море является полигоном для изучения механизма переноса взвешенного

вещества речного стока и его распределения в донных отложениях шельфа и эстуариев двух крупнейших рек Оби и Енисея. В эстуариях высокая концентрация взвешенного вещества ограничивает образование первичной продукции тонким поверхностным слоем и потому процессы биоседimentации не играют решающей роли. Грубозернистое вещество взвеси механически осаждается в начале эстуария вследствие резкого снижения скорости течения. Для частиц мелкой размерности основным механизмом осаждения является соленостная флокуляция, которая наиболее интенсивно протекает при достижении солености величины ~10-12‰ [Артемов, 1993].

2. Процессы биоседimentации начинают играть роль по мере увеличения величины первичной продукции, связанной прежде всего с увеличением прозрачности вод. Потоки взвешенного вещества максимальны в поверхностном слое, где велика величина первичной продукции, и в слое скачка, где обычно концентрируется зоопланктон, в процессе жизнедеятельности которого осуществляется перенос взвешенного вещества в донные отложения.

3. Процессы биоседimentации действуют только в осенне-летний период, когда море свободно ото льда, они играют основную и решающую роль в поставке взвешенного вещества в донные отложения, так как >95% твердого речного стока поступает в море именно в этот период.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 94-05 16679 «Потоки взвешенного вещества через основные барьерные зоны Карского моря».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов В.Е. Геохимия органического вещества в системе река-море. М.: Наука, 1993. 204 с.
2. Coale K.H., Bruland K.W. $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium within the California Current // Limnol. Oceanogr. 1985. V. 30. P. 22-33.

3. Kaufman A., Yuan-Hui-Li, Turekian K.K. The removal rates of ^{234}Th and ^{238}Th from waters of the New York Bight // Earth and Planet. Sci. Lett. 1981. V. 54. P. 385-392.

²³⁴Th as an Indicator of Particulate Fluxes in the Kara Sea

V.M. Kuptsov, A.P. Lisitzin, V.P. Shevchenko

Mean residence time of ²³⁴Th connected with suspended matter in the Kara Sea was calculated from the distribution of dissolved and suspended ²³⁴Th. Integral particulate fluxes at different levels were estimated for two stations. The flux increases only in the density interface layer, deeper it changes insignificantly. Two maxima of differential fluxes are fixed: in the surface layer, where primary production is maximum, and in the interface layer, where zooplankton is usually concentrated. Zooplankton realizes active transport of suspended matter. Differential fluxes were determined at 10 stations; their distribution is controlled by primary production, which depends on turbidity of river water in estuaries.

Ссылка на статью:



Купцов В.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П. ²³⁴Th как индикатор потоков взвешенного вещества в Карском море // Океанология. 1994. Том 34. № 5. С. 759-765.