

Разработка методов ретроспективного анализа многолетней динамики элементов гидрологического режима Баренцева моря (температура и солёность воды, ледовый режим)

1 Методы ретроспективного анализа многолетней динамики элементов гидрологического режима Баренцева моря информации с помощью компартментальной модели

Компартментальные модели занимают промежуточное положение между точечными моделями и моделями с распределёнными параметрами и представляют собой систему уравнений, позволяющих описывать водный обмен между компартментами, балансы консервативных примесей и взвешенного вещества, трансформационные изменения химического состава.

Проведение модельных расчётов предполагает задание начальных и граничных условий, что может быть сделано либо с использованием наблюдений, либо на основе известных закономерностей гидрологического режима. Так, на открытых участках прибрежной зоны могут считаться известными в первом приближении температура, солёность и фоновые уровни загрязнения на морской границе (по многолетним данным) [1].

Применение данного подхода предполагает сбор, анализ и обобщение разнородной информации, формирование базы исходных данных для выполнения расчётов. Важным этапом работы является обработка результатов расчётов, их сравнение с данными наблюдений для проверки адекватности моделей.

Разрабатываемый комплекс математических моделей представляет систему взаимосвязанных модулей (в соответствии с рисунком 1) или вычислительных алгоритмов, компьютерных программ, которые определенным образом преобразуют поступающую на вход информацию в выходные данные, имеющие как самостоятельное значение, так и используемые другими модулями.

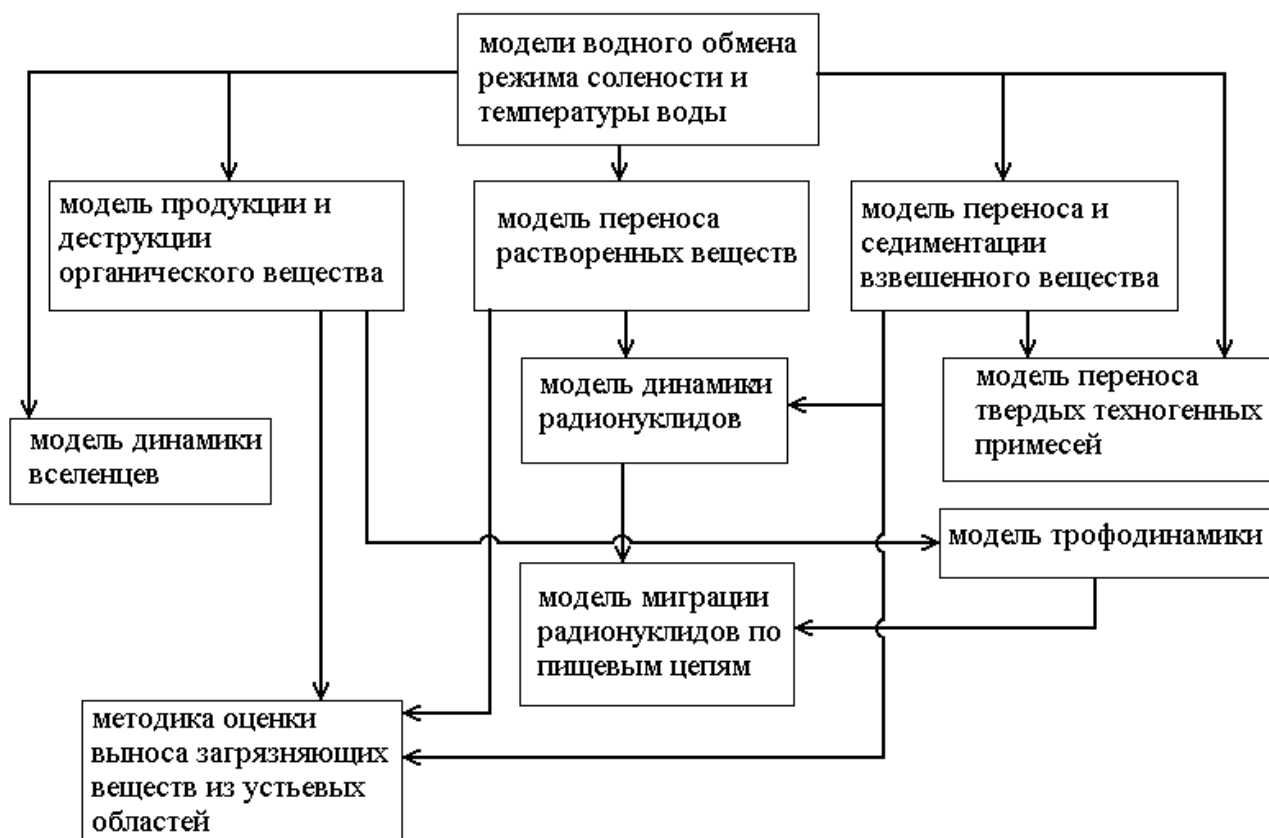


Рисунок 1 – Схема взаимосвязи моделей

Базовый гидрологический модуль включает балансовые модели водного обмена, солености, температуры воды и макрохарактеристик ледового режима (ледовитость и толщину льда). Для рассматриваемого водного объекта выделяются границы, отделяющие его от внешней среды. Как правило, это географические границы морской системы (береговая линия, острова, проливы). Определяются внешние факторы, влияющие на формирование особенностей гидрологического режима (материковый сток, водообмен с внешней средой, климатические и метеорологические факторы). Чтобы отразить главные океанографические черты морской системы (структуру водных масс, особенности циркуляции вод, рельеф берегов и дна, устойчивые закономерности пространственного распределения океанографических полей, проявляющиеся на осредненных картах) проводится горизонтальное районирование водного объекта, деление его на боксы (компарменты).

Задача гидрологического блока – количественная оценка водных потоков между районами в результате действия разнообразных динамических процессов (течения, подъем и опускание вод, приливы, сгонно-нагонные явления, макро-, мезо- и микромасштабные вихри, ветровое перемешивание, термогалинная конвекция и др.). После количественной оценки элементов гидрологического режима ставится задача изучения его влияния на формирования полей других абиотических и биотических компонентов морской экосистемы, т.е. выявление так называемой

консервативной составляющей изменчивости, обусловленной смешением водных масс с разными свойствами.

С моделями водообмена согласованы модули, предназначенные для расчета переноса и динамики растворенных веществ, переноса и седиментации взвешенного вещества, продукции и деструкции органического вещества.

Рассматриваемый модельный подход содержит ряд этапов. Первый этап связан с районированием водоема и выделением в нем набора компартментов (боксов), заданием морфометрических характеристик районов, с помощью типовых схем неперiodической циркуляции водных масс. На втором этапе под конкретный водоем подстраиваются модели водного, теплового и солевого балансов. В результате вычислительных экспериментов производится калибровка направления и интенсивности переноса водных масс между районами. Расчеты проводятся для среднесноголетних значений внешних факторов (речной сток, осадки, испарение, приток атлантических вод, тепловые потоки на границе с атмосферой, ледовый режим). В качестве трассера рассматривается соленость, в отдельных случаях температура воды, результаты расчета сравниваются с усредненными за многолетний период по рассматриваемым районам данными наблюдений.

Математические уравнения и особенности применяемых моделей подробно описаны в работах [2, 3], а здесь приводятся основные моменты (см. раздел 2).

2 Описание модели водообмена

Основные конструктивные элементы модели водообмена приведены в соответствии с рисунком 2. Чтобы отразить главные океанографические черты рассматриваемой морской системы (структуру водных масс, особенности циркуляции вод, рельеф берегов и дна, устойчивые закономерности пространственного распределения океанографических полей, проявляющиеся на осредненных картах) проводится горизонтальное районирование водного объекта, деление его на боксы (компарменты). В зависимости от глубины и вертикальной структуры водных масс выделяются следующие типы пространственных компарментов: а) мелководные нестратифицированные, б) расположенные в пределах шельфа и имеющих двухслойную структуру и в) глубоководные (в соответствии с рисунком 3). Они отличаются набором компарментов-резервуаров (лед, водные резервуары верхнего и нижнего слоев, донные отложения).

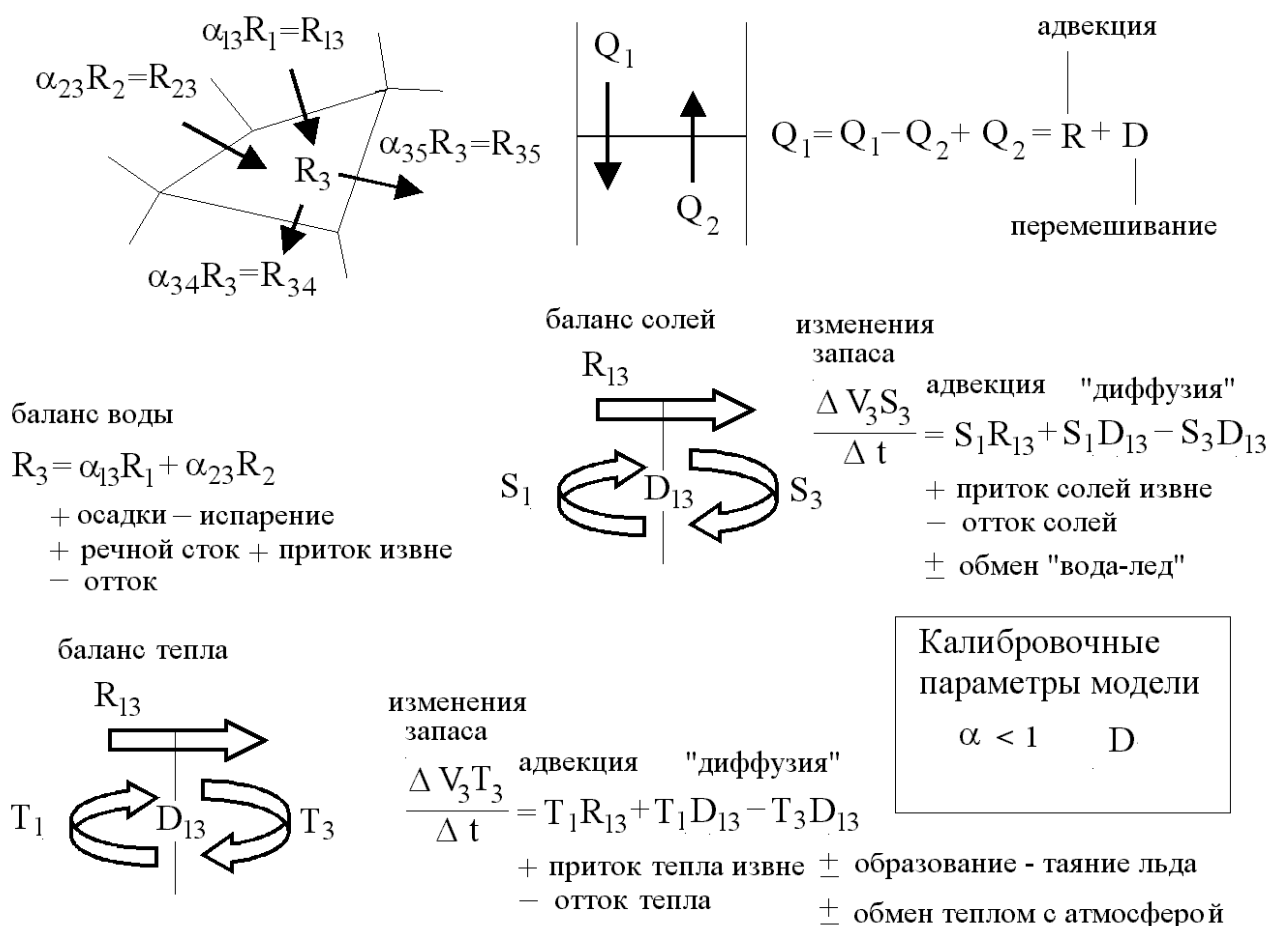


Рисунок 2 - Основные конструктивные элементы гидрологического модуля

масс извне через жидкие границы с другими водоемами в верхний и нижний слои соответственно; D_{ki} - водные потоки, которые отражают диффузионные процессы на макроуровне, с характерным масштабом диффузии, зависящим от средних размеров компартментов, $D_{ki}=D_{ik}$; при $k,j=i$ поток D_{ii} - отражает вертикальное перемешивание водных масс, обусловленное преимущественно конвекцией.

Водный поток через границу между районами за определенный интервал времени может быть выражен через адвективную составляющую (R_i) и перемешивание (D_{ki}). Здесь R_i - общий поток, вытекающий за определенный промежуток времени из i -го компартмента ($R_i=\sum_j Q_{ij}+Q_{i0}$). Определим через α_{ij} его долю, которая вытекает в j -й компартмент, тогда $Q_{ij}=\alpha_{ij}R_i$, аналогичным образом $Q_{i0}=\alpha_{i0}R_i$, при этом справедливо $\sum_j \alpha_{ij}+\alpha_{i0}=1$. Такое упрощение позволяет заменить балансовые соотношения (1) системой линейных уравнений (2) относительно величин R_i .

$$\begin{aligned} UR &= B, \quad u_{ii} = 1, \quad u_{ij} = -\alpha_{ij}, \\ R &= (R^S_1, R^S_2, \dots, R^S_N, R^B_1, R^B_2, \dots, R^B_N)^T, \\ B &= (B^S_1, B^S_2, \dots, B^S_N, B^B_1, B^B_2, \dots, B^B_N)^T, \\ B^S_i &= Q_{0i} - dV^S_i/dt + Q^D_i - Q^F_i, \quad dV^S_i/dt = A_i dH^S_i/dt, \quad B^B_i = Q_{0i}, \quad dV^B_i/dt = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Изменение объема компартментов верхнего слоя считается известной функцией времени и отражает динамику изменения уровня, объем нижнего слоя не изменяется.

Для учета особенностей водообмена между компартментами в разные временные периоды матрица водообмена U (т.е. значения параметров α_{ij}) может изменяться так часто, как это необходимо.

Величины α_{ij} , D_{ki} будем называть параметрами водообмена. Для их оценки (идентификации) применяется методика трассерных вычислительных экспериментов с использованием в качестве маркеров перемещения водных масс растворенных веществ, обладающие консервативными свойствами.

Динамическая балансовая модель для некоторого растворенного вещества-трассера состоит из двух блоков:

А) модели переноса (3):

$$\begin{aligned} dM/dt &= UM + F, \quad u_{ii} = -(R_i + \sum_k D_{ki})/V_i, \quad u_{ij} = (\alpha_{ji}R_j + D_{ji})/V_j, \\ F &= (F^S_1, F^S_2, \dots, F^S_N, F^B_1, F^B_2, \dots, F^B_N)^T, \\ M &= (M^S_1, M^S_2, \dots, M^S_N, M^B_1, M^B_2, \dots, M^B_N)^T, \quad M_i = V_i C_i, \\ F^S_i &= Q^i_F C^i_F + Q^i_P C^i_P + Q^i_{BS} C^i_{BS}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$F_i^B = Q_{BB}^i C_{BB}^i, i=1, \dots, N,$$

где: C_F^i , C_P^i , C_{BS}^i , C_{BB}^i – концентрация трассера в речной воде, осадках и водных масс, поступающих из соседних водоемов, соответственно.

Б) модели обмена растворенным веществом-трассером между резервуарами в результате замерзания и таяния льда, стекания капель рассола в воду по мере старения льда, диффузии растворенных веществ в донные отложения и обратно, вертикального перемешивания вод. Балансовые уравнения для учета этой группы процессов рассмотрим для компартментов, имеющих все виды резервуаров (4):

$$\begin{aligned} d(h_1 z)/dt &= l_2 x - l_1 z - l_3 z + F_A A_I, \\ d(h_1 x)/dt &= d(y-x) + l_1 z + l_3 z - l_2 x + F_A(1-A_I) + F_{AB}, \\ d(h_2 y)/dt &= d(x-y) + k(w-y), \\ d(h_5 w)/dt &= k(y-w). \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь z , x , y , w – концентрация соответствующей переменной во льду, воде (верхний и нижний слои), донных отложениях или глубоких слоях воды в зависимости от типа рассматриваемого района; h_1 , h_2 , h_5 – толщина (м) соответствующего резервуара; $l_2(t)$, $l_1(t)$ – скорости образования и таяния льда (м/сут); $l_3(t)$ – интенсивность стекания капель рассола по мере старения льда (л/сут); $d(t)$ – скорость вертикального перемешивания водных масс (м/сут); $d(t)=D(t)/A$, $D(t)$ – поток, определяющий вертикальную составляющую перемешивания водных масс, A – площадь компартмента; k – скорость диффузионного обмена растворенными компонентами между водой и донными отложениями, с глубокими слоями, $F_A(t)$ – поток частиц из атмосферы (г/м²/сут), A_I – доля площади, занятая льдом, $F_{AB}(t)$ – береговые источники (г/м²/сут).

Из матрицы водообмена исключена вертикальная составляющая водного обмена, отвечающая за вертикальное перемешивание водных масс, и включена в модель обмена между резервуарами.

Процедура калибровки параметров модели водообмена состоит в проведении серии вычислительных экспериментов по расчету концентрации трассера, который принят в качестве маркера водных масс, с применением модели (1-4), сравнении результатов расчета с данными наблюдений, осредненными по каждому компартменту, резервуару и за соответствующий период, корректировке параметров α_{ij} и D_{ji} до тех пор, пока разница между расчетными значениями и данными не будет меньше некоторой величины, принятой в качестве удовлетворительной точности модельного приближения (6).

Предварительные значения калибровочных параметров водообмена α_{ij} , α_{i0} могут быть получены по данным наблюдений за скоростями течений (5). Например, для i -го компартмента:

$$\alpha_{ij} = v_{ij}A_{ij}/\sum_j v_{ij}A_{ij}, \quad (5)$$

где v_{ji} - средняя за определенный период скорость течений через боковую границу между компартментами по направлению из i -го компартмента в j -й, A_{ij} - площадь границы.

Для параметризации перемешивания используется следующая аппроксимация водных потоков D_{ji} :

$$D_{ji} = D_{ij} = D_0(t)\delta_{ij}A_{ij}, \quad D_{ii} = d(t)A_i, \quad (6)$$

где $D_0(t)$ - средняя для всего водоема, но зависящая от времени, скорость горизонтального перемешивания ("диффузии"), δ_{ij} - параметр для локальной корректировки интенсивности перемешивания, $d(t)$ – скорость вертикального перемешивания ("конвекция").

Величина $D_0(t)$ может быть функцией скорости ветра и ледовитости. Для оценки величины $d(t)$ используются два подхода. В одном случае скорость вертикального перемешивания задается из общих соображений: весной при таянии льда и летом полагается равной нулю, осенью и зимой – отличной от нуля, ориентиром служат вертикальные профили солености и температуры воды в этот период. При другом подходе скорость вертикального перемешивания рассчитывается в зависимости от плотности воды в верхнем и нижнем слоях по алгоритму, предложенному в работе [4]. В этом случае модель водообмена и модели солености и температуры воды становятся взаимосвязанными и общая модель существенно усложняется.

На выходе гидрологического блока получаем следующие расчетные характеристики.

1. Матрицу потоков воды между компартментами, которая определяет адвективную и «диффузионную» компоненты водного обмена.
2. Осредненные по объемам компартментов «поля» солености и температуры воды.
3. Макрохарактеристики ледового режима (объем и толщина льда, доля площади, занятая льдом, объемы таяния и замерзания льда).
4. Потоки солей и тепла между компартментами и стоки солей и тепла во внешнюю (по отношению к рассматриваемому водоему) среду.

Используемые в рамках данного подхода алгоритмы расчета солености, температуры воды и макрохарактеристик ледового режима подробно рассмотрены в [4].

3 Опыт применения мультикомпартментальной модели Баренцева моря для моделирования гидрологического режима для средноклиматических условий

Рассмотренный ниже подход, который планируется использовать для ретроспективного анализа многолетней динамики элементов гидрологического режима Баренцева моря (температура и соленость воды, ледовый режим), был применен для моделирования гидрологического режима Баренцева моря для средноклиматических условий [2, 5, 6].

Данные фоновых оценок постоянных и переменных параметров среды и ресурсы мониторинга [5-7] служат основой входной информации для компартментальной модели.

В основе деления моря на относительно однородные районы (боксы) лежит формальный подход [8], в основе которого абиотические факторы: рельеф [9], течения [10], водные массы и границы распространения льдов.

Горизонтальная адвекция. Квазипостоянная циркуляция вод Баренцева моря задана в соответствии рисунком 4.

Данная схема циркуляции является фоном, на котором развиваются все другие движения (приливные, сгонно-нагонные, ветровые и др.), способствующие горизонтальному и вертикальному перемешиванию водных масс. В модели для параметризации вклада этих видов перемещений водных масс в перенос вещества и энергии вводятся водные потоки через границы между компартментами, имеющие одинаковую величину, но разное направление (по аналогии с диффузией, но с характерным масштабом, соизмеримым с линейными размерами районов). Представление о морфологических характеристиках акваторий-компартментов Баренцева моря, выделенных по результатам кластерного анализа, дает таблица 1.

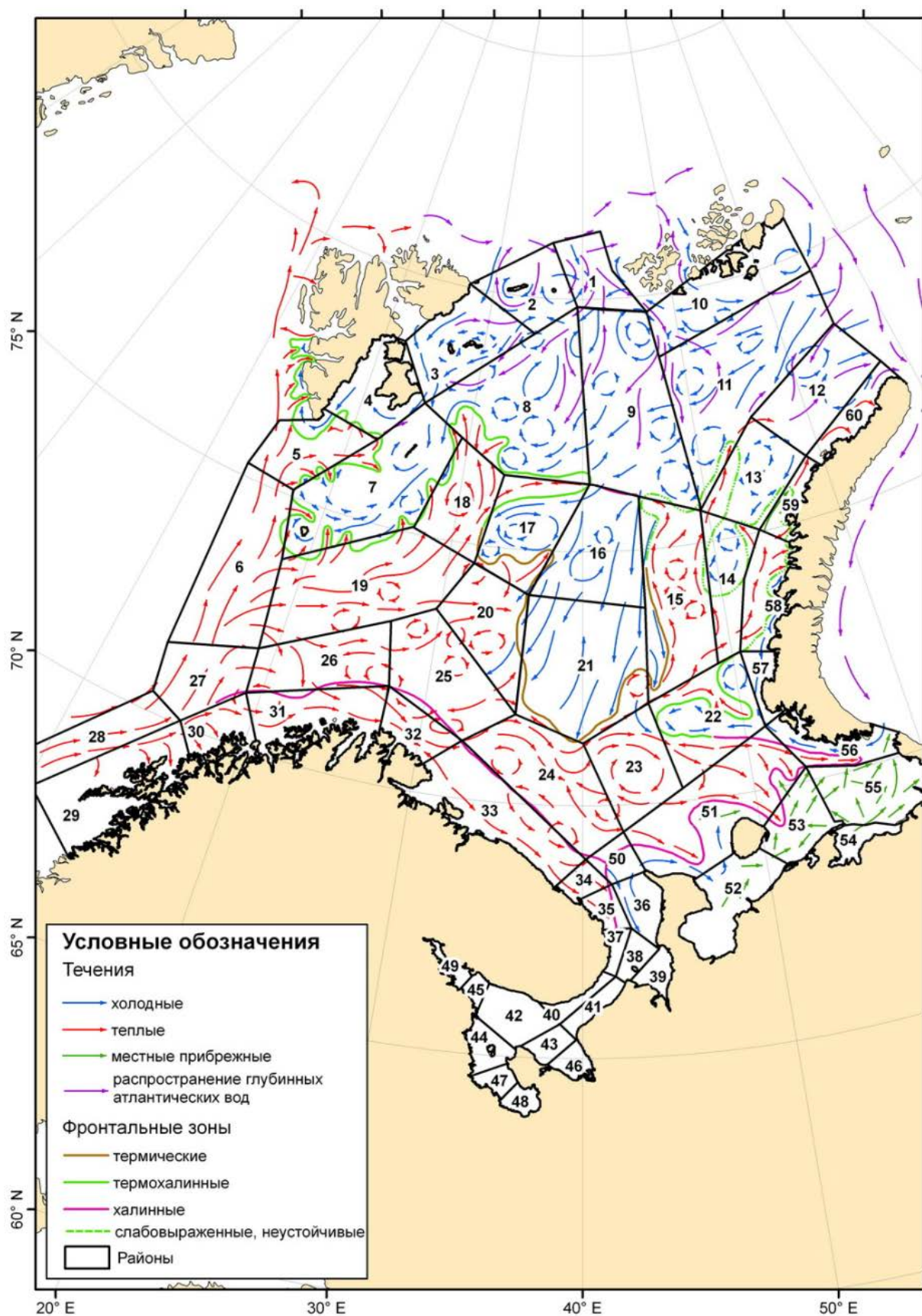


Рисунок 4 – Детализированное районирование Баренцева моря, совмещенное со схемой течений, разработанной Г.Г. Матишовым

Таблица 1– Средние морфологические характеристики акваторий Баренцева моря (по результатам кластерного анализа)

Номер района	Название районов в соответствии с рисунком 4	Площадь	Объем	Глубина по слоям		
		тыс. км ²	тыс. км ³	общая	верхн.	нижн.
				м		
1	Арктический: восточный	19.2	7.1	373	25	348
2	Арктический: западный	24.5	6.1	249	25	224
3	Шпицбергенский: восточный	35.1	7.5	213	25	188
4	Шпицбергенский: центральный	22.2	2.0	91	25	66
5	Шпицбергенский: западный	26.3	8.5	321	25	296
6	Западный	61.7	32.1	519	25	494
7	Медвежинско-Шпицбергенский	68.7	9.1	132	25	107
8	Северо-западный	81.8	19.9	244	25	219
9	Северо-восточный	80.2	23.5	292	25	267
10	Район Земли Франца-Иосифа	41.0	9.3	227	25	202
11	Восточный	84.9	26.4	311	25	286
12	Восточный: северный	37.8	9.9	262	25	237
13	Восточный: южный	29.9	5.7	190	25	165
14	Район залива холодных вод	24.8	5.7	231	25	206
15	Центральный восточный	57.4	18.6	324	25	299
16	Центральный: северо-восточный	46.0	14.5	315	25	290
17	Центральный: северо-западный	38.1	10.3	270	25	245
18	Район залива теплых вод: северный	29.0	10.2	351	25	326
19	Район залива теплых вод: южный	74.7	31.9	427	25	402
20	Центральный: юго-западный	35.3	11.3	321	25	296
21	Центральный: юго-восточный	75.9	26.5	349	25	324
22	Район Гусиной банки	42.0	7.8	186	25	161
23	Район Северо-Канинской банки	33.8	6.0	178	25	153
24	Район Мурманской банки	52.8	12.7	240	25	215
25	Район Динмаркенской банки	45.6	15.8	346	25	321
26	Район Норвежской банки	35.8	12.8	357	25	332
27	Район банки Фулей	27.7	14.0	507	25	482
28	Район притока Нордкапского течения: северная ветвь	28.4	16.4	576	25	551
29	Район притока Нордкапского течения: южная ветвь	46.4	11.2	240	25	215
30	Прибрежный западный	16.7	3.8	228	25	203
31		34.3	8.6	251	25	226
32		15.3	5.0	328	25	303
33		46.2	10.4	226	25	201
34	Буферный район Белого моря: северо-западный	5.8	0.6	105	25	80
35	Воронка: северо-западная	6.2	0.4	68	25	43
36	Воронка: северо-восточная	11.0	0.3	30	10	20
37	Воронка: юго-западная	3.8	0.2	45	25	20
38	Воронка: юго-восточная	5.5	0.2	28	10	18
39	Мезенский залив	5.8	0.1	14	14	0
40	Горло: северное	4.4	0.4	76	25	51
41	Горло: южное	5.8	0.3	47	25	22
42	Бассейн: центральный	14.9	2.6	174	25	149

Продолжение таблицы 1

43	Бассейн: юго-восточный	5.4	0.6	112	25	87
44	Бассейн: юго-западный	7.9	0.2	30	10	20
45	Бассейн: северо-западный	2.7	0.6	207	25	182
46	Двинский залив	5.0	0.2	33	10	23
47	Онежский залив: северный	4.3	0.1	26	10	16
48	Онежский залив: южный	4.2	0.1	16	16	0
49	Кандалакшский залив	3.1	0.3	84	25	59
50	Буферный район Белого моря: северо-восточный	8.0	0.6	83	25	58
51	Приколгуевский район: северный	62.8	6.1	98	25	73
52	Чешский район	28.1	1.2	44	25	19
53	Приколгуевский район: восточный	19.8	1.0	52	25	27
54	Печорская губа	6.9	0.2	30	28	2
55	Припечорский район	36.5	1.6	44	25	19
56	Новоземельский	18.0	2.3	127	25	102
57		6.5	0.6	84	25	59
58		21.4	3.1	151	25	126
59		9.0	1.3	146	25	121
60		12.4	1.7	144	25	119
ИТОГО:		1745	448	196	23	173

Водообмен с соседними морями. Определяющее влияние на природу Баренцева моря оказывает водообмен с соседними морями, главным образом поступление теплых атлантических вод, годовой приток которых равен около 76 тыс. км³ [11], что составляет примерно ¼ общего его объема. Они приносят в море около $177 \cdot 10^{12}$ ккал тепла, которое на 88% расходуется на обогрев Баренцева моря [12].

В модели в качестве начальных оценок приняты следующие объемы поступления водных масс в Баренцево море: с Нордкапским течением – 59 тыс. км³/год, через границу о. Земли Франца-Иосифа – о-ва Новая Земля - 10 тыс. км³/год, через границу о. Шпицберген – о-ва Земли Франца – Иосифа – 5 тыс. км³/год, через Новоземельские проливы из Карского моря – 2 тыс. км³/год. Сезонный ход притока атлантических вод в Баренцево море задан в соответствии с оценками (в соответствии с рисунком 5), опубликованными в [13].

Речной сток. По оценкам [12] среднегогодежный сток рек в Баренцево море составляет около 163 км³/год. На 90% он сосредоточен в юго-восточной части моря. На северное побережье Норвегии и берег Кольского п-ова приходится всего около 10 % стока. Из Белого моря поступает 230 км³/год трансформированных речных вод. Речной сток существенно отражается на гидрологических условиях только юго-восточной, самой мелководной части моря, которую называют Печорским морем (губой, бассейном моря).

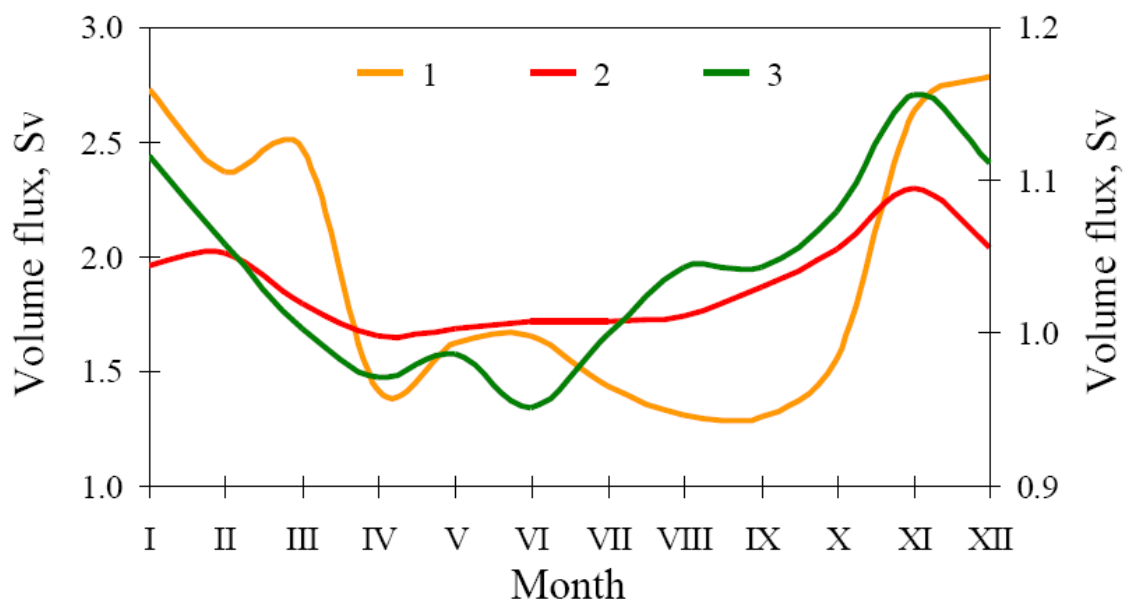


Рисунок 5 – Сезонная изменчивость потока воды, проходящего через участки Западно-Шпицбергенского (1), Нордкапского (2) и Мурманского (3) течений [13]

Осадки. Годовое количество осадков над акваторией Баренцева моря составляет 600 мм в год. Зимой (декабрь-апрель) над Баренцевым морем развивается интенсивная циклоническая деятельность, которая порождает обильные осадки 50-75 мм/мес. Весной (май-июнь) в большинстве районов моря стоит пасмурная погода с частыми осадками в виде дождя и снега (50-60 мм/мес.). Летом отмечается равномерное распределение осадков по району Баренцева моря, которые составляют в среднем около 50 мм [14].

Испарение. Испарение оценивалось по затратам тепла на испарение [14]. Для незамерзающих районов Баренцева моря высокое испарение отмечается зимой, в декабре-феврале – 100-120 мм и уменьшаются до 40 мм в июне-августе. Для замерзающих районов испарение по величине меньше в 4 раза по сравнению с незамерзающими, сезонный ход сохраняется.

Ледовые условия. Баренцево море относится к числу ледовитых морей, но в отличие от других морей Арктики оно никогда не покрывается льдом полностью. Это происходит благодаря притоку атлантических вод, приносящих такое количество тепла, которое не позволяет воде охладиться до температуры замерзания. Поскольку ледообмен Баренцева моря незначителен и составляет около 3 % ото льда в конце зимы, то в море в основном преобладают льды местного происхождения. Только в отдельные годы поступают многолетние льды в северо-западную и северо-восточную части моря, а также приносятся зимой из Белого моря и через Новоземельские проливы (в соответствии с рисунком 6).

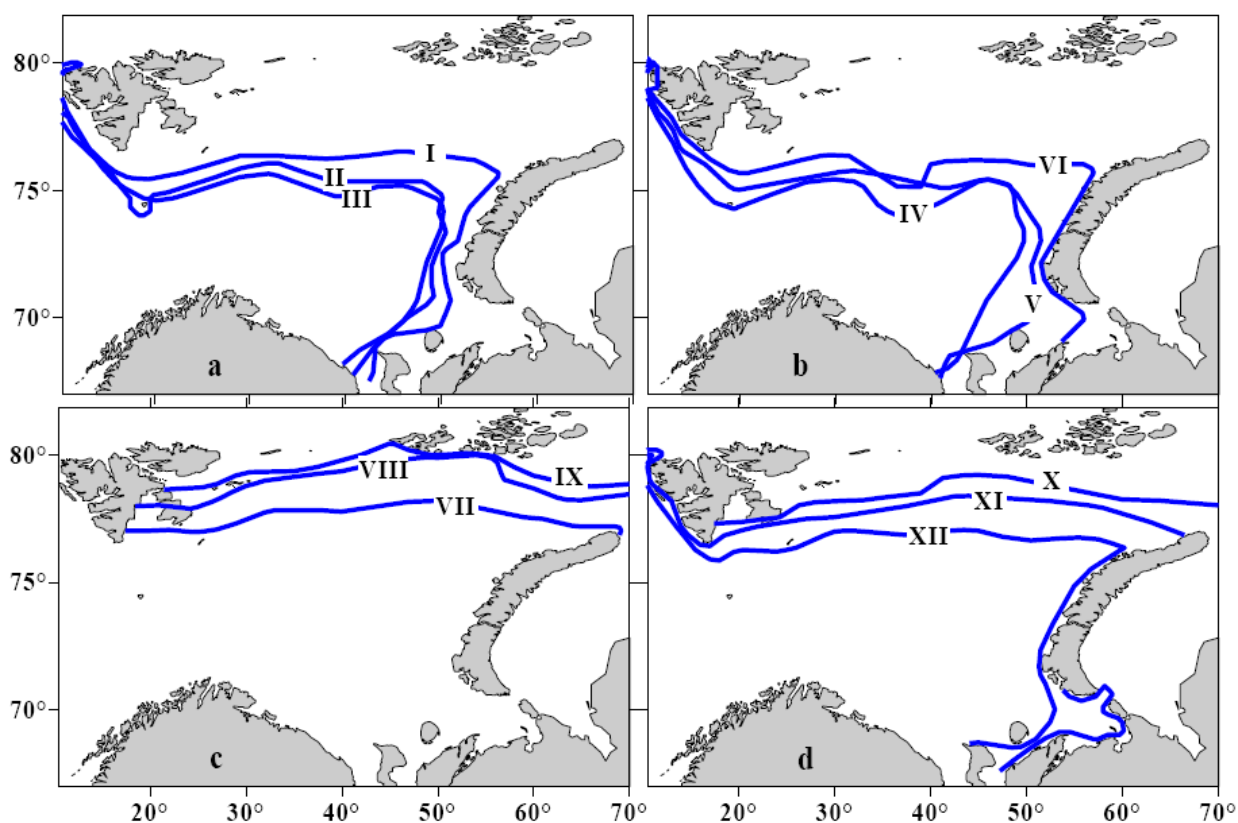


Рисунок 6 – Типичное положение границы кромки льда в Баренцевом море по месяцам [13]

Колебания ледовитости связаны с интенсивностью Нордкапского течения, атмосферной циркуляцией и с общим потеплением или похолоданием Арктики.

Температура воды. В Баренцевом море температура воды в значительно большей мере, чем в других арктических морях определяет все процессы, связанные с плотностной структурой вод (конвекция, образование слоя скачка и др.). Кроме того, в Баренцевом море температура воды является основным показателем, характеризующим распространение теплых атлантических вод, которые в свою очередь, определяют ледовые условия и климат приатлантического сектора Арктики. Поэтому в компартментальной модели Баренцева моря в качестве трассера в большей степени будет рассматриваться температура воды.

Термический режим Баренцева моря формируется под воздействием ряда процессов, из которых ведущими являются осенне-зимняя конвекция, выравнивающая температуру от поверхности до дна, и летний прогрев поверхностного слоя, обуславливающий возникновение сезонного термоклина.

Большой приток теплых атлантических вод делает Баренцево море одним из самых теплых в Северном Ледовитом океане. Значительная часть моря от берегов до 75°с.ш. круглый год не замерзает и имеет положительные значения поверхностной температуры. Влияние адвекции тепла атлантических вод особенно заметно проявляется в юго-западной части моря и незначительно на юго-востоке из-за малых глубин в этом районе.

В большой степени распределение температуры в толще воды Баренцева моря зависит от проникновения теплых атлантических вод, от зимнего охлаждения и от рельефа дна.

Соленость. Соленость Баренцева моря определяется, прежде всего, интенсивностью его водообмена с окружающими бассейнами, поскольку объем этих вод более чем на два порядка превышает остальные составляющие пресноводного баланса. Две трети акватории моря находятся под влиянием атлантических вод и даже на поверхности моря соленость воды превышает 34‰, составляя в ядре (73°с.ш., 20-35°в.д.) 35‰. На остальной акватории моря соленость колеблется в пределах 32-34 ‰. Наибольшие величины распреснения имеют место на юго-востоке моря, куда выносятся распресненные беломорские воды (31-33 ‰) и поступает основное количество материковых вод.

Температура воздуха. Климатические условия Баренцева моря определяются соседством его с теплым Норвежским морем и холодными районами Арктического бассейна. Через Баренцево море проходят траектории подавляющей части теплых североатлантических циклонов, идущих с юго-запада на восток и северо-восток вглубь арктической области. Часто этот перенос теплых воздушных масс прерывается мощным вторжением гребней полярного антициклона, сопровождающимся проникновением холодных арктических воздушных масс далеко на юг.

Данные по температуре воздуха Баренцева моря были дополнены информацией с сайта http://data.giss.nasa.gov/gistemp/station_data для метеостанций, расположенных в регионе Баренцева моря.

Альбедо. В модели для расчетов альбедо свободной ото льда поверхности принято равным 0.20 в течение всего года. Альбедо льда изменяется в сезонном ходе от 0.40-0.50 (июль-сентябрь) до -0.60-0.67 (октябрь-июнь).

Тепловые потоки через границу «вода-атмосфера». Радиационная характеристика Баренцева моря определяется его расположением за Полярным кругом и большой облачностью, которая наблюдается над морем в течение года.

Радиационный баланс поверхности моря в октябре-марте отрицательный, в апреле-сентябре - положительный с максимальным значением в июне, что обусловлено соответствующими изменениями потока солнечной радиации в течение года. При этом в теплую часть года значения радиационного баланса на 30-40% меньше суммарной радиации. В период полярной ночи радиационный баланс определяется только эффективным излучением поверхности моря. В среднем для южной части Баренцева моря годовой радиационный баланс положителен и составляет 4.5 кДж/см².

Свободная ото льда поверхность Баренцева моря в течение года обеспечивает значительное поступление тепла в атмосферу не только за счет эффективного излучения, но и за счет турбулентного потока тепла H и затраты тепла на испарение LE . Наибольшие значения H и LE

наблюдаются в декабре-феврале (соответственно 30-36 кДж/см² и 21-32 кДж/см²), уменьшаясь в июне-августе до 0.6 и 3-6 кДж/см². В целом за год результирующий поток тепла В отрицателен и равен 24.3 кДж/м². В период с мая по август результирующий поток тепла положителен за счет относительно большого поступления солнечной радиации и уменьшения эффективного излучения, турбулентного теплообмена и затрат тепла на испарение. Переход теплового баланса через 0° наблюдается в конце апреля - начале мая и в конце августа. На сезонные изменения знака результирующего потока тепла большое влияние оказывают окружающие Баренцево море суша и ледяной покров, охлаждающее влияние которых в зимнее время приводит к значительному увеличению разности температур воды и воздуха. В летнее время различия радиационных характеристик водной поверхности, ледяного покрова и суши уменьшаются. Пространственная изменчивость потоков Н, LE и В несколько выше пространственной изменчивости составляющих радиационного баланса. Что касается временной изменчивости Н, LE и В, то она в целом меньше пространственной изменчивости этих потоков.

Важнейшей составляющей теплового баланса Баренцева моря является адвекция тепла течениями. Основной приток тепла в море осуществляется в его южных районах. Н.С. Ураловым показано, что 60-65% тепла, вносимого в Баренцево море между м. Нордкап и арх. Шпицберген, отдается в атмосферу и в окружающие Нордкапское течение воды в пределах южной части моря. Вместе с тем в юго-западной и юго-восточной частях моря расход тепла атлантических вод происходит с разной интенсивностью. В целом можно отметить, что адвективная составляющая теплового баланса деятельного слоя Баренцева моря весьма существенна для его юго-западной части и не может не учитываться в остальных районах моря.

Поступление тепла за счет речного стока [15] и расход тепла за счет ледовых процессов [16] составляют менее 0.1% от общего поступления тепла за год и поэтому в тепловом балансе незамерзающей части моря могут не учитываться. Представление о сезонной изменчивости составляющих теплового баланса дает таблица 2.

Скорость ветра. Значения ветра оценивались по средней скорости ветра за январь и июль прибрежных станций [14] и распространялись на соседние районы. Годовой ход скорости ветра в Баренцевом море был рассчитан по аналогии с прилегающими районами Белого и Печорского морей (29-30).

Таблица 2 – Средние суточные значения составляющих теплового баланса поверхности южной (незамерзающей) части Баренцева моря, МДж/м² (<http://www.aari.nw.ru>)

Элемент	I-III	IV-VI	VII-IX	X-XII	Год
Q	4.8	42.3	30.6	1.5	19.8
Bk	3.9	37.8	27	0.9	17.4

<i>Ea</i>	63.9	72.6	79.8	69.6	71.4
<i>Eэф</i>	18	11.4	7.8	14.1	12.9
<i>R</i>	-14.1	26.4	19.2	-12.9	4.5
<i>H_T</i>	32.7	6.9	1.2	20.7	15.3
<i>LE</i>	21.9	8.7	6.3	17.7	13.5
<i>B</i>	-68.7	10.8	12	-51.3	-24.3

Примечание: Q - суммарная солнечная радиация, Вк - поглощенная солнечная радиация, Ea - тепловое излучение атмосферы, Eэф - эффективное излучение поверхности моря, R - радиационный баланс, H_T - турбулентный поток тепла, LE - затраты тепла на испарение, B - результирующий поток тепла на поверхности моря.

Облачность. В открытой части Баренцева моря отмечается высокий балл облачности, который изменяется в нешироком диапазоне от 8 до 10.

Влажность. В Баренцевом море наблюдается высокая влажность 85-90% довольно однородная в годовом ходе.

Применение системы TOPAZ для оценки межрайонного водообмена в верхнем слое. Для оценки потоков воды через границы выделенных компартментов в Баренцевом и Белом морях использовались поля течений, рассчитанные при помощи системы Towards an Operational Prediction system for the North Atlantic European coastal Zones (TOPAZ), которая базируется на уравнениях модели общей циркуляции океана (Ocean General Circulation Model), а именно модели Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM).

Основной целью системы TOPAZ является развитие современного комплекса ассимиляции данных для связи уравнений циркуляции океана и модели морской экосистемы для Северной Атлантики и Северного моря с повышенным разрешением в европейских прибрежных зонах.

Краткосрочные прогнозы течений и других, рассчитываемых моделью TOPAZ океанографических характеристик, еженедельно публикуются на сайте <http://topaz.nersc.no>, они открыты для общественного доступа.

Информация о течениях представлена в виде проекции вектора течения на оси *x* (*долгота*) и *y* (*широта*). Пространственный шаг сетки течений – 12.5 км, временное разрешение – 24 часа. Из представленной на сайте информации сформирована база данных (БД) скоростей течений на горизонте 5 м для одного года (с августа 2008 г. по июль 2009 г.) для рассматриваемой области Баренцева моря. В качестве формата хранения данных выбрана СУБД Microsoft Access (*.mdb). Таблицы с течениями имеют следующие поля: I, J, U, V (где I и J – номер ячейки по широте и долготе, U и V – проекции вектора течения на оси *x* и *y*).

Для расчета суммарного потока воды по месяцам через границы между районами в слое 0-20 м использовалась следующая схема.

А) Для каждого района были определены узлы расчетной сетки модели TOPAZ, расположенные вблизи соответствующей границы с соседним районом в соответствии с рисунком 1.3.7. Таким образом, границе между районами соответствовала некоторая ломаная линия, включающая расчетные узлы.

Б) Учитывались только вектора, направленные из данного района в соседние, значения соответствующей проекции вектора течений суммировались за месяц, после умножения на длину ячейки (12.5 км) и толщину рассматриваемого слоя (20 м) были получены оценки потоков воды.

В) разработаны вспомогательные программные модули (приложения) для визуализации результатов таких оценок в ГИС. Учитывая, что за месяц потоки воды могут быть направлены через границу в обе стороны, отдельно оценивались также и результирующие потоки воды.

Кроме абсолютных значений водных потоков проводилась оценка относительного распределения поступающих водных масс между соседними районами. Именно эти величины и использовались для предварительного подбора параметров модели водообмена.

Калибровка водообмена между районами Баренцева моря выполнялась на основе базы океанографических данных [17].

Разработанные в рамках проекта программные модули были применены для построения среднесезонных карт распределения солености и температуры воды с января по декабрь для верхнего (0-25 м) и нижнего (25-200 м) слоев. Результаты построения в качестве примера (для июля) приведены в соответствии с рисунком 7.

На основе этих полей для каждого района рассчитаны средние значения температуры и солености, которые использованы для сопоставления с модельными значениями. Так как при выполнении расчетов модельные значения «привязаны» к центрам районов, с помощью специально разработанного модуля выполняется пространственная интерполяция (в соответствии с рисунком 8 приведены поля солености и температуры, получены при осреднении подходящих полей в соответствии с рисунком 9 в пределах районов и последующей пространственной интерполяции).

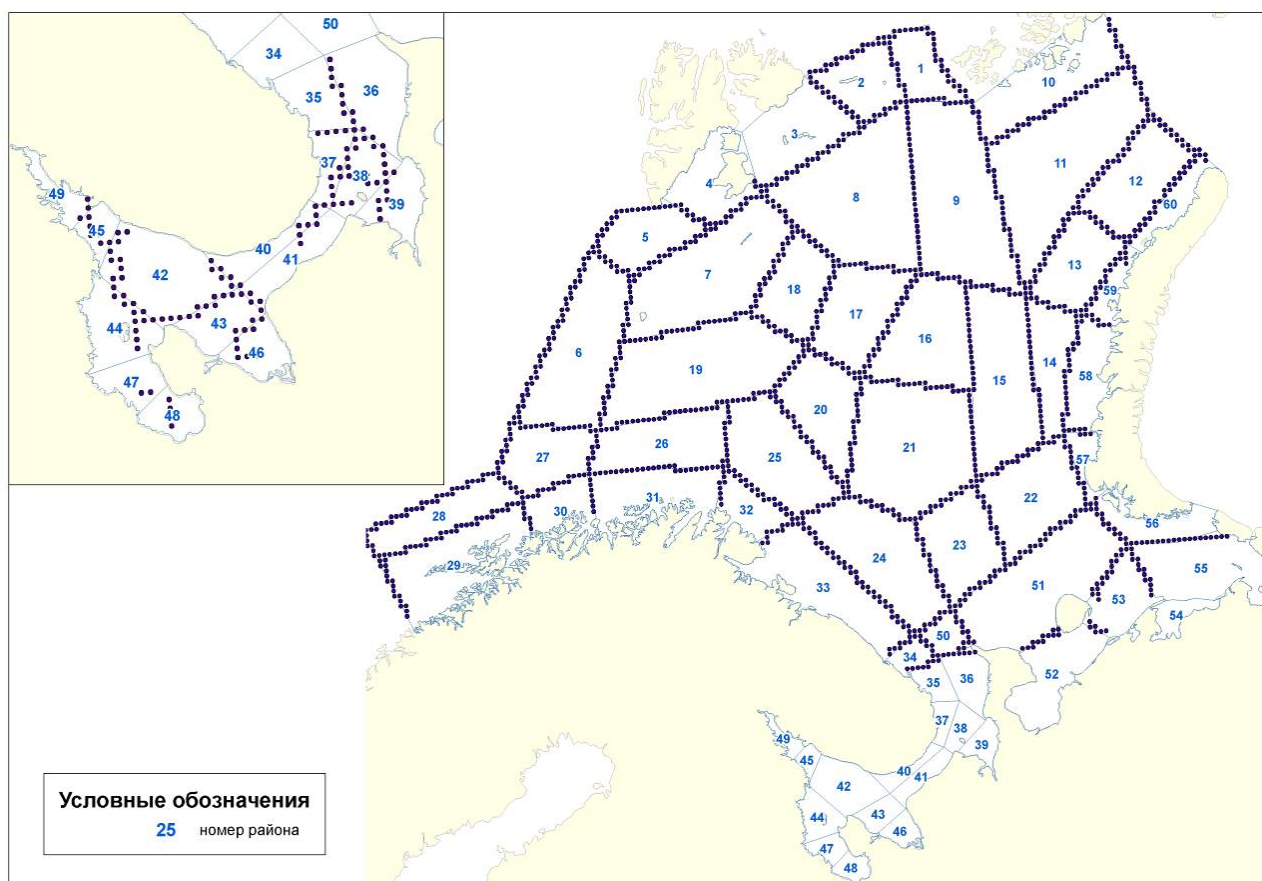
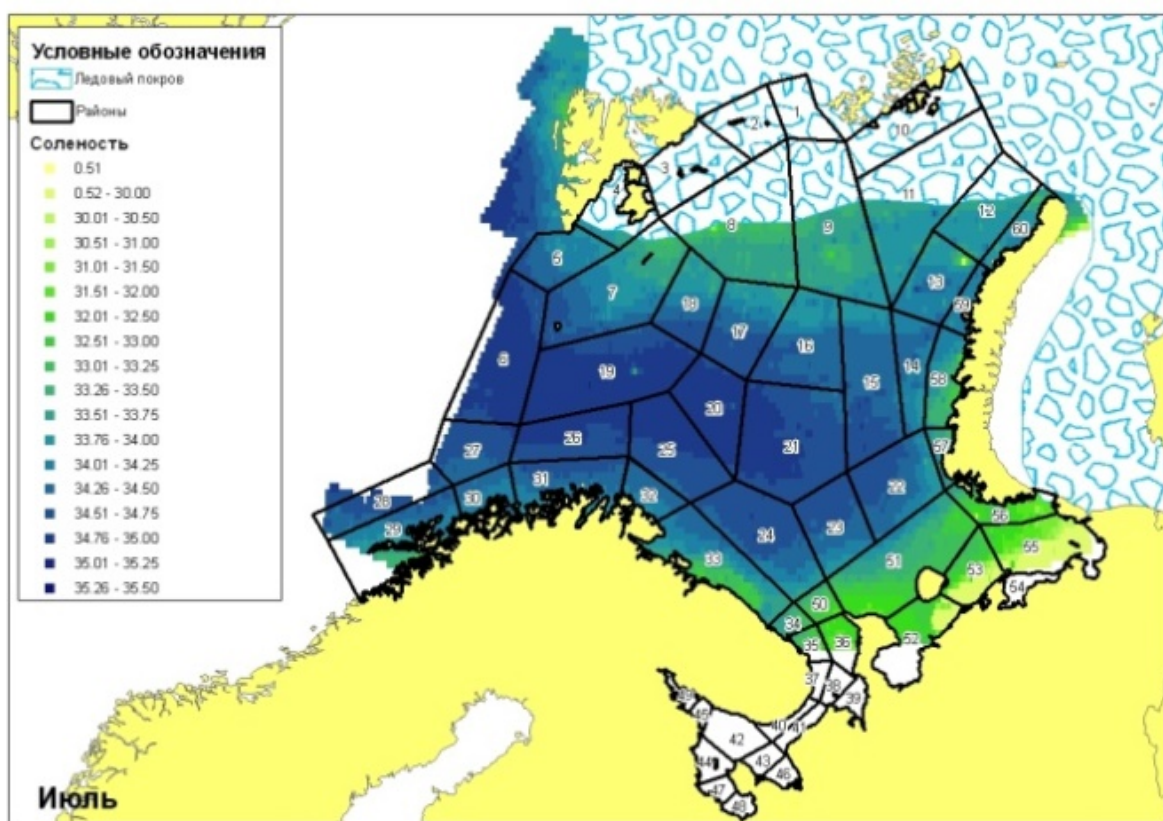
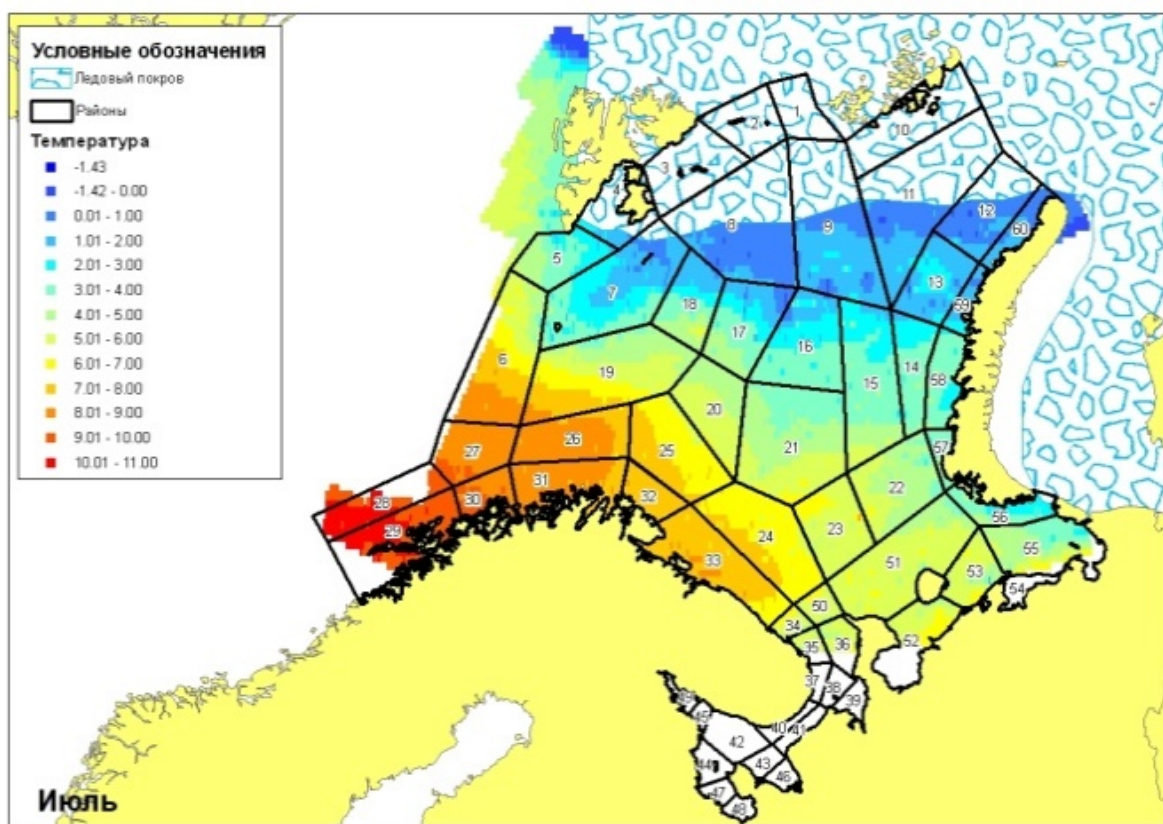


Рисунок 7 – Расчетные узлы модели ТОРАЗ, используемые для оценки потоков воды через границы между районами Баренцева и Белого морей

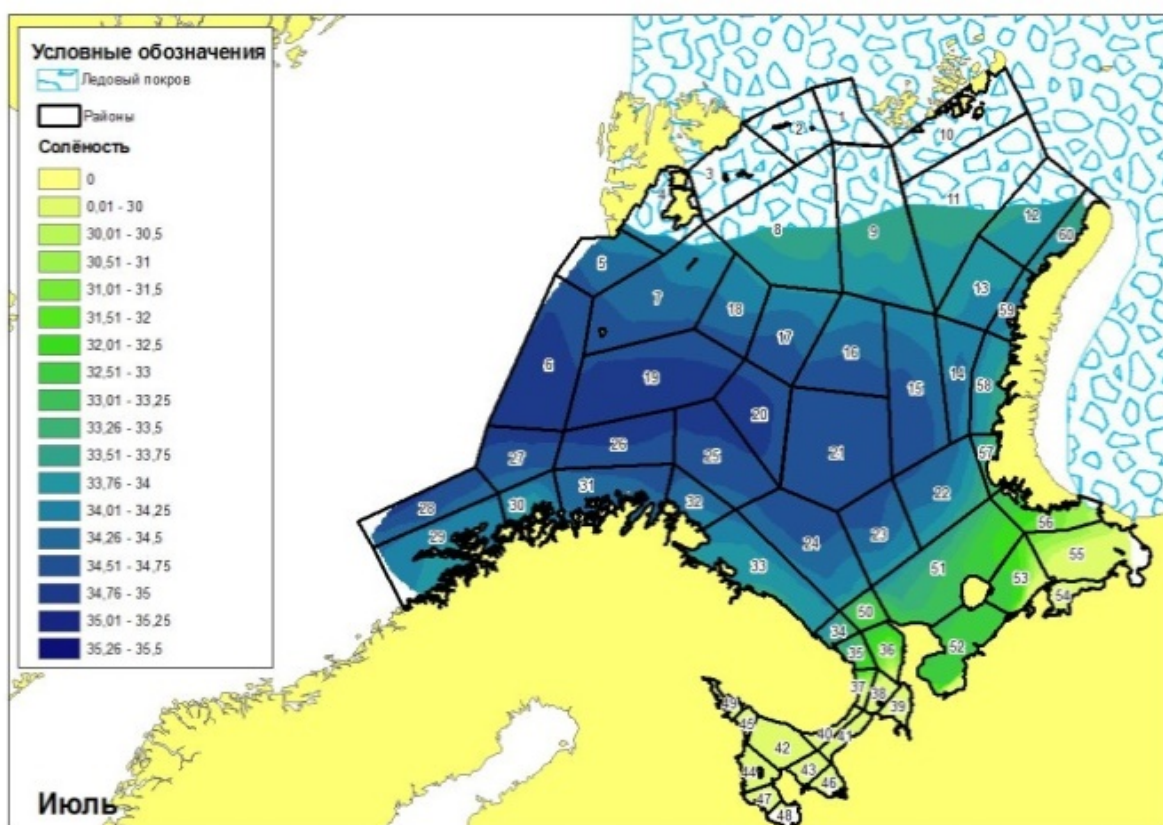


А)

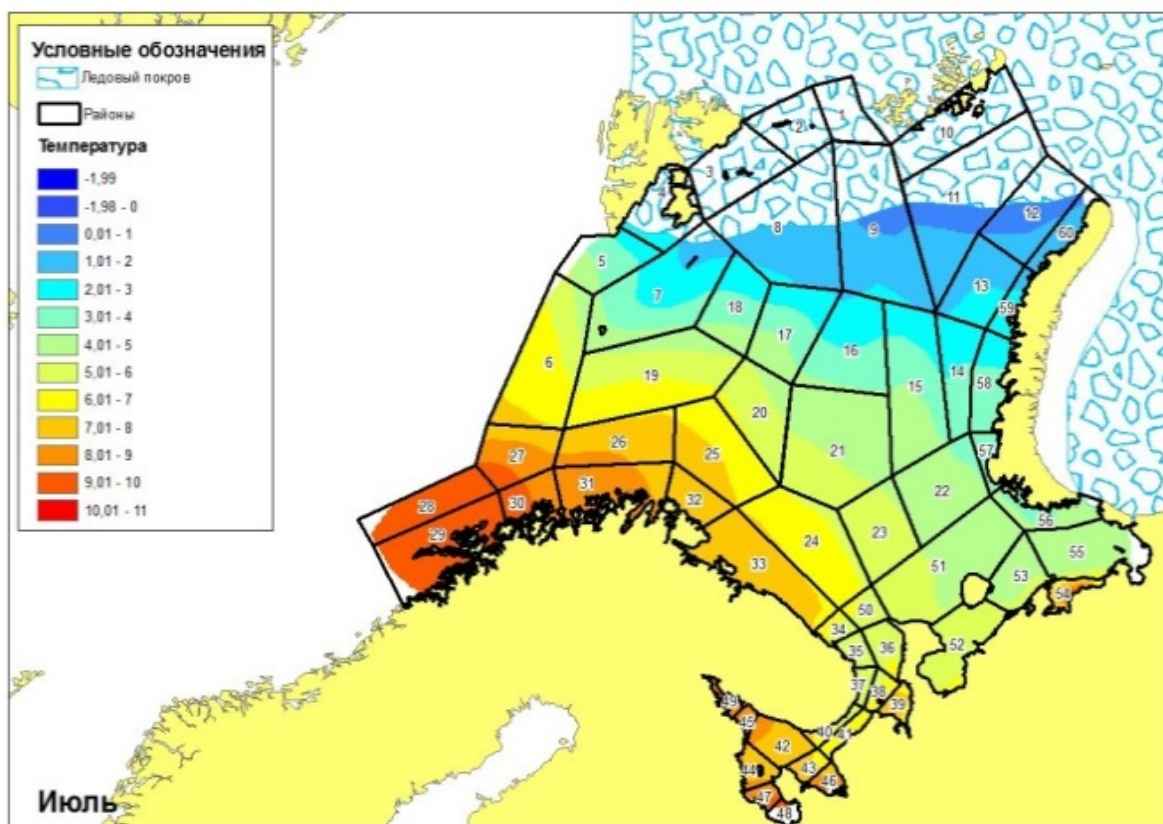


Б)

Рисунок 8 – Распределение солености (А) и температуры воды (Б) в июле в слое 0-25 м
Обработка данных из океанографической БД Баренцева моря



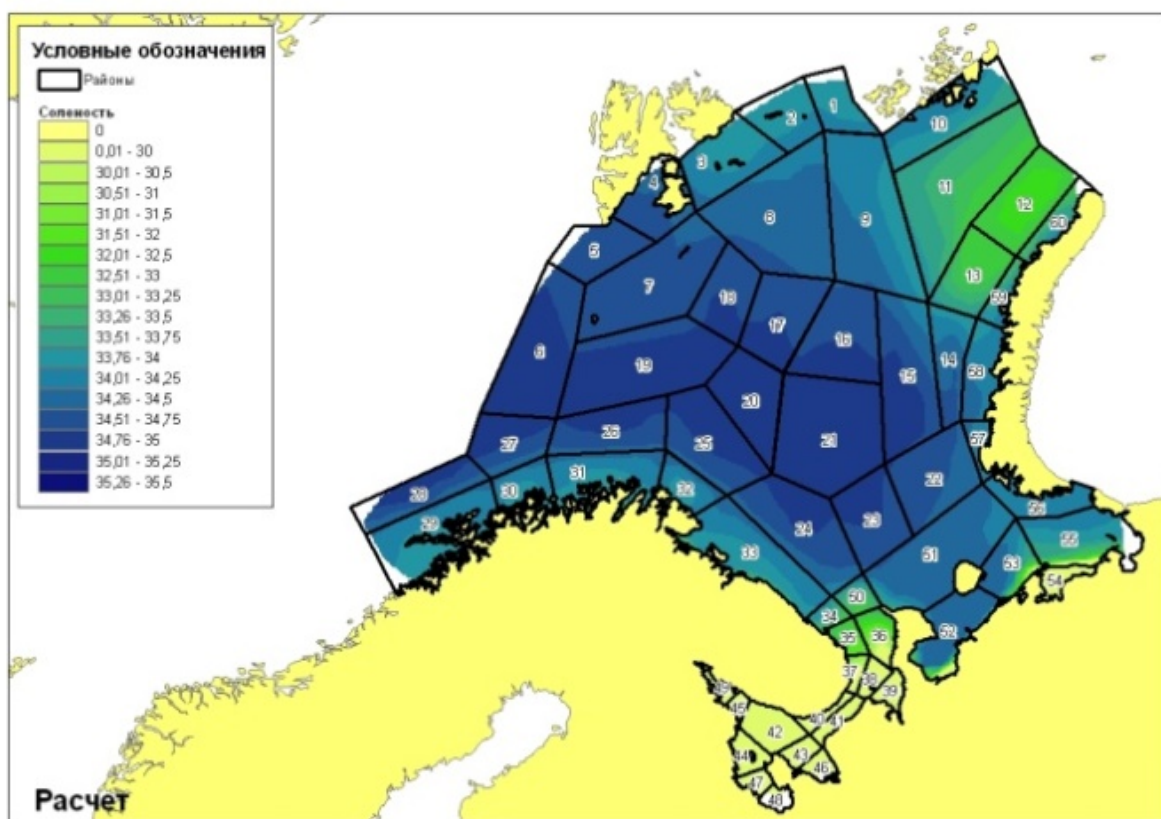
А)



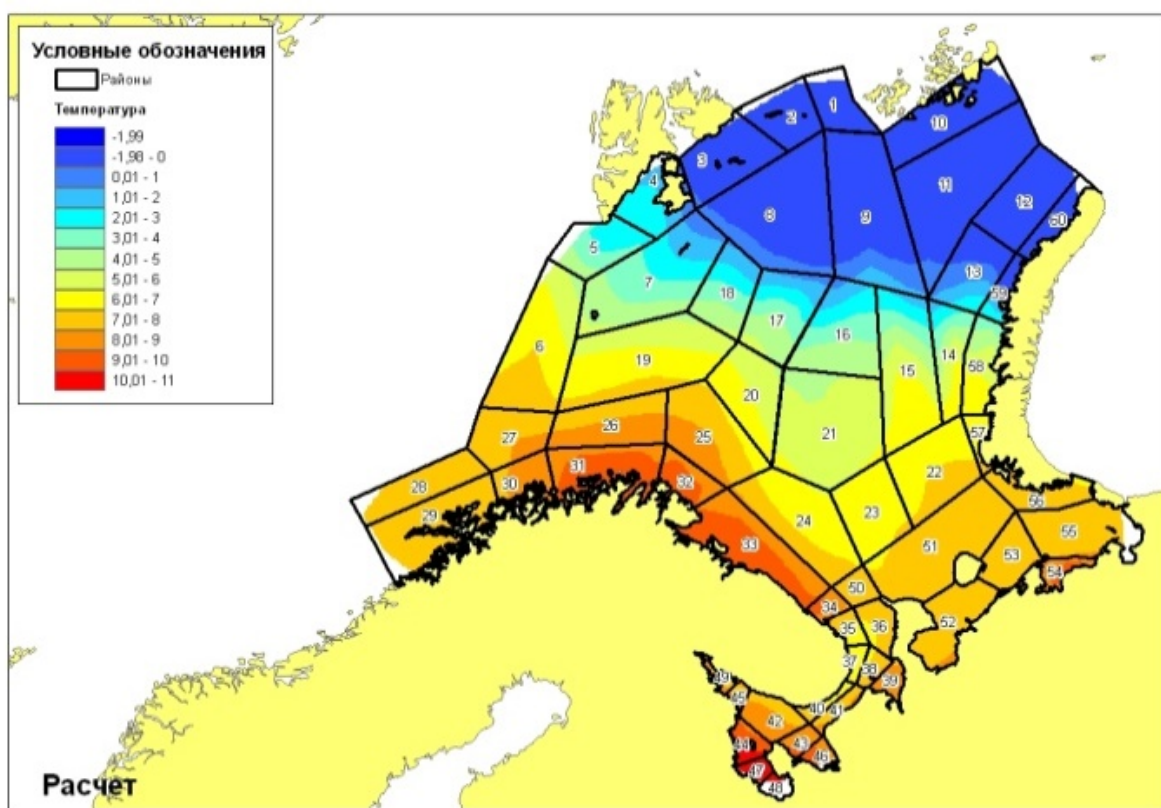
Б)

Рисунок 9 – Распределение солёности (А) и температуры воды (Б) в июле в слое 0-25 м.

Пространственная интерполяция значений, «привязанных» к центрам районов



А)



Б)

Рисунок 10 – Распределение солености (А) и температуры воды (Б) в июле в слое 0-25 м.
Результаты расчетов

При выполнении калибровочных расчетов, с одной стороны подбираются параметры, регулирующие направленный перенос водных масс от района к району («адвекция»), с другой стороны параметры, отвечающие за водообмен через границы между районами, обусловленный сменой направления ветровых течений, крупномасштабными вихрям, приливно-отливными движениями вод. В качестве результата, кроме потоков воды между районами, рассчитываются соленость и температура в каждом районе («вещества-трассеры»), распределение которых позволяет судить об адекватности модельного приближения рассчитываемого водообмена в соответствии с рисунком 10.

Как видно из представленного распределения расчетных полей солености и температуры воды в слое 0-25м в июле в модельной схеме переноса водных масс наблюдается избыточное поступление соленых вод в Печорское море. Вместе с тем недостаточно отепляющего влияния атлантических вод на северные районы Баренцева моря (в районах, прилегающих к ЗФИ, лед не тает), но попытки увеличить их приток в эти области одновременно приводят к избыточному увеличению солености.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», проекта «Разработка методов экосистемного мониторинга заливов и шельфа Баренцева моря и высокоширотной Арктики, сценарного моделирования аварийных ситуаций при транспортировке нефтепродуктов и радиоактивных отходов и экспериментальных технологий их защиты от загрязнения в условиях морского перигляциала» (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI61616X0073, Соглашение № 14.616.21.0073 от 28.07.2016г.)

Литература

1. Денисов В.В. Комплексное применение океанологической информации для изучения и использования ресурсов побережья / Денисов В.В., Дженюк С.Л. // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. - Апатиты: КНЦ РАН, 2004.- Вып. 1. - С. 55-63.
2. Бердников С.В. Разработка и применение математических моделей для прогнозирования изменений гидрохимического режима в устьевых областях и на шельфе северных морей России /Бердников С.В.//Современные информационные и биологические технологии в освоении ресурсов шельфовых морей. - М.: Наука. 2005. - С. 60-82.
3. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. /Матишов Г.Г. [и др].-М.: Наука, 2006. - 304 с.
4. Федоренко В.Н., Сережкин И.Н., Ламова Я.А., Князюк М.К., Нетрусов А.И., Шестаков А.И.Свойства естественных углеводородокисляющих микробных сообществ для утилизации нефтяных загрязнений в Северных регионах // Биотехнология. 2015. Изд-во ГосНИИГенетика (М.), № 6, с. 72-78
5. Разработка методов комплексного использования современных информационных технологий и математического моделирования для исследования процессов, характеристик и ресурсов Баренцева и Белого морей в условиях влияния климатических процессов и антропогенных факторов: отчет о НИР (закл.)/ Южный федеральный университет; рук. Бердников С.В.; -М.: ВНТИЦ, 2008.- 161с.- Исполн.: Инжебейкин Ю.И., Цыганкова А.Е., Архипова О.Е., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В., Немцева Л.Д., Сапрыгин В.В., Бирюков П.А., Сладкова Ю.М., Яицкая Н.А., Лисунова Н.С., Цыганкова О.В. - № госрегистрации 01.2008.53313. - Инв. № 02200950706.
6. Разработка методов комплексного использования современных информационных технологий и математического моделирования для исследования процессов, характеристик и ресурсов Баренцева и Белого морей в условиях влияния климатических процессов и антропогенных факторов: отчет о НИР / Южный федеральный университет; рук. Бердников С.В.; -М.: ВНТИЦ, 2009.- 171с.- Исполн.: А.Е. Цыганкова, Ю.И. Инжебейкин, О.Е. Архипова, В.В. Кулыгин, Л.В. Дашкевич, Л.Д. Немцева, В.В. Сапрыгин, П.А. Бирюков, Ю.М. Сладкова, Н.А. Яицкая, Н.С. Лисунова, О.В. Цыганкова - № госрегистрации 01.2008.53313. - Инв. № 02201052275. 2009.
7. Государственный научный центр "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт" - лидер российской полярной науки. Историческая справка

[Электронный ресурс] // Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ "ААНИИ") [СПб, 2016]. URL: <http://www.aari.nw.ru> (дата обращения 20.11.2016)

8. Дашкевич Л.В. Геоэкологическое районирование Баренцева моря / Л.В. Дашкевич // Материалы XXIV конференции молодых ученых Мурманского биологического института (май, 2006). -Мурманск: Изд. ММБИКНЦРАН. 2006. -С. 157-161.

9. Matishov G.G. Bathymetric Map of the Barents and West Kara Seas. Russian Academy of Sciences, Muramansk Marine Biological Institute/ Matishov G.G. // Scale 1; 2/313/000 at Latitude 720. N/ Murmansk.- 1997.

10. Матишов Г.Г. Влияние морского перигляциала на эволюцию морских экосистем Западной Арктики / Г.Г. Матишов // Биология и океанография Карского и Баренцева морей (по трассе Севморпути). - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. - 1998.- С.16-24.

11. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР: Т.6. Баренцево море. Выпуск 1. Гидрологические и гидрохимические условия /Ред. Г.В. Гирдюк, С.Л. Дженюк, Г.Г. Зыкова, Ф.С. Терзиев - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 263 с.

12. Залогин Б.С. Моря / Б.С. Залогин, А.Н. Косарев - М.: Мысль. 1999.-С. 31-39.

13. Joint PINRO:IMR Report on the State of the Barents Sea Ecosystem in 2007. -2007. -Р. 84-86.

14. Атлас Арктики // ред. А.Ф. Трешников - М.: Главное управление геодезии и картографии при совмине СССР. 1985. - 203 с.

15. Елшин Ю.А. Тепловой сток рек Европейской территории СССР/ Ю.А. Елшин // Метеорология и гидрология. - 1981. - Т. 9. - С. 85-93.

16. Зубакин Г.К. Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова Северо-Европейского бассейна / Г.К. Зубакин - Л.: Гидрометеиздат, 1987.-160 с.

17. Climatic atlas of the Arctic Seas 2004: Part I. Database of the Barents, Kara, Laptev, and White Seas / Matishov G., A. Zuyev, V. Golubev et al. - Oceanography and Marine Biology. National Oceanographic Data Center/NOAA, Silver Spring, MD, USA, 2004.- 356 p. (+DVD).