

## Э К О Л О Г И Я

УДК 551.463.8(268.46)

### ПРИМЕНЕНИЕ БАЛАНСОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕДИМЕНТАЦИИ ТЕРРИГЕННОГО МАТЕРИАЛА В БЕЛОМ МОРЕ И ЕГО ВЫНОСА В АРКТИЧЕСКИЙ БАССЕЙН<sup>1</sup>

*С. В. Бердников<sup>2</sup>, А. Е. Цыганкова<sup>3</sup>*

APPLICATION OF BALANCE MODELS TO ESTIMATE THE SEDIMENTATION OF  
TERRIGENEOUS SUBSTANCES IN THE WHITE SEA AND ITS WASH OUT INTO THE  
ARCTIC BASIN

Berdnikov S. V., Tsygankova A. E.

To study transport and sedimentation of suspended matter in the White Sea, the mass-balanced approach has been applied. External sources of suspended particles have been analyzed. The balance of terrigenous substances has been estimated for detailed areas of the White Sea. The transport of suspended matter in the Barents Sea has been estimated. Comparative analysis of the contribution of river sediment runoff and abrasion to the size distribution of sediment particles has been carried out.

#### 1. Постановка задачи и описание подхода

В Белое море с водосборной территории площадью свыше 700 тыс. км<sup>2</sup> [1] поступает значительное количество химических веществ, мигрирующих в растворенном и взвешенном состояниях. Для многих соединений основная форма миграции связана с взвешенными минеральными частицами, поэтому процессы, определяющие особенности перемещения и захоронения взвешенного вещества в водоеме, важны для понимания судьбы химических соединений после их поступления в море.

Цель работы — применение балансовой мультикомпарментальной модели водного обмена и согласованной с ней модели динамики взвешенного вещества для количественной оценки захоронения терригенного материала, поступающего с суши в акваторию Белого моря.

Компарментальная модель крупномасштабного водного обмена в Белом море рассмотрена в работе [2]. Районирование Белого моря (рис. 1) основано на результатах кластерного анализа с использованием картосхем рельефа дна, поверхностной и придонной температуры и солёности воды для трех сезонов года (весна, лето, осень), опубликованных в работе [3].

По вертикали для всех районов, кроме Мезенского и южной части Онежского заливов, выделено два слоя. Вертикальное перемешивание между слоями в модели определяется двумя механизмами. Один имеет сезонный характер и в осенний период связан с конвекцией при охлаждении верхнего слоя, а в зимний период, после образования льда, с выходом солей в подледный слой по мере старения льда. Второй механизм реализован только в районах с сильным влиянием приливов, где вертикальный водообмен является интенсивным в течение года (районы Воронки и Горла).

---

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке РФФИ (03-05-65322).

<sup>2</sup>Бердников Сергей Владимирович, д-р геогр. наук, главный ученый секретарь Южного научного центра РАН, заведующий отделом Азовского филиала Мурманского морского биологического института КНЦ РАН.

<sup>3</sup>Цыганкова Алла Евгеньевна, преподаватель кафедры физической географии Ростовского государственного университета.



Рис. 1. Схема районирования Белого моря

Для расчета переноса и седиментации взвешенных веществ используется масс-балансовый подход, предложенный в работах [4–6] и модифицированный для случая двухслойной аппроксимации вертикальной неоднородности океанографических характеристик. В качестве переменных состояния рассматриваются пять размерных фракций взвешенных частиц: мелко- и среднеспесчаная, мелко- и крупноалевритовая и пелитовая. Внешними источниками терригенного материала являются твердый сток рек и абразия.

В рамках модели в качестве основных процессов, контролирующих изменчивость минеральной взвеси в море, рассматриваются: оседание частиц с учетом их размера, взмучивание донных отложений в зависимости от морфологических особенностей района и гидродинамических факторов, перенос при водном обмене между компартментами.

В основу схемы перемещения водных масс между компартментами положены существующие представления о квазипостоянной циркуляции вод Белого моря [7–10].

Водные массы Баренцева моря через западные районы Воронки (1 и 3 районы) и северный район Горла (6) проникают в Бассейн (8). Возврат водных масс вместе с речными водами, поступающими из Онежского, Кандалакшского и Двинского заливов, происходит последовательно через юго-восточную часть Бассейна (9), южную часть Горла (7), восточные районы Воронки (4 и 2).

Результатом расчета является сезонная динамика и распределение по районам концентрации взвеси в воде, содержание частиц разного размера в донных отложениях, баланс обломочного материала для каждого из рассматриваемых компартментов и моря в целом.

## 2. Поступление терригенного материала в Белое море

Абразия является основным источником поступления обломочного материала в Белое море (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Поступление обломочного материала в Белое море при абразии

Район, источник	Номер района	млн т/год
Воронка:		59,2
Канинский берег	2	24,0
Конушинский берег	5	28,0
Абрамовский берег	5	7,2
Горло:		5,8
Зимний берег	7	5,4
Терский берег	6	0,4
Бассейн:		2,1
Летний берег	12	1,3
Летний берег	9	0,4
Ляницкий берег	13	0,4
Всего		67,1

Примечание: по [11].

Скорость разрушения берегов неодинакова для разных районов моря и определяется особенностями протекания гидродинамических и литологических процессов. Наиболее полно особенности динамики берегов освещены в монографии [11], более поздние работы [12–14] в целом основываются на приведенных в этой монографии сведениях. Абразионные берега распространены преимущественно вдоль Канинского, Конушинского и Абрамовского берегов (рис. 1). Здесь в Белое море из-за разрушения берегов поступает около 60 млн т твердого вещества в год. Распределение материала абразии по размерам частиц следующее: на долю частиц пелитовой размерности приходится свыше 24 млн т в год, алевроита ежегодно поступает около 20 млн т, мелкого песка и частиц более крупного размера — 16 млн т.

Абразионные участки имеются также на Зимнем берегу, берегах Онежского полуострова и частично на Терском берегу на границе между 6 и 3 районами. В работе [11] предполагается, что за последние 6 тыс лет в Горле и Бассейне объем поступающего при абразионных процессах материала составлял примерно половину того количества, что ежегодно поступало от разрушения берегов в Воронке. Отмечается, что в настоящее время скорость абразионных процессов уменьшилась и количество поступающего в собственно море (в Бассейне и Горле) материала находится в интервале 10–20 млн тонн в год. Наши грубые оценки, основанные на представленных в [11]

картах скоростей абразии, расположения абразионных участков и описании берегов, дают несколько меньший объем поступления абразионного материала в районы Бассейна и Горла, около 8 млн тонн.

В сезонном аспекте ледовый режим Белого моря препятствует активному разрушению берегов в течение декабря-июня. Для участков Канинского берега характерна термоабразия, интенсивность которой прямо зависит от температуры морской воды и динамических факторов [15]. Для летнего периода, когда температура воды максимальна, характерны минимальные значения среднемесячной скорости ветра. Воздействие ветрового фактора усиливается к осени. Поэтому при расчетах принято, что абразия равна нулю в период отрицательных температур воды, в остальные месяцы (июль-ноябрь) интенсивность разрушения берегов одинакова — ежемесячно в воду поступает по 20 % годового объема.

*Твердый сток* в Белое море на порядок меньше, чем поступление обломочного материала при абразии. Имеются разные оценки твердого стока рек Белого моря в зависимости от рассматриваемого периода наблюдений [16–18]. По данным Г.И. Шамова [16] общий твердый сток рек составляет 16 млн т/год. По данным гидрологических Ежегодников за период 1980–1988 гг. твердый сток Северной Двины изменялся от 2,4 до 6,2 млн т/год, Мезени — от 270 до 600 тыс. т/год, Онеги — от 140 до 450

Т а б л и ц а 2

## Твердый сток в Белое море

Район, источник	Номер района	тыс. т/год
Воронка: р. Поной и др.	3	23
Мезенский залив:		829
р. Мезень	5	800
р. Кулой и др.	5	29
Горло:		18
р. Сосновка и др.	6	10
р. Золотица и др.	7	8
Бассейн (без заливов):		61
р. Варзуга и др.	8	19
р. Кемь и др.	10	35
р. Умба и др.	11	7
Двинский залив:		4414
р. Северная Двина	12	4400
р. Солза и др.	12	14
Онежский залив:		184
р. Онега	14	180
р. Малошуйка и др.	14	4
Кандалакшский залив: рр. Ковда, Кереть, Нива и др.	15	237
Всего		5765

Примечание: Твердый сток крупных рек Северной Двины, Мезени и Онеги по [18], малых рек — собственные оценки на основе данных о модуле твердого стока из работы [20].

тыс. т/год. В работе [11] со ссылкой на данные Г. В. Лопатина твердый сток основных рек оценен, соответственно, как 6,42 млн т, 860 и 220 тыс. т. В работе [17] приводятся следующие данные по твердому стоку: Северная Двина — 3,8 млн т, Мезень и Онега — 900 и 300 тыс. т/год соответственно.

При расчетах используются данные работы [18] по твердому стоку основных рек (Мезень, Северная Двина и Онега) и основанные на модуле твердого стока собственные оценки выноса терригенного материала малыми реками (табл. 2).

Сезонная динамика твердого стока характеризуется резким весенним максимумом в мае–июне, который совпадает с коротким периодом половодья. В этот период с твердым стоком основных рек Белого моря выносятся около 70 % от годовой величины стока терригенной взвеси.

Имеются различия фракционного состава выносимого основными реками взвешенного

материала. Во взвеси Северной Двины преобладают частицы алевритовой размерности во все фазы водного режима (52–58 %), процентное содержание пелита минимально (13–18 %), а песок занимает промежуточное положение (34 %). Взвесь Онеги преимущественно состоит из алеврита, содержание которого намного больше, чем других фракций и составляет от 64 до 74 %. В реке Мезень состав взвеси иной, т.к. содержание песчаной фракции здесь значительное (47–49 %) и почти совпадает с количеством алеврита (44–46 %), присутствие самой мелкой фракции — пелита — минимально и составляет менее 10 %.

*Поступление из атмосферы.* Прямые измерения состава аэрозолей летом 1991 г. в Белом море показали, что из атмосферы в акваторию поступает 0,75 мг/м<sup>2</sup> твердых частиц в сутки [19]. Объем золотого материала, поступающего из атмосферы на поверхность Белого моря, составляет около 25 тыс. т/год и в расчет не принимается.

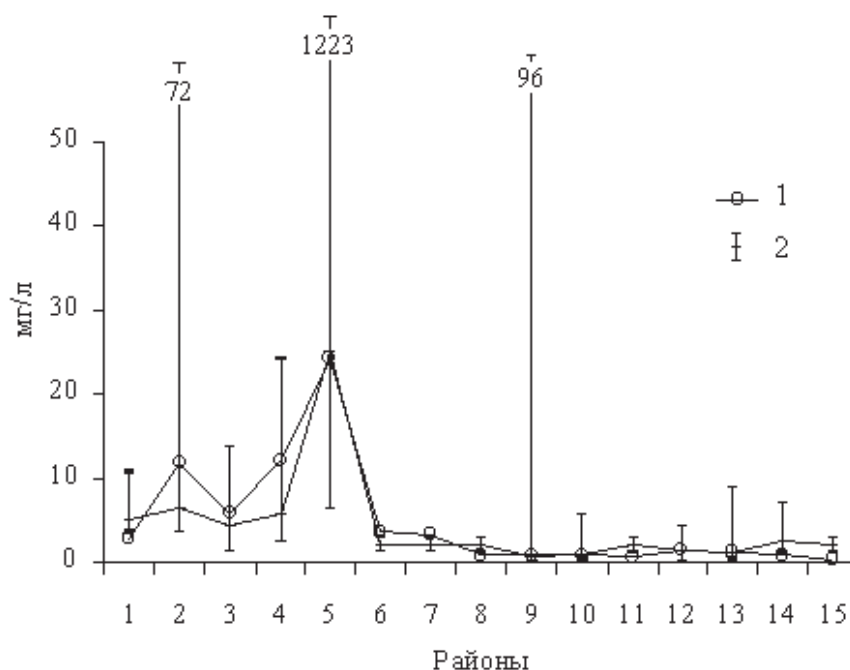


Рис. 2. Расчетное распределение средней по району концентрации взвеси в воде (мг/л) в сопоставлении с данными наблюдений: 1 — результаты расчета, 2 — интервал наблюдаемых значений концентрации взвеси [11] и медиана

### 3. Калибровочные вычислительные эксперименты

Размеры частиц, определяющие скорость их оседания, и особенности водообмена между районами влияют на пространственную дифференциацию поступающего в море обломочного материала. Скорость оседания частиц в зависимости от размеров и характера турбулентного поведения частиц в потоке задавалась, следуя рекомендациям работы [21, табл. 2.1 на стр. 171].

Для имитации взмучивания осадка в каждом районе задавались:

а) максимальная толщина слоя донных отложений, частицы которого потенциально могут быть вовлечены в водную толщу;

б) интенсивность взмучивания, зависящая от глубины района, скорости ветра и создаваемого при этом волнового воздействия на дно. Отмечается, что предельной глубиной волнового воздействия следует считать изобату 20 м [11]. Для районов, средняя глубина которых больше этой величины, максимальная толщина слоя донных отложений рассчитывалась с учетом распределения глубин по площади района. Поэтому даже для глубо-

ких районов, например, в Бассейне (8 район), в прибрежной зоне возможно взмучивание осадка, хотя площадь этой зоны будет небольшой.

Для отдельных районов (прежде всего, это районы Горла и Воронки) был введен постоянно действующий фактор, обусловленный наличием сильных приливно-отливных течений. Здесь взмучивание учитывалось даже в зимний период, когда акватория моря покрыта льдом, и влияние волнения на дно ограничено.

Имеется значительная неопределенность в оценке фактора взмучивания донных отложений, поэтому расчеты проводились при разных вариантах интенсивности этого процесса в различных районах моря. В результате был выбран наиболее приемлемый с нашей точки зрения вариант расчетной динамики взвеси в Белом море.

*Взвесь в воде.* Расчетное распределение взвеси в воде Белого моря воспроизводит наблюдаемые закономерности (рис. 2). Максимальные значения отнесены к основным источникам поступления взвешенного материала (твердый сток и абразионные процессы), наибольшие концентрации характерны для

Т а б л и ц а 3

Расчетное содержание частиц разного размера в верхнем слое донных отложений, %

Район		[по 11]			Расчет		
		Пелит	Алеврит	Песок	Пелит	Алеврит	Песок
Воронка	1	< 10	10–30	> 70	6	33	62
	2	10–30	10–30	> 70	8	42	49
	3	< 10	10–50	> 70	7	40	53
	4	< 10	10–30	> 70	9	50	41
Мезенский залив	5	< 10	10–30	> 70	13	39	48
Горло	6	< 10	10–30	> 70	7	40	53
	7	< 10	10–30	> 70	10	40	50
	8	> 70	10–30	< 10	80	19	1
Бассейн	9	30–50	30–50	< 10	46	37	16
	10	10–30	20–40	< 60	32	40	28
	11	> 70	10–30	< 10	84	12	4
	12	10–30	20–70	30–50	10	56	34
Онежский залив	13	10–30	10–30	> 70	25	38	37
	14	10–50	30–50	10–30	37	48	15
Кандалакшский залив	15	10–30	30–50	30–50	69	20	11

Мезенского залива. Вместе с тем, модельные значения для восточных районов Воронки выше, чем средние (медиана) по данным наблюдений.

*Гранулометрический состав донных отложений.* Как показали расчеты без учета взмучивания донных отложений, формирование гранулометрического состава осадков происходит в результате механической дифференциации по размеру частиц и перераспределения мелких фракций при водообмене между районами. В этом случае верхний слой донных отложений в целом «наследует» гранулометрическую структуру источников поступления обломочного материала и для районов, в которых отсутствуют значительные собственные источники терригенной взвеси, пелитовая фракция в осадках является доминирующей. Такое распределение материала по крупности в донных отложениях не соответствует данным наблюдений (табл. 3).

Более адекватная картина получена при учете взмучивания донных отложений. В результате многократного вовлечение пелитовых и мелкоалевритовых частиц в водную толщу в гидродинамически активных районах доля пелитовой фракции в районах Воронки и Горла уменьшилась до 6–13 %, песчаной возросла до 40–62 %. Близкие к наблюдаемым значения получены и для остальных районов.

#### 4. Перенос и седиментация терригенного материала в Белом море

Результаты расчета распределения взвешенного вещества в воде и гранулометрической структуры донных отложений, адекватные данным наблюдений, позволили поставить задачу оценки баланса поступающего с суши обломочного материала для моря в целом и отдельных районов. С этой целью одновременно с вычислением динамики переноса и седиментации взвеси рассчитывалась динамика трассеров, которые служили для маркировки частиц, поступающих из разных источников (в нашем случае это реки и абразия). Методика трассерных вычислительных экспериментов впервые апробирована для Азовского моря [5,6], где роль трассеров речной взвеси выполняют твердые техногенные частицы, доля которых в твердом стоке рек составляет 11–12% [22], а материал абразии практически не содержит антропогенного материала.

Применение трассеров позволяет маркировать потоки вещества, поступающие из разных источников, проследить направления их переноса в пределах Белого моря, выявить вклад твердого стока и абразии в формировании донных осадков определенных районов моря.

Т а б л и ц а 4

Расчетные величины захоронения в Белом море терригенного материала стока рек  
и его выноса за пределы районов и в Баренцево море, тыс. т/год

Район	Поступление			Захоро- нение	Вынос	Козф- фициент выноса, %
	Твердый сток	Из других районов	Всего			
Весь материал						
Кандалакшский за- лив	237	–	237	152	85	35,9
Двинский залив	4414	–	4414	3348	1066	24,2
Онежский залив	184	–	184	169	15	8,2
Бассейн (без зали- вов)	61	1166	1227	967	260	21,2
Горло	18	260	278	72	206	74,1
Мезенский залив	829	–	829	713	116	14,0
Воронка (без Мезен- ского залива)	23	322	345	95	250	72,5
Белое море	5766	–	5766	5516	250	4,3
Пелит						
Кандалакшский за- лив	116	–	116	41	75	64,7
Двинский залив	574	–	574	117	457	79,6
Онежский залив	33	–	33	20	13	39,4
Бассейн без заливов	30	545	575	355	220	38,3
Горло	9	220	229	27	202	88,2
Мезенский залив	58	–	58	25	33	56,9
Воронка (без Мезен- ского залива)	11	235	246	16	230	93,5
Белое море	831	–	831	601	230	27,7
Алеврит						
Кандалакшский за- лив	81	–	81	71	10	12,3
Двинский залив	2604	–	2604	2120	484	18,6
Онежский залив	122	–	122	120	2	1,6
Бассейн без заливов	21	496	517	480	37	7,2
Горло	6	37	43	39	4	9,3
Мезенский залив	357	–	357	294	63	17,6
Воронка (без Мезен- ского залива)	8	67	75	55	20	26,7
Белое море	3199	–	3199	3179	20	0,6
Песок						
Кандалакшский за- лив	40	–	40	40	0	0,0
Двинский залив	1236	–	1236	1111	125	10,1
Онежский залив	29	–	29	29	0	0,0
Бассейн без заливов	10	125	135	132	3	2,2
Горло	3	3	6	6	0	0,0
Мезенский залив	414	-	414	394	20	4,8
Воронка (без Мезен- ского залива)	4	20	24	24	0	0,0
Белое море	1736	–	1736	1736	0	0,0

Т а б л и ц а 5

Расчетные величины захоронения в Белом море материала абразии  
и его выноса за пределы районов и в Баренцево море, млн т/год

Район	Поступление			Захоро- нение	Вынос	Коэф- фициент выноса, %
	Абразия	Из других районов	Всего			
Весь материал						
Кандалакшский залив	–	0,2	0,2	0,2	0	0,0
Двинский залив	1,3	–	1,3	0,8	0,5	38,5
Онежский залив	0,4	–	0,4	0,4	0	0,0
Бассейн (без заливов)	0,4	5,2	5,6	5,4	0,2	3,6
Горло	5,7	2,2	7,9	3,2	4,7	59,5
Мезенский залив	35,3	–	35,3	21,3	14,0	39,7
Воронка (без Мезенско- го залива)	24	14,0	38,0	15,4	22,6	59,5
Белое море	67,1	–	67,1	46,7	20,4	30,4
Пелит						
Кандалакшский залив	–	0,2	0,2	0,2	0	0,0
Двинский залив	0,5	–	0,5	0,2	0,3	60,0
Онежский залив	0,2	–	0,2	0,2	0	0,0
Бассейн (без заливов)	0,2	4,3	4,5	4,3	0,2	4,4
Горло	2,3	1,9	4,2	0,2	4,0	95,2
Мезенский залив	14,1	–	14,1	3,1	11,0	78,0
Воронка (без Мезенско- го залива)	9,6	11,0	20,6	1,2	19,4	94,2
Белое море	26,9	–	26,9	9,4	17,5	65,1
Алеврит						
Кандалакшский залив	–	–	–	–	–	–
Двинский залив	0,4	–	0,4	0,3	0,1	25,0
Онежский залив	0,1	–	0,1	0,1	0	0,0
Бассейн (без заливов)	0,1	0,8	0,9	0,9	0	0,0
Горло	1,7	0,3	2	1,3	0,7	35,0
Мезенский залив	10,6	–	10,6	8,3	2,3	21,7
Воронка (без Мезенско- го залива)	7,2	2,3	9,5	6,5	3,0	31,6
Белое море	20,1	–	20,1	17,4	2,7	13,4
Песок						
Кандалакшский залив	–	–	–	–	–	–
Двинский залив	0,4	–	0,4	0,3	0,1	25,0
Онежский залив	0,1	–	0,1	0,1	0	0,0
Бассейн без заливов	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0,0
Горло	1,7	–	1,7	1,7	0	0,0
Мезенский залив	10,6	–	10,6	9,9	0,7	6,6
Воронка (без Мезенско- го залива)	7,2	0,7	7,9	7,7	0,2	2,5
Белое море	20,1	–	20,1	19,9	0,2	1,0



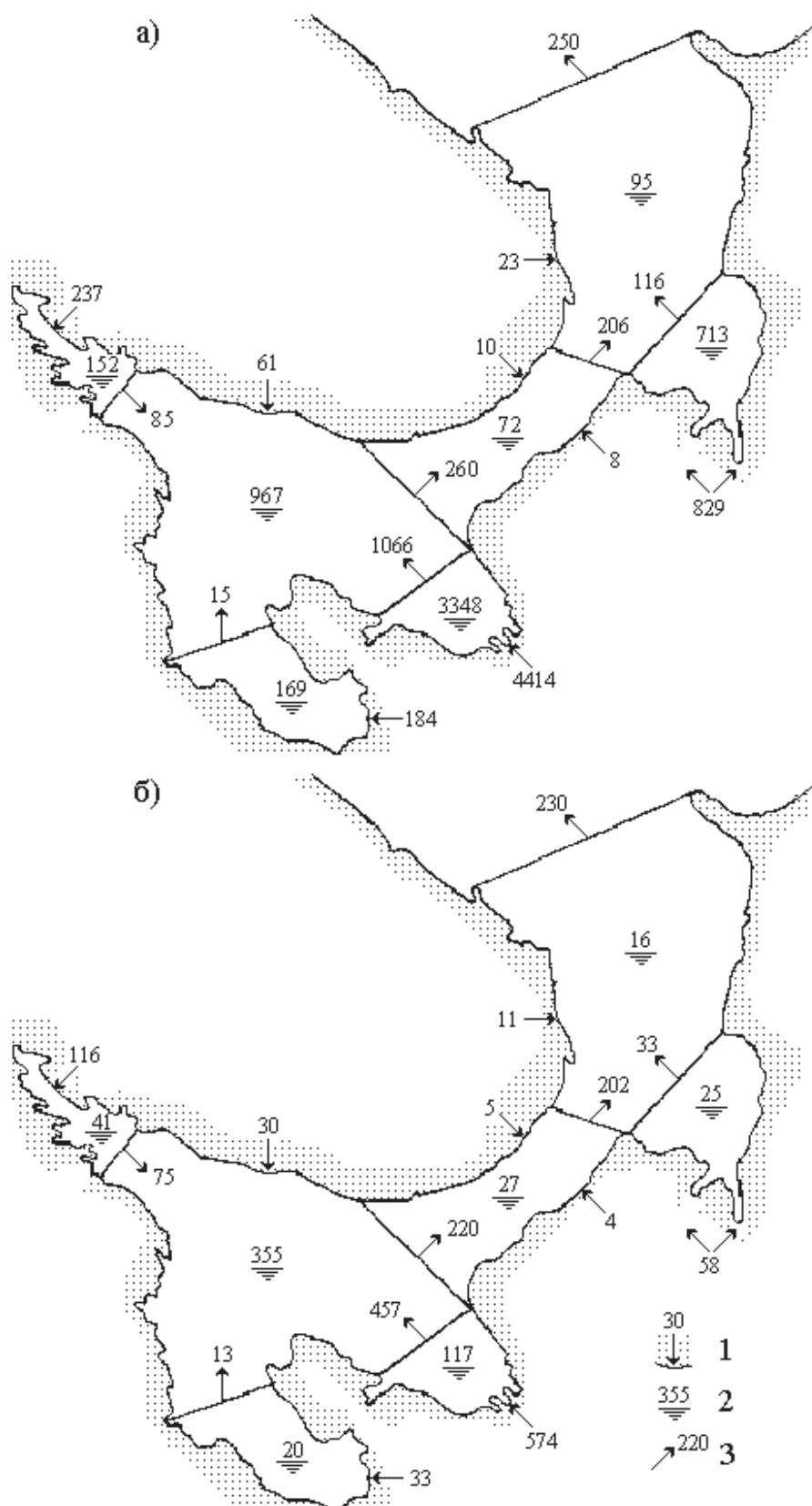


Рис. 3. Распределение твёрдого стока рек по районам Белого моря (тыс. т):

а) суммарный, б) частицы пелитовой размерности

1 — поступление, 2 — захоронение, 3 — перенос течениями

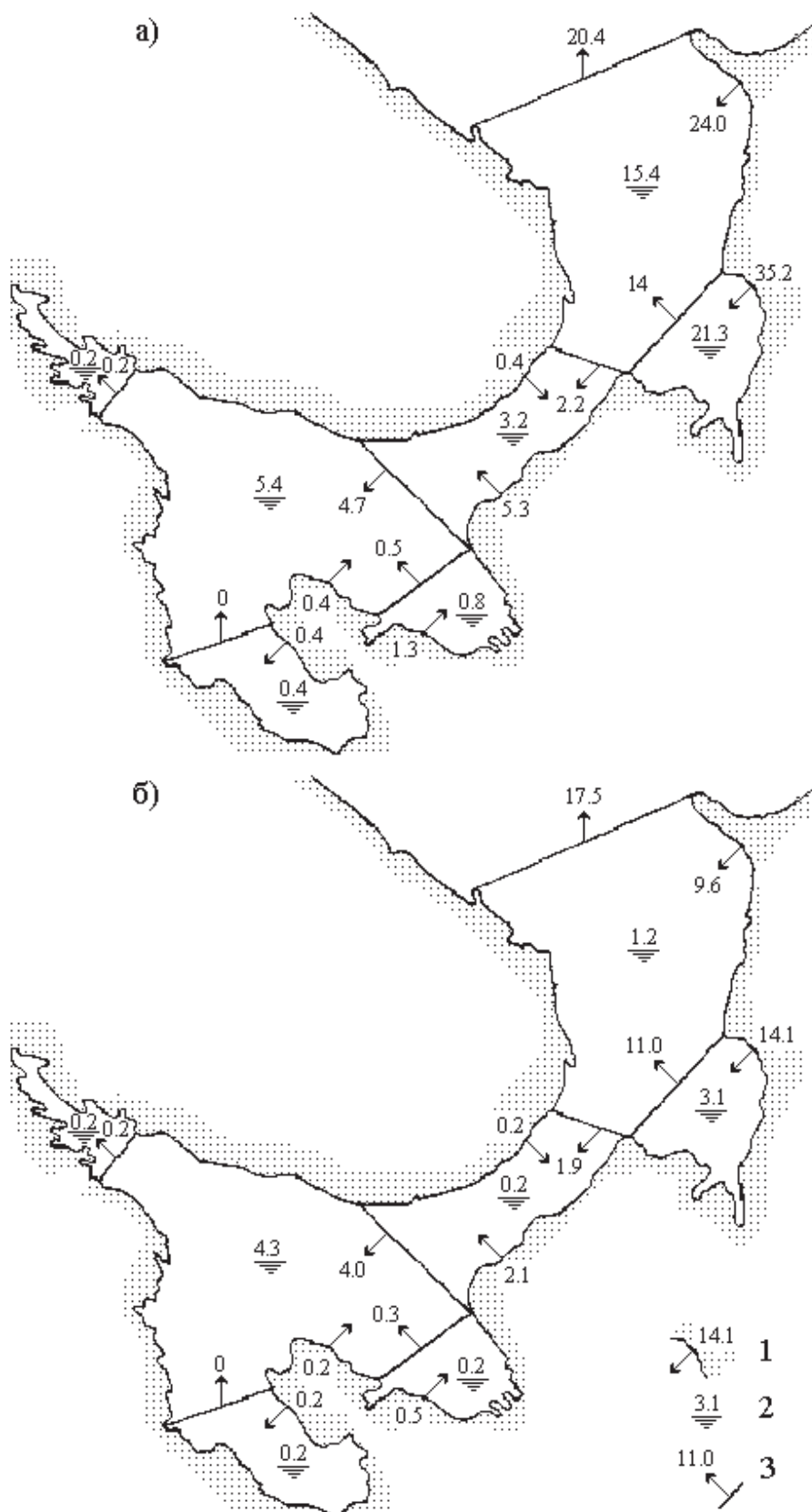


Рис. 4. Распределение материала абразии по районам Белого моря (млн т):  
 а) суммарный, б) частицы пелитовой размерности  
 1 — поступление, 2 — захоронение, 3 — перенос течениями

*Баланс осадочного материала.* Имеются следующие представления о динамике поступающего с суши обломочного материала в северной части Белого моря [11]. Свыше 40 млн т мелкого материала (пелитовой и алевроитовой размерности) выносятся течениями в направлении южной части Баренцева моря. Более крупный материал (20 млн т, размером более 0,01 мм) отлагается на дне, формируя песчаные гряды. Значительные скорости приливно-отливных течений в Горле также не способствуют отложению в донных отложениях пелито-алевритового материала.

По мнению Е. Н. Невесского и соавторов [11] обломочный материал, поступающий от абразии берегов Канинско-Мезенского района, практически не принимает участия в питании центральной части Белого моря. Часть взвешенного материала, переносимая с течениями из Мезенского залива в сторону Горла, может в расчет не приниматься, а питание внутренних частей моря происходит за счет собственного материала.

Выполненные расчеты переноса и седиментации поступающего с суши обломочного материала (табл. 4, 5; рис. 3, 4) позволяют сделать вывод о более сильной взаимосвязи относительно разных по литологическим условиям районов Белого моря (Воронки, Горла и Бассейна).

Интенсивный обмен в системе «вода–дно» пелитовыми и мелкоалевритовыми частицами из верхнего слоя донных отложений играет важную роль в перераспределении частиц между динамически активными районами Воронки и Горла и более глубокими и спокойными в гидродинамическом отношении районами Бассейна, определяет закономерности формирования современной гранулометрической структуры донных отложений Белого моря.

За счет ресуспензии взвешенного материала увеличивается его вынос в южную часть Баренцева моря, поток обломочного материала за пределы Белого моря составляет около 21 млн т в год, что почти в два раза меньше величины, указываемой Е. Н. Невесским, В. С. Медведевым и В. В. Калининко [11]. Основу выносимого материала составляет материал абразии, т.к. частицы твердого стока рек (до 96%) остаются в пределах Белого моря. Из 250 тыс. т речного обломочного материала, выносимого в Баренцево море, 230 тыс. т —

частицы пелитовой размерности, остальное — алевроит.

Из 6,4 млн т осадочного материала, который осаждается в пределах Бассейна, на долю местных источников приходится 1,8 млн т, а 4,6 млн т — материал, переносимый течениями из Воронки и Горла. Таким образом, существующее представление о незначительной роли северной части моря в формировании осадков собственно моря не совсем верно.

*Роль твердого стока в формировании донных отложений.* Трассерные эксперименты позволили также выявить относительный (по сравнению с влиянием абразии) вклад речного обломочного материала в формировании донных отложений различных районов Белого моря, сезонные закономерности этого процесса (рис. 5).

Вклад речной взвеси в формирование донных отложений в Двинском заливе изменяется от 35–40% зимой до 96% в паводковый период, в среднем за год 57% верхнего слоя осадка сформированы за счет речного аллювия. Влияние Северной Двины сказывается и на донных отложениях прилегающего района Бассейна (9 компартмент).

Для Онежского залива влияние твердого стока Онеги (который примерно в 24 раза меньше твердого стока Северной Двины) изменяется в интервале 50–70% (в среднем 56%), что отражает соотношение местных источников поступления обломочного материала в большей степени, чем внешнее поступление за счет переноса взвеси течениями.

Несмотря на существенную разницу в объемах твердого стока и абразии в Мезенском заливе, в сезонной динамике вклад речной взвеси в формирование донных осадков залива может возрастать до 37% весной в период паводка, когда абразия еще не так активна. К осени вклад речной взвеси в донных отложениях падает до величины менее 1%.

*Выводы.* С помощью балансовой модели переноса и седиментации взвешенного вещества показано:

- в Баренцево море ежегодно выносятся в среднем около 21 млн т взвеси из 73 млн т, поступающей в Белое море с суши;
- пределы Белого моря покидает 4,3% частиц (250 тыс т), поступающих с речным стоком, преимущественно пелитовой размерности;
- влияние абразионных процессов в Воронке и Горле на формирование донных осад-

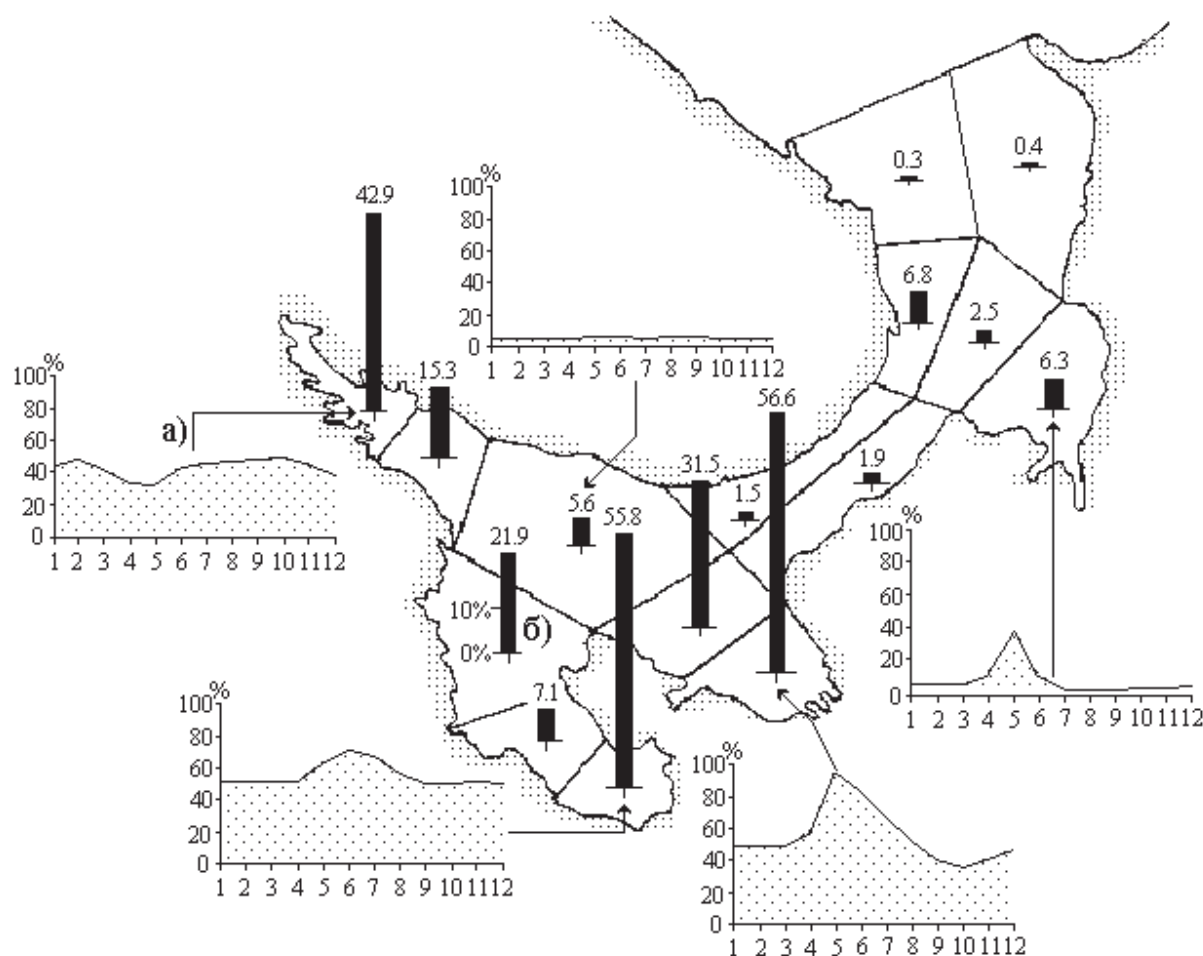


Рис. 5. Результаты расчета влияния твердого стока рек на формирование размерной структуры верхнего слоя донных отложений Белого моря:

- а) сезонная динамика содержания частиц, поступающих с речным стоком, в верхнем слое осадка (%)  
 б) среднегодовое содержание взвешенных частиц, поступающих с речным стоком, в верхнем слое осадка (%)

ков Бассейна более значительно, чем представлялось ранее и обеспечивает не менее 70% (около 4,6 млн т) осадочного материала;

Получены новые данные о региональных особенностях накопления осадочного материала в донных отложениях Белого моря, определяемых сезонными и пространственными различиями в потоках терригенного материала с твердым стоком и при абразии, особенностями водного обмена между районами моря.

### Литература

1. *Ivanov V. V.* Catchment areas and river runoff into the basins of the Russian Arctic seas. Annex I // Identification and description of the main sources of environmental pollution in the Russian Federation and transport routes of pollutants to the Arctic seas. St. Petersburg, 2000. P. 1–29.
2. *Цыганкова А. Е., Бердников С. В.* Массбалансовый подход к изучению крупномасштабного водообмена и его влияния на формирование гидрохимического режима в Белом море // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. Приложение. 2003. № 12. С. 31–44.
3. Гидрологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 5. Белое море. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 235 с.
4. *Berdnikov S. V., Ivanov V. V.* Compartmental model of the hydrological and hydrochemical parameters of the Pechora estuary // Global changes and the Barents Sea region / Proc of the first International; BASIS Research conference, St. Petersburg, Russia, University of Muenster,

- Muenster, Germany. 1999. P. 424–425.
5. Бердников С. В., Ивлиева О. В., Прудникова В. В. Математическое моделирование переноса и седиментации техногенных примесей в Азовском море // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 6. С. 805–814.
  6. Бердников С. В., Ивлиева О. В., Прудникова В. В. Применение компартментальной модели для исследования переноса и захоронения твердых техногенных примесей // *Среда, биота и моделирование экологических процессов в Азовском море*. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2001. С. 226–239.
  7. Тимонов В. В. Схема общей циркуляции вод бассейна Белого моря и происхождение его глубинных вод // *Тр. ГОИН*. 1947. Вып. 1(13). С. 118–131.
  8. Елисов В. В. Численное моделирование совместной эволюции термохалинной структуры деятельного слоя океана и ледяного покрова // *Тр. ГОИН*. 1991. Вып. 197. С. 121–129.
  9. Елисов В. В. Оценка водного, теплового и солевого балансов Белого моря // *Метеорология и гидрология*. 1997. № 9. С. 83–93.
  10. Елисов В. В. Оценка объемов водных масс Белого моря // *Метеорология и гидрология*. 1999. № 9. С. 78–85.
  11. Невесский Е. Н., Медведев В. С., Калинин В. В. Белое море: седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977. 236 с.
  12. Берега / Каплин П. А., Леонтьев О. К., Лукьянова С. А., Никифоров Л. Г. М.: Мысль, 1991. 479 с.
  13. Геоэкология шельфа и берегов морей России / Айбулатов Н. А. М.: Ноосфера, 2001. 427 с.
  14. Лукьянова С. А., Сафьянов Г. А., Соловьева Г. Д. Некоторые оценки размыва морских берегов // *Водные ресурсы*. 2002. Т. 29. № 4. С. 389–394.
  15. Арэ Ф. Э. Термоабразия морских берегов. М.: Наука, 1980. 159 с.
  16. Шамов Г. И. Сток взвешенных наносов рек СССР // *Тр. ГГИ*. 1948. Вып. 20. С. 40–57.
  17. 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 // *Amer. J. Sci.* 1996. Vol. 296. P. 664–691.
  18. Михайлов В. Н. Устья рек России и сопредельных стран: Прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
  19. Шевченко В. П., Лисицын А. П., Купцов В. М., Ван-Малдерен, Мартэн Ж.-М., Ван-Грикен Р., Хуан В. В. Состав аэрозолей в приводном слое атмосферы над морями западного сектора Российской Арктики // *Океанология*. 1999. Т. 39. № 1. С. 142–151.
  20. Брызгалов В. А., Иванов В. В. Многолетняя и сезонная изменчивость химического стока рек бассейна Белого моря в условиях антропогенного воздействия // *Экологическая химия*. 2002. Т. 11. Вып. 2. С. 91–104.
  21. Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 455 с.
  22. Хрусталева Ю. П., Ивлиева О. В. Проблемы антропогенной морской седиментологии (на примере Азовского моря). Ростов-на-Дону: Гефест, 1999. 196 с.

Статья поступила 7 августа 2004 г.

Южный научный центр РАН, Мурманский морской биологический институт (Азовский филиал) КНЦ РАН, Ростовский государственный университет

© Бердников С. В., Цыганкова А. Е., 2004