

УДК 551.465

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАТЕРИКОВОГО СТОКА ПО АКВАТОРИИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2017 г. А. А. Полухин, П. Н. Маккавеев

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: polukhin@ocean.ru

Поступила в редакцию 23.03.2016 г.

После доработки 08.06.2016 г.

В работе рассмотрены случаи различного распределения материкового стока по акватории Карского моря в зависимости от гидрологических и метеорологических процессов, используя материалы экспедиционных исследований 1993–2014 гг. Института океанологии им. П.П. Ширшова. Кроме того, в статье показаны результаты расчетов относительного вклада пресной воды из нескольких источников: вод Оби и Енисея, а также талого льда, проведенные с использованием гидрохимических параметров.

DOI: 10.7868/S0030157417010142

ВВЕДЕНИЕ

Карское море является приемной акваторией стока двух крупнейших рек Сибири – Оби и Енисея [4]. Кроме них в море впадают такие сибирские реки как Пур, Таз, Пясины и другие. Суммарный сток рек, впадающих в Карское море, составляет 1350 км³/год, из этого объема на долю вод Обской губы и Енисея приходится 82% [15], то есть воды этих рек представляют основную составляющую пресного стока. В связи с этим особое значение приобретает изучение особенностей распространения речных вод по акватории моря и оценка вклада каждой из указанных рек в структуру поверхностного слоя.

Вопрос о распространении речных вод по акватории моря дискутируется, по крайней мере, с 30-х годов XX века [26], одним из главных индикаторов присутствия речного стока полагалась величина щелочно-хлорного отношения. Помимо гидрохимических параметров для оценки распространения вод материкового стока, существует ряд работ, где используются гидрофизические данные, результаты спутникового анализа и моделирования [6, 8, 37]. Кроме гидрофизических аспектов распространения речных вод по акватории моря, также необходимой составляющей определения границ распространения материкового стока служит гидрохимическая характеристика смешивающихся вод, в частности содержание растворенного кремния [21, 26]. По литературным данным, эта граница определяется по изолинии 10 мкмоль содержания кремния [23, 24]. Другой надежный критерий присутствия вод материкового стока – величина отношения щелочность/соленость (Alk/S). Изменение солености может происходить и под

влиянием таяния льдов (морских, речных, материковых), атмосферных осадков, деградации мерзлоты. Но изменение соотношения Alk/S (или Alk/Cl) происходит в основном под влиянием именно речного стока. При Alk/S более 0.06–0.08 можно уверенно говорить о значительном присутствии именно речных вод [15, 22].

По литературным данным известно несколько схем распространения материкового стока по площади Карского моря (рис. 1). Так, в работе [7, 16] говорится о 3-х схемах: “восточной”, “центральной” и “западной”. В работе [25] выделяется еще “юго-западный” тип, который, впрочем, можно объединить с “западным” типом. Естественно, основной причиной, по которой речной сток распределяется подобным образом, является ветровое воздействие [7]. Вторым важнейшим фактором служит объем пресных вод, поступающих из Оби, Енисея и других рек (но в работе учитываются только воды первых двух, на которые приходится более 80% всего пресноводного стока в Карское море).

Использование только физических параметров (соленость и температура) могло позволить оценить только суммарный принос пресных вод (включая материковый сток, атмосферные осадки и талые воды). Для выделения составляющих отдельных источников пресных вод необходимо использовать и химические параметры. Первая работа по разделению вод Оби и Енисея в поверхностном слое Карского моря принадлежит Стунжасу [28]. Рассматривая уравнения регрессии соленость–щелочность и соленость–кремний П.А. Стунжас показал, что опресненная линза, обнаруженная осенью 1993 г. у северного по-

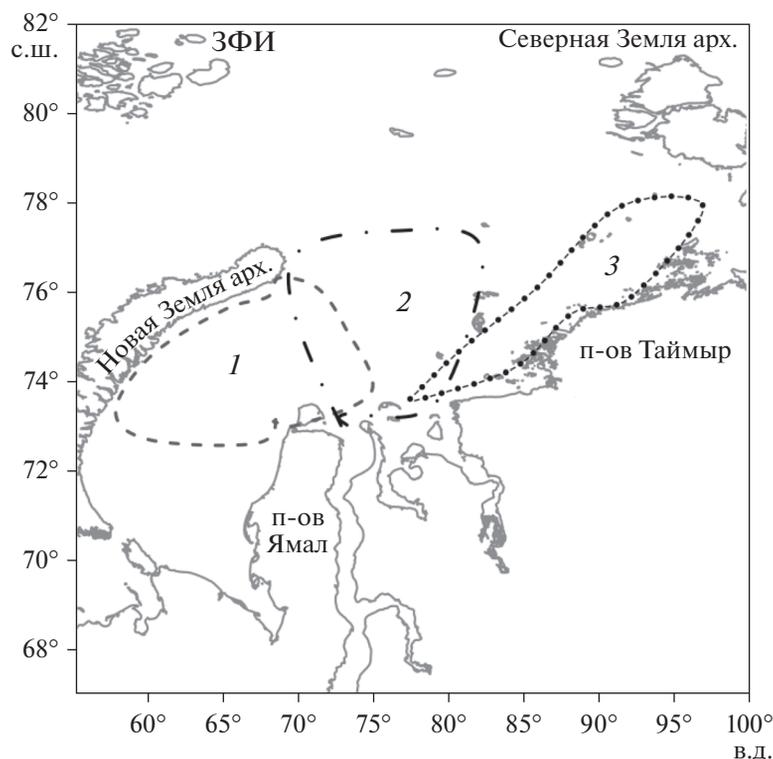


Рис. 1. Типы распределения речного стока в Карском море: 1 – западный тип (объединен с юго-западным типом), 2 – центральный тип, 3 – восточный тип.

бережья Новой Земли [2], принадлежит водам енисейского происхождения. Работа разделению вод от различных источников в Карском море была продолжена с применением уравнений смешения квазиконсервативных субстанций [13].

В предыдущих работах было показано, что для определения происхождения поверхностных вод в высоких широтах, лучше подходят величины общей щелочности (Alk), содержания растворенного неорганического углерода (C_{tot}) и содержания растворенного кремния, которые, во-первых, являются наиболее чувствительными индикаторами материкового стока, во-вторых, лучше, чем другие гидрохимические параметры удовлетворяют условиям квазиконсервативности [3, 13, 28].

Помимо площадного распределения материкового стока по акватории моря, необходимо учитывать и вертикальный масштаб влияния пресных вод на гидрологическую и гидрохимическую структуру Карского моря. По результатам анализа 271 STD-зондирования на станциях в экспедициях ИО РАН с 1993 по 2014 гг. было выявлено, что опреснение верхнего слоя толщи морских вод происходит в диапазоне от 3–5 м до 15–20 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все данные, на основе которых проводились расчеты, получены в комплексных океанографических экспедициях ИО РАН в 1993 [9], 2007 [30],

2011, 2013 и 2014 гг. Во всех этих экспедициях кроме работ на гидрологических станциях выполнялся отбор проб по ходу судна. Подробно результаты распределения полей гидрохимических параметров, а также вертикальная гидрохимическая структура вод представлены в работах [10–12]. Материалы экспедиций 2013 и 2014 гг. пока не были опубликованы. В этих экспедициях анализ проб проводился по стандартным методикам, рекомендованным для морских гидрохимических исследований [19, 20, 27], гидрологические данные (температура и соленость вод) получены по результатам STD-зондирований. Для получения материалов по динамическому воздействию ветра на поверхностный слой моря использовались данные реанализа NCEP/NCAR (<http://www.cdc.noaa.gov>) [35]. В работе использовались данные по расходу рек, находящиеся в открытом доступе на сайте <http://www.arcticgreatrivers.org/>. Это проект Arctic Great Rivers Observatory, собирающий данные по стоку рек Обь, Енисей, Лена, Колыма, Юкон и Маккензи с 1999 г. по настоящее время. Гидрографы для Оби и Енисея представлены на рис. 2.

Для изучения вклада отдельных источников в формирование поверхностных вод можно применять несколько методов. Во-первых, это регрессионный анализ. По натурным данным для различных районов моря были подобраны уравнения

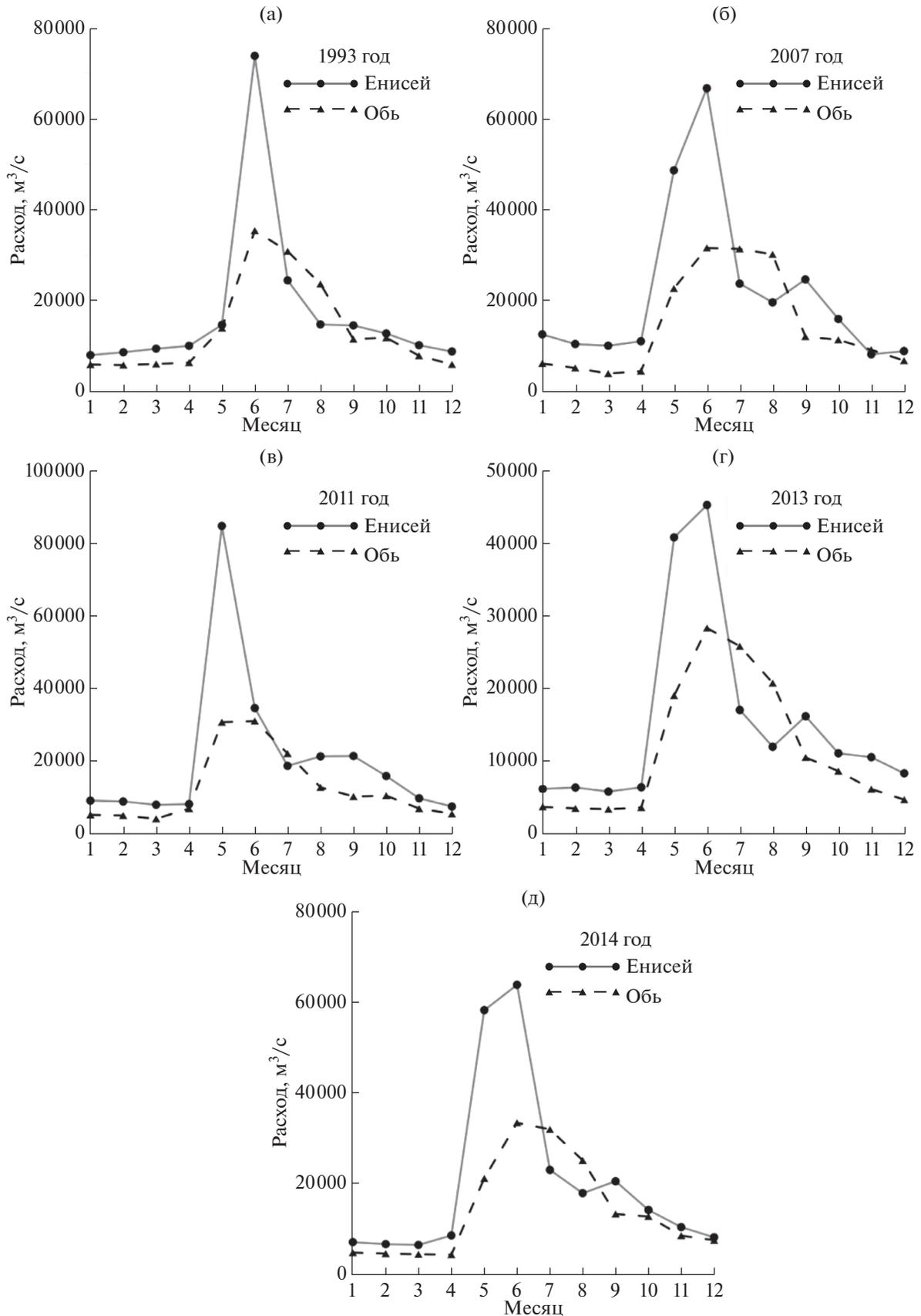


Рис. 2. Средний ежемесячный расход Оби и Енисея в (а) – 1993 г.; (б) – 2007 г.; (в) – 2011 г.; (г) – 2013 г.; (д) – 2014 г. Данные проекта Arctic Great Rivers Observatory <http://www.arcticgreatrivers.org/>.

регрессии для величин щелочности и содержания кремния с соленостью

$$C = A_0 + SA_1, \quad (1)$$

где A_0 и A_1 – эмпирические коэффициенты, S – соленость, C – содержание какого-либо химического параметра.

Величина свободного члена A_0 может быть интерпретирована как значение параметра при нулевой солености, в данном случае указывала на содержание щелочности или кремния в речных водах.

Другой подход исходит из предположения о том, что при смешении вод величина консервативного (или квазиконсервативного) параметра C_0 будет описываться следующим уравнением:

$$C_0V_0 = C_1V_1 + C_2V_2 + C_3V_3 + \dots, \quad (2)$$

где V_i , объем i – водной массы, а C_i – величина соответствующего параметра; учитывая что $V_0 = \sum V_i$ можно выразить относительный вклад каждой отдельной водной массы как $K_i = V_i/V_0$. Тогда уравнение приобретает вид:

$$C_0 = \sum (C_i V_i / \sum V_i) = \sum (K_i C_i). \quad (3)$$

Предполагая, что сумма относительных вкладов каждой водной массы $\sum K_i = 1$, получаем систему линейных уравнений, которую, зная величины параметров C_i , можно решить относительно K_i . Причем при использовании N параметров можно проводить расчеты для $N + 1$ водной массы. Методика расчета вклада различных источников в формирование поверхностного опресненного слоя на основе уравнений смешения была описана в работах [3, 32]. При подготовке данной работы этот метод был усовершенствован. В начале, рассчитывалась доля пресных вод, которая необходима для формирования профиля поверхностного распресненного слоя. Расчет производился до глубины 20 м, либо до достижения максимальной солености, наблюдавшейся в поверхностном слое за весь период работ. По уравнению смешения и гидрохимическим характеристикам вод открытой части моря рассчитывалось содержание C_{tot} , растворенного кремния, минерализации и величины Alk для гипотетической воды, необходимой для формирования вод поверхностного слоя, пока не разделяя по различным источникам. И уже для данной “гипотетической” воды рассчитывались доли вод Оби, Енисея и талых вод. Было предложено, что именно эти воды составляют большую часть пресного стока по акватории моря.

Этот метод успешно работает при существенном разнообразии состава источников вод. Состав химического стока рек индивидуален для каждой реки и определяется типами почв и пород, слагающих подстилающую поверхность бассейна ее водосбора. Особенно благоприятно для настоящей работы то, что различие химического

состава вод хорошо проявляется для вод Оби и Енисея [14, 34, 36]. Протекающие по болотистым равнинам воды Оби содержат больше соединений азота и растворенной двуокиси углерода, чем воды Енисея, которые, по сравнению с Обью, обогащены кремнием и карбонатным углеродом [11].

Основные сложности при применении этого метода связаны с выбором величин соответствующего параметра (C_i) для конечных точек смешения (воды Енисея, Оби и талые воды). Сложности эти связаны с перемешиванием речных вод в море, наличием на акватории пресных вод другого генезиса – от таяния льда и талых вод с островов и материка; а также с сезонной изменчивостью химического состава речных вод между половодьем и меженью; межгодовой изменчивостью параметров из-за изменения объема речного стока. Однако следует учесть, что основная часть речных вод в данном регионе выходит во время половодья, вклад меженных вод весьма скромнен (рис. 2). Учитывая значительный объем Енисейского залива и, особенно, Обской губы, можно считать, что за величины содержания C_{tot} , растворенного кремния, минерализации и величины Alk для двух данных рек можно принять результаты их измерения в пресной части губы или залива в данном году. Естественно если они имелись. В случае отсутствия наблюдений непосредственно в устье рек использовались свободные члены уравнений регрессии для поверхностных вод в приустьевом районе данной реки. В таблице приведены величины параметров, использованных при расчетах, как полученные непосредственно во время рейсов, так и рассчитанные по величине свободного члена уравнения регрессии.

Естественно, что состав речных вод отличается от состава талых вод. Влияние процессов образования и таяния льда на соотношение главных ионов изучено недостаточно. Однако часть исследователей полагают, что при образовании льда может происходить частичное осаждение карбонатов и накопление их во льду. В таком случае вода в ячейках рассола будет обеднена карбонатным углеродом, а при таянии льда произойдет, обогащение вод карбонатным материалом [18, 31, 38]. В работах [17, 39, 40] за величину содержания C_{tot} , растворенного кремния, минерализации и величины Alk талых вод предложено брать средние для данного региона данные полученные в экспериментах с таянием морских льдов. Однако мы считаем, что данный подход не вполне корректен. Данные по химическому составу талых вод, во-первых, будут сильно зависеть от возраста льда, его происхождения и многих других факторов, во-вторых, при таком подходе игнорируется роль атмосферных осадков и, частично, материковых льдов. При своих расчетах минерализацию и содержание химических параметров, так называемых

Величины минерализации, щелочности, содержания растворенных кремния и неорганического углерода в воде приустьевых районов Енисейского залива и Обской губы полученные во время экспедиционных работ и рассчитанные по уравнениям регрессии

Год	Река	Реальные данные (по минимуму солености)				По уравнению регрессии $B/A (y = aS + b)$		
		Sal	Alk	Si	C_{tot}	Alk	Si	C_{tot}
1993	Обь	0.745*	0.712	36.83	9.20	0.681 0.049	36.89 -0.449	8.75 0.567
1993	Енисей	0.047	1.226	81.00	15.34	1.094 0.034	74.24 -1.834	13.64 0.402
2007	Обь	0.049	0.656	65.21	8.16	0.584 0.052	65.21 -0.887	8.16 0.597
2011	Енисей	0.068	1.017	107.44	12.62	0.965 0.041	86.79 -2.536	11.96 0.471
2013	Обь	0.227	0.980	29.94	12.34	1.028 0.040	49.92 -0.581	12.70 0.473
2014	Обь	0.036	0.398	9.39	5.51	0.669 0.054	64.16 -1.428	8.56 0.620
2014	Енисей	1.094	0.727	55.24	9.21	0.583 0.054	53.88 -0.874	7.47 0.639

* Расчет по уравнению регрессии.

мых “талых вод” мы полагали нулевыми. Если пренебречь изменением соотношения главных ионов при образовании льда, то, при таянии льдов, содержащиеся в них солевые ячейки, соединяясь с водой, просто образуют морскую воду, со сходными для поверхностных вод данного района характеристиками. Таким образом, положение о “нулевом” составе талых вод просто приводит к небольшому занижению доли талых и атмосферных вод в формировании вод поверхностного слоя моря.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже представлены материалы исследований по распространению материкового стока в Карском море, а также результаты расчета вклада вод Оби, Енисея и талого льда в опреснение поверхностного слоя моря, полученные в экспедициях Института океанологии в период с 1993 по 2014 гг.

Гидролого-гидрохимическая характеристика поверхностного слоя моря

49-й рейс НИС “Дмитрий Менделеев” (14 августа–15 октября 1993 г.). Как видно из рис. 3а, максимальное опреснение морской части (ниже 15 епс) наблюдается к северо-западу от устья обской губы. Границу опреснения с западной стороны можно провести между изолиниями 20 и 25 епс от западного побережья Ямала к восточному берегу Новой Земли. С востока экспедиционные исследования были ограничены разрезом по 80° в.д., начиная от устьевой части Енисейского залива. На разрезе поверхностная соленость менялась от

0 в южной его части до 20 епс на северной станции разреза. Таким образом, видно, что с востока границу распространения речных вод обнаружить не удалось. Распределение солености и выделение границ распространения материкового стока подтверждаются данными гидрохимических исследований. Так, на рисунке 3в распределение общей щелочности соответствует распределению солености вод. Кроме того, на данном рисунке хорошо видна разница между пресными водами Оби и Енисея: содержащее меньшее количество карбонатов воды Обской губы имеют щелочность 0.6–0.8 мг-экв/л, в то время как для вод Енисея этот параметр, в среднем, равен 0.8–1.0 мг-экв/л. Схожие результаты дает и анализ распределение кремния в поверхностном слое. Западная граница распространения речных вод по изолинии 10 мкМ так же, как и в предыдущих случаях, проходит от западного побережья Ямала до восточного берега Северного острова Новой Земли (рис. 3б). Интересной особенностью при исследовании поверхностного слоя стало достаточно высокое (более 50 мкМ) содержание кремния на северной станции разреза вдоль 65° в.д. Ранее в литературных данных о столь высоких концентрациях кремния на фоне сильной опреснения сведений не приводилось. Соответственно, было сделано предположение [28] о материковом происхождении вод поверхностного слоя в данном районе. Более того, было выдвинуто предположение о преобладании воды енисейского происхождения в данной акватории, основываясь на соотношениях щелочность–соленость и кремний–соленость.

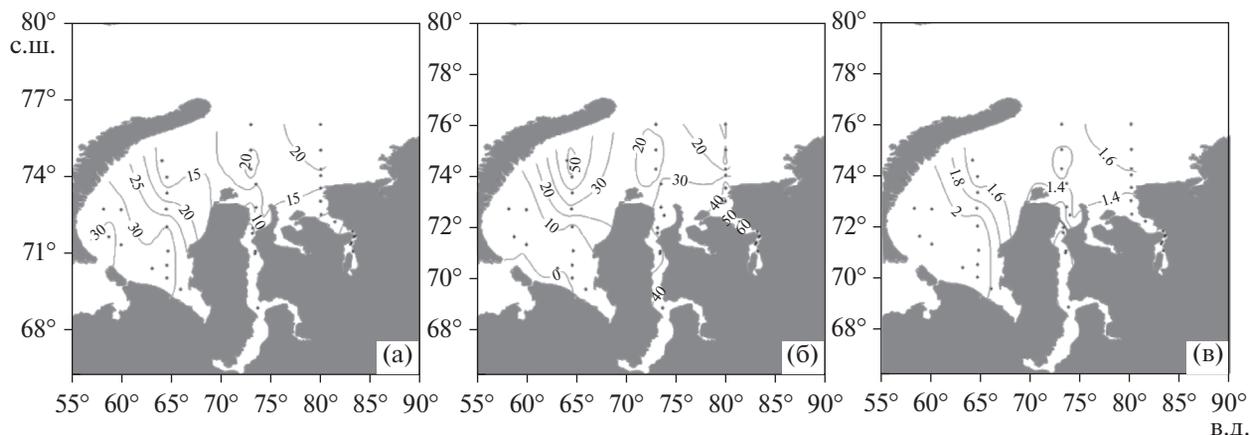


Рис. 3. Распределение по поверхности моря в 1993 г. (а) — солёности, епс; (б) — растворенного кремния, μM ; (в) — общей щёлочности, мг-экв/л.

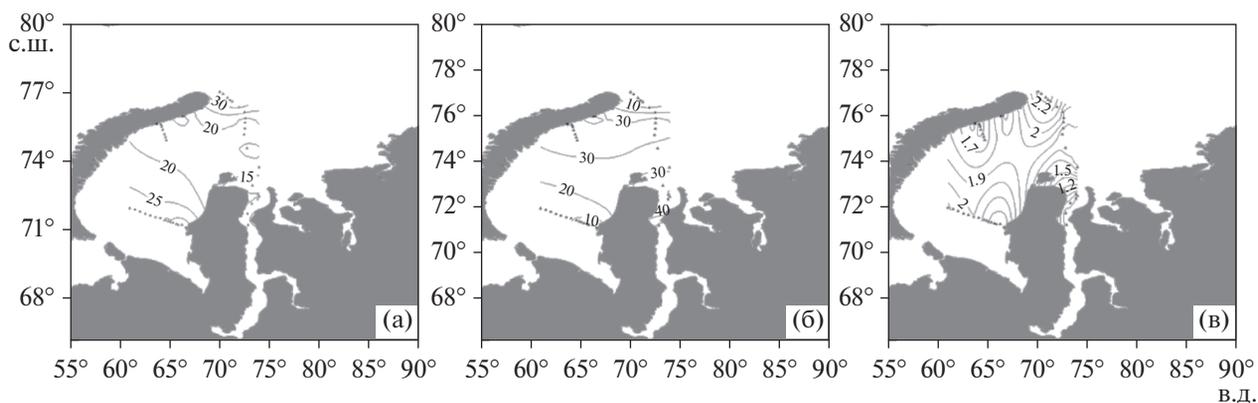


Рис. 4. Распределение по поверхности моря в 2007 г. (а) — солёности, епс; (б) — растворенного кремния, μM ; (в) — общей щёлочности, мг-экв/л.

54-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш” (9–30 сентября 2007 г.). Судя по распределению солёности в сентябре 2007 г. (рис. 4а), распространение речных вод имеет схожие черты с ситуацией экспедиции 1993 г. Западная граница влияния речного стока располагается от западного берега п-ова Ямал до, предположительно, восточного побережья Новой Земли. Это подтверждается распределением растворенного кремния и общей щёлочности (рис. 4б, 4в). На севере исследованной акватории, в районе западного отрога желоба Святой Анны наблюдаются значения солёности, характерные для вод центрального Арктического бассейна. Гидрохимические характеристики этой воды (порядка 2.4 мг-экв/л общей щёлочности и менее 10 μM кремния) подтверждают это предположение. А граница опресненного слоя находится южнее 76° с.ш. Восточную границу распространения материковых вод в данной экспедиции обнаружить не представилось возможным. Реанализ воздействия ветра в районе Карского моря (данные NCEP/NCAR) дал возможность проследить параметры циркуляции ат-

мосферы во время проведения экспедиционных работ. Данные о силе и направлении ветра указывают, что в течение сентября сильные ветры (свыше 15 м/с) меняли свое направление над акваторией Обской губы с северного на южное и наоборот несколько раз. Таким образом, речной сток из губы был локализован между 72° и 73° с.ш. В районе устья Обской губы наблюдалась солёность 10–12 епс (рис. 4а), в то время как в центральной части исследованной акватории этот параметр составлял 18–20 епс. Достаточно высокое содержание кремния (30 μM) в поверхностной воде также наблюдалось лишь вблизи устья губы (рис. 4б). В районе выхода из Обской губы общая щёлочность составляла приблизительно 1 мг-экв/л (рис. 4в), что показывает достаточно сильное воздействие обских вод.

57-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш” (14 сентября–04 октября 2011 г.). По распределению солёности в период экспедиции (рис. 5а) видно, что сильно опреснена центральная часть акватории моря, а также достаточно узкая полоса моря к востоку от устья Енисейского залива. На

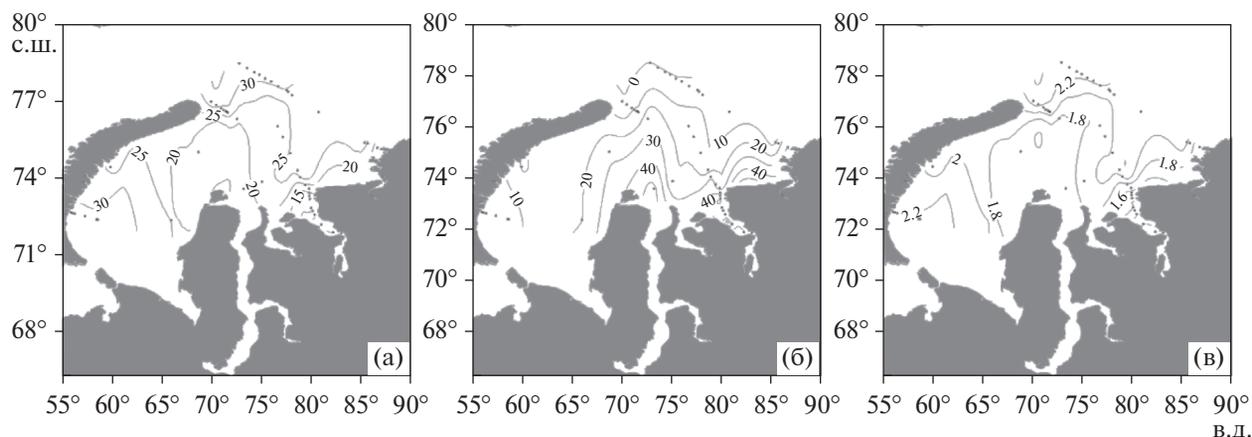


Рис. 5. Распределение по поверхности моря в 2011 г. (а) — солёности, ‰; (б) — растворенного кремния, μM ; (в) — общей щёлочности, мг-экв/л.

севере граница опреснения доходит до северной оконечности Новой Земли, на запад распространяется до 65° в.д., на восток ограничена самой восточной станцией вблизи побережья Таймыра.

В Енисейском заливе удалось достичь места, где по всему вертикальному профилю присутствует только пресная речная вода, что подтверждено данными STD-зондирования и гидрохимическими определениями. Юго-западная часть моря характеризуется солёными морскими водами выше 30 ‰, то же самое можно сказать и о районе желоба Св. Анны севернее Новой Земли. Также наблюдается заток морских вод (солёность 27 ‰) с севера в сторону Енисейского залива, который, по-видимому, и прижимает часть опреснённых Енисеем вод к побережью Таймыра.

Описанное выше распределение солёности согласуется с распределением кремния в поверхностном слое моря (рис. 5б). Максимальные значения кремния (более $100 \mu\text{M}$) были зафиксированы в Енисейском заливе и соответствовали речным енисейским водам с нулевой солёностью. Судя по данному параметру, речные воды имели широкое распространение по акватории во время экспедиционных исследований. Изолиния $10 \mu\text{M}$ проходит достаточно далеко на запад от Обь-Енисейского взморья, к северу располагается на широте м. Желания Новой Земли, а к северо-востоку проходит приблизительно в 300 км от устья Енисейского залива.

Границы опреснённого слоя хорошо подчеркивает общая щёлочность морских вод (рис. 5в). Стоит отметить, что, судя по распределению данного параметра, чисто морские воды (щёлочность 2.3–2.4 мг-экв/л), не подверженные воздействию материкового стока, встречаются лишь в северной части исследованной акватории, между восточным и западным отрогами желоба Св. Анны.

125-й рейс НИС “Профессор Штокман” (3–21 сентября 2013 г.). По распределению солёности

(рис. 5а) видно, что Обско-Енисейское взморье опреснено достаточно сильно, и к северу от устья Обской губы солёность составляет всего 10–12 ‰. Принятая за границу опреснения изогалина 24 ‰ в 2013 г. находится значительно южнее и ближе к устьям губы и залива, чем в предыдущие описанные экспедиции, что, по-видимому, указывает на центральный (изолированный) тип распространения речного стока. В северной и западной части акватории моря в поверхностном слое зафиксировано значение солёности выше 30 ‰, что говорит об адекватности вод арктического бассейна в акваторию Карского моря с севера и, возможно, вод баренцевоморского происхождения, через пролив Карские Ворота [7]. Выводы о центральном типе распространения речных вод подтверждаются данными по распределению растворенного кремния в поверхностном слое моря (рис. 5б). В мористой части Обской губы этот параметр достигает $60 \mu\text{M}$, а в районе 74° с.ш. составляет $40 \mu\text{M}$, далее на север, запад и восток содержание в морской воде кремния плавно снижается. Изолиния $10 \mu\text{M}$ отмечает границу распространения речных вод и практически совпадает с изогалиной 24 ‰. Представленное на рис. 5в распределение общей щёлочности в поверхностном слое подтверждает распределение речных вод, относящееся к центральному типу. Стоит отметить достаточно высокое значение щёлочности в водах Обской губы, на южных станциях разреза. Среднемноголетнее значение общей щёлочности для вод Обской губы составляет 0.6 мг-экв/л, в то время, как в 2013 г. минимальным значением явилась цифра 0.9 мг-экв/л. Это говорит о том, что экспедиция не дошла до чисто речных вод, а южная станция была сделана в водах, подверженных влиянию морских вод.

128-й рейс НИС “Профессор Штокман” (11 августа–8 сентября 2014 г.). Построенная по данным STD-зонда карта-схема распределения со-

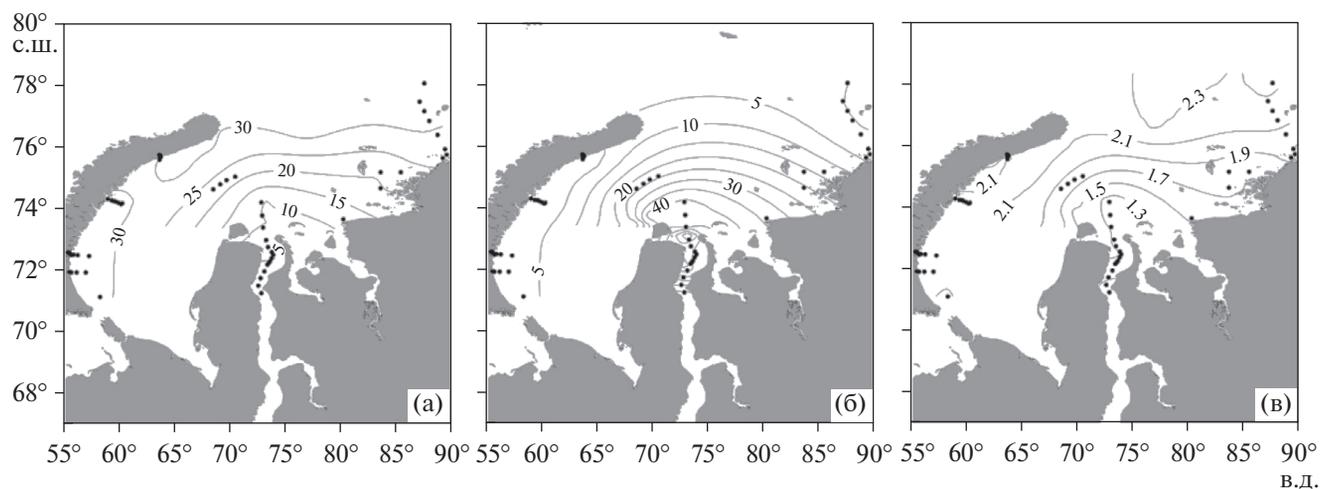


Рис. 6. Распределение по поверхности моря в 2013 г. (а) – солёности, епс; (б) – растворенного кремния, μM ; (в) – общей щёлочности, мг-экв/л.

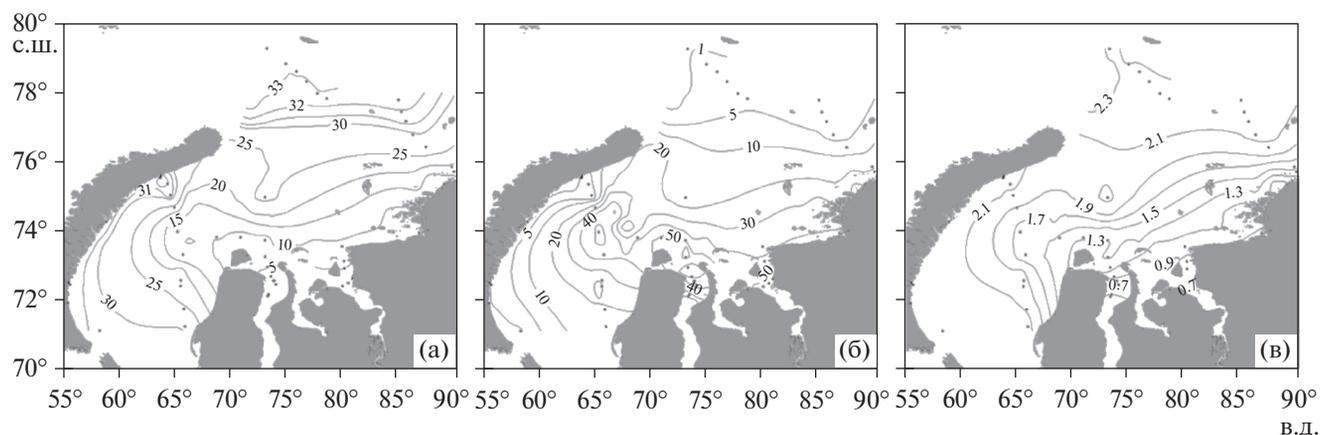


Рис. 7. Распределение по поверхности моря в 2014 г. (а) – солёности, епс; (б) – растворенного кремния, μM ; (в) – общей щёлочности, мг-экв/л.

лености в поверхностном слое (рис. 7а) достаточно четко определяет границы акватории, подверженной влиянию материкового стока. Особенно выделяется опресненная до 10–12 епс область в районе Обско-Енисейского взморья, распространяющаяся как на запад от Ямала до 65° в.д., так и на восток практически до 90° в.д. в районе побережья п-ова Таймыр.

Такое распределение удалось зафиксировать в связи с началом экспедиции в первой половине августа. Кроме того, если расход Оби соответствовал среднемноголетнему распределению, то расход Енисея во время паводка был ниже среднемноголетнего (около $60000 \text{ м}^3/\text{с}$), зато эта величина держалась на одном уровне в мае и июне (рис. 2), тогда как обычно пик паводка приходится только на июнь. Таким образом, можно сделать вывод о том, что за первую половину 2014 г. из Енисея и Оби в акваторию моря поступило 62 и 42% от всего годового стока.

Такой объем материкового стока является поставщиком огромного количества растворенных и взвешенных веществ. На рис. 7б показано содержание растворенного кремния в поверхностном слое. Видно, что поток, содержащий максимальное количество кремния направлен к западу от устьев обской губы и Енисейского залива. Концентрация кремния в устьях достигала $50 \mu\text{M}$, в то время как в целом в этой области сохранялись концентрации кремния выше $30 \mu\text{M}$. В целом же, по изолинии $10 \mu\text{M}$, стоит отметить достаточно мощное влияние речного стока на поверхностный слой моря в 2014 г.: западная граница вытянута сильно к побережью Новой Земли, в то время как северная граница проходит по широте м. Желания Новой Земли и уходит восточнее в сторону пролива Вилькицкого. Описанное выше распределение речного стока по акватории моря подтверждается распределением щёлочности в поверхностном слое (рис. 7в). Положение речных вод отражает изолиния 2.1 мг-экв/л , которая

практически дублирует изолинию распределения растворенного кремния. Стоит отметить, что измеренные в мористой части Обской губы и Енисейского залива значения щелочности (0.5–0.7 мг-экв/л и 0.9 мг-экв/л соответственно) сопоставимы со средними климатическими характеристиками для этих районов [1, 5, 16, 33].

Вклад разных источников в формирование поверхностного опресненного слоя

1993 г. На рис. 8а видно, что в опресненном участке вблизи Новой Земли около 1/3 воды принадлежит Енисею, порядка 20% (0.2 отн. ед) — пресный сток Оби, еще около 10% относятся к талым водам. Соответственно, оставшаяся половина смеси — поверхностная вода Карского моря. В центральной части Карского моря преобладает сток из Обской губы. Его доля севернее 73° с.ш. составляет 30–40% (0.3–0.4 относительных единиц), в то время как доля енисейской воды не превышает 10% (0.1 отн.ед.). Если взглянуть на гидрограф рек Обь и Енисей за 1993 г. (рис. 2а), то в целом он похож на среднесезонный график расхода этих рек. Но основная причина, на взгляд авторов, почему же пресной воды обского происхождения в поверхностном слое больше, чем енисейской, является именно сезонная изменчивость расхода двух крупнейших сибирских рек. Пик половодья на обеих реках приходится на июнь. В момент половодья расход Енисея более чем в 2.5 раза превосходит Обь. Но в июле–августе уже расход Оби, в ряде случаев, преобладает над Енисеем, а начиная с сентября и до начала половодья расход обеих рек практически идентичен. Кроме того, устье Обской губы ближе к рассматриваемому району центральной части Карского моря, чем Енисейского залива. Поэтому вода из Обской губы раньше выходит в открытую часть моря. Таким образом, обские воды, обладая более низкой плотностью, наслаиваются на перемешанные с морскими енисейские воды, так как после пика половодья расход обеих рек равен или несколько преобладает обский сток. В связи с этим на момент проведения экспедиции мы получаем данные, которые при обработке указывают на преобладание в районе исследований обских вод. Этот эффект будет отмечен и в дальнейших описаниях экспедиционных исследований и полученных результатах.

В целом для ситуации экспедиции 1993 г. сложно однозначно судить о типе распространения речного стока, так как имеются черты как центрального (изолированного) типа, так и западного. Но, судя по западной границе полей солености, кремния, общей щелочности, можно назвать данный тип распределения “западным”.

2007 г. Как видно из рис. 8б, воды обского и енисейского происхождения на исследованной

акватории выделяются крайне слабо, несмотря на достаточно мощный паводок на обеих реках (рис. 2б). Судя по реанализу ветра, поток пресных вод из Обской губы и Енисейского залива перемещался на восток. К сожалению, работы восточнее Обской губы не проводились, поэтому по нашим данным не представляется возможным выделение вклада различных вод в том районе моря. Также можно отметить, что чисто обские воды в Обской губе обнаруживаются достаточно далеко к югу от устья губы. Это связано с сильными (>10 м/с) ветрами с севера, предшествовавшими во времени проведению океанографических работ, которые отогнали обскую воду вглубь губы. Таким образом, влияние как обских, так и енисейских вод в 2007 г. на исследованную акваторию носит локальный характер (см. результаты 54-го рейса НИС “АМК”, 2007 г.). Стоит отметить, что рассчитанный вклад талых вод в указанной части моря весьма высок и составил 20–30%. Так как лед в западной части моря держался до начала августа (данные АНИИ), этот расчет выглядит достаточно обоснованным вкуче с данными о невысокой силе ветра в районе восточного побережья Новой Земли во время работ. Достаточно высокая доля рассчитанных талых вод в районе устья Обской губы, возможно, связана с эффектом, описанным в работе [29].

2011 г. Отличительной особенностью режима речного стока в 2011 г. служит более раннее и более мощное, чем в предыдущие описанные годы, половодье на Енисее (рис. 2в). Анализ циркуляции воздуха над поверхностью моря (данные реанализа NCEP/ NCAR) показал, что с момента начала работ в море и до середины сентября над всей акваторией преобладал стабильный южный ветер, направляющий опресненную воду далеко на север и на восток от устьев заливов. С середины сентября ветер меняется на северный, сила его относительно невелика, а в начале 3-й декады сентября ветер с севера стабильно действует над Обь-Енисейским взморьем и к северу от него, неся в эту область морские воды северного Карского моря.

Расчеты показали, что доля енисейских вод составляла более 50% в центральной и южной частях исследованной акватории Енисейского залива (рис. 8в), а также в относительно узкой вдольбереговой зоне к востоку от залива, вдоль берега п-ова Безыменный. Такое распределение хорошо сочетается с атмосферной циркуляцией в это время. Воды Оби составляли от 10 до 20% в центральной части моря. В юго-западной и северо-восточной частях моря, по-видимому, также прослеживается влияние обских вод, но доля их в поверхностном слое не превышает 10%. Наши выводы идут в разрез с выводами о вкладе Оби и Енисея в поверхностный слой моря осенью 2011 г. в статье [6]. Ими был сделан вывод о преоблада-

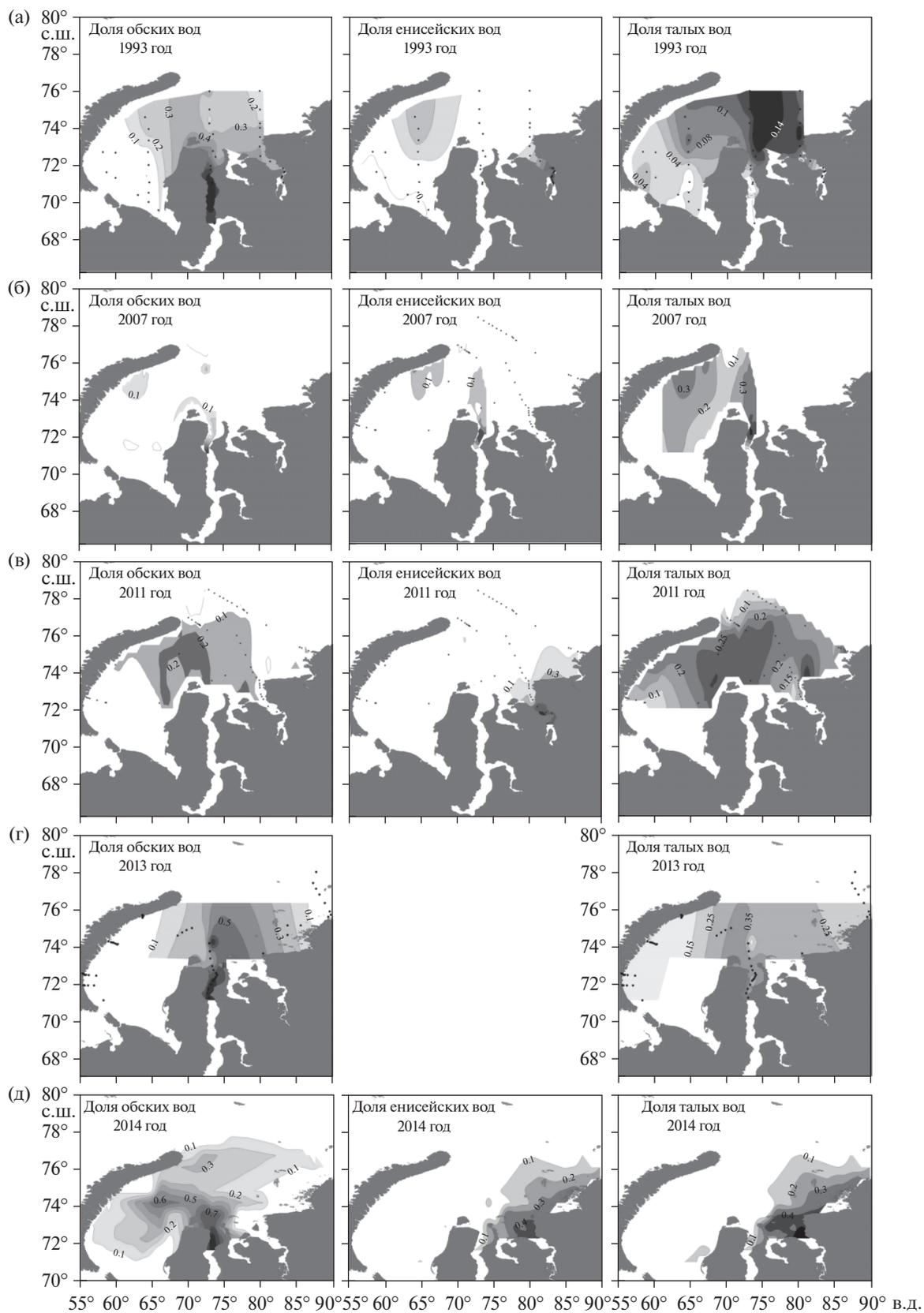


Рис. 8. Вклады вод рек Енисей и Обь, а также талых вод (относительные единицы) в образование поверхностного слоя Карского моря по результатам данной работы.

нии енисейских вод в процессе опреснения акватории Карского моря в 2011 г. Судя по данным среднемесячного расхода Оби и Енисея за 2011 г., а также по доводам П.О. Завьялова и коллег, этот факт кажется вполне обоснованным. Обские воды в 2011 г. по своему распространению на поверхности моря преобладают над енисейскими в силу разницы в сроках половодья на этих двух реках, о чем уже говорилось выше.

Вклад талых вод по нашим расчетам составил порядка 25% в центральной части моря вблизи Обской губы и от 10 до 20% на всем Обско-Енисейском взморье. Судя по данным ледовой обстановки в Карском море (ЕСИМО ААНИИ), акватория моря полгода была полностью покрыта льдом толщиной от 30 до 200 см и только к концу мая область вблизи устьев Обской губы и Енисейского залива освободилась ото льда. Судя по реанализу ветра, в период с июня по октябрь центральная часть моря, где и скапливается основное количество льда, находилось в относительно спокойной метеорологической обстановке. Соответственно, большая часть талой ледовой воды (по грубым оценкам порядка 400 км³ пресной воды) могла остаться в указанной области. Тем самым можно объяснить достаточно высокое содержание талых вод в поверхностном слое исследованной акватории в 2011 г.

2013 г. Судя по нашим расчетам, доля воды енисейского происхождения в период проведения экспедиционных исследований оказалась крайне мала (поэтому не представлена картинка с вкладом енисейской воды на рис. 8г). Лишь на одной из станций обского разреза было получено значение 17% енисейской воды в поверхностном слое, что, по-видимому, явилось остатком паводкового выноса енисейских вод к моменту отбора проб. В то же время воды обского происхождения составляли от 25 до 55%. Стоит отметить, что объем выносимых Енисеем вод значительно ниже среднееголетнего показателя для времени паводка (он составляет 80000 м³/с), в то время как для Оби расход воды во время паводка, как и гидрограф в целом, эквивалентен среднееголетним значениям (рис. 2г). Таким образом, поверхностный слой, получивший большой объем енисейских вод, в июне, к моменту проведения работ, стал относительно однородным. В июле и августе преобладал расход Оби, поэтому начавшиеся в сентябре работы, на основе расчетов по гидрохимическим данным, показали присутствие большой доли обских вод в поверхностном слое центральной части Карского моря.

Вклад талых вод в поверхностный слой в 2013 г., также как и в 2011 г., достаточно велик и составил 30–35% в центральной части моря, к границам распространения речного стока, описанным выше, доля талых вод снизилась до 10%. Столь высо-

кое влияние талых вод на поверхностный опресненный слой вызвано ледовой обстановкой в конце 2012–первой половине 2013 г. вкуче с относительно невысоким расходом Енисея. Вся акватория Карского моря оставалась скованной сплошным однолетним льдом (мощностью от 30 до 200 см), начавшим формироваться во второй декаде октября, вплоть до конца мая. К концу июня сплоченность льда по всей акватории составляла 7–10 баллов и лишь к концу июля юго-западная и центральная части моря полностью освободились ото льда. Стоит отметить, что к этому моменту расход Оби был в 1.5 раза выше, чем Енисея, и продолжал оставаться примерно на том же уровне, в то время как расход Енисея еще уменьшался. Соответственно к моменту старта экспедиционных исследований (начало сентября 2013 г.) в поверхностный слой было вынесено большое количество обской воды вкуче с оставшейся талой водой, что и подтвердили результаты расчетов по гидрохимическим параметрам, а динамическое воздействие ветра способствовало такому распространению речных и других пресных вод.

2014 г. По нашим расчетам, доля обской воды в линзе достигала 60% (или 0.6 условных единиц на рис. 8д). Также выделяется небольшая линза, опресненная обскими водами, с соленостью 22–24 епс в поверхностном слое на траверзе Обской губы и м. Желания Новой Земли. Такое распространение обских вод объясняется как достаточно большим объемом пресной воды, поступившей из Оби в половодье (немного выше средних для реки значений для данного времени года, рис. 2д), так и ветровым воздействием. По данным реанализа, с момента начала работ в море и до завершения обского разреза (20 августа 2014 г.) над акваторией моря преобладали ветры с севера, частично переместившие обскую воду, поступившую в центральную часть моря в результате паводка на Оби, на запад. Также в самой губе поток пресной воды в поверхностном слое был остановлен теми же ветрами на широте 72° с.ш., при противоположном направлении воздействия ветра пресные обские воды могут наблюдаться севернее.

Во время паводка (май–июнь) расход воды в Енисее составил около 60 тыс. м³/с (рис. 2д), тогда как в среднем пик паводка приходится на июнь, когда расход воды составляет 80 тыс. м³/с. В то же время, в среднем для мая характерен объем расхода воды 30 тыс. м³/с. В июле же расход Енисея меньше, чем Оби, поэтому в центральной части моря вод енисейского происхождения нами не обнаруживается. Исключение составили несколько станций в северной части обской губы, на которых по расчетам было выявлено более 20% енисейских вод (рис. 8д). Возможно, данный факт явился результатом действия ветра. Данные

реанализа свидетельствуют о том, что до 20 августа преобладали ветры, действующие с севера и с востока, которые могли переместить часть линзы, опресненной енисейской водой, в северную акваторию Обской губы. После 20 августа ветер изменился на южный и западный, от 4–6 до 8–10 м/с, и, опресненная енисейским стоком, линза переместилась на восток, к берегу Таймыра. А в северной части Енисейского залива, на станциях, выполненных 22 августа, доля енисейских вод составила около 50%, несмотря на достаточно низкий расход воды.

Распределение талых вод по акватории моря в 2014 г. схоже с распределением енисейских вод (рис. 8д). Используя обзорные ледовые карты ААНИИ удалось установить, что всю зиму и весну акватория моря была покрыта однолетним льдом толщиной более 30 см, а в конце июля в мористой части Енисейского залива сплоченность льда составляла 1–6 баллов. Кроме того, первые 2 декады августа преобладали ветра северных румбов, они могли удерживать лед и талую воду в прибрежной зоне восточного побережья Енисейского залива. Затем при смене направления действия ветра (о чем говорилось выше) вместе с енисейскими водами на восток, вдоль берега, перемещались и талые воды. Через три недели, во время проведения работ в указанной области моря, поверхностные воды могли содержать в себе много талой воды. Расчеты показывают, что на трех самых южных в Енисейском заливе станциях в поверхностном слое доля талых вод равна 50%. Также расчеты показали небольшое количество талой воды (порядка 10%) поблизости от берега Ямала. Скорее всего, это остатки льда, скопившегося в Байдарацкой губе: данные ААНИИ показывают наличие льда сплоченностью 1–6 баллов в губе еще к середине августа, когда уже начались работы в Карском море.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа представляет собой продолжение исследования, начатого еще в конце XX века сотрудниками Лаборатории биогидрохимии ИО РАН. Результаты анализа и расчетов на основе натуральных данных дают представление о распространении материкового стока по акватории моря. Стоит учесть, что данная задача для Карского моря осложнена, по сравнению с другими районами Мирового океана, где имеется мощный материковый сток, наличием двух крупнейших в Сибири источников пресной воды. Необходимо добавить, что анализ произведен с использованием всех доступных на данный момент, кроме математического моделирования, средств исследования морей и океанов. Приведенное исследование имеет потенциал для всего арктического региона.

Авторы благодарят многих сотрудников Института океанологии им. П.П.Ширшова за помощь, как в экспедиционных исследованиях, так и в подготовке к публикации данной работы.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 14-05-05005Кар_а, полевые исследования) и РНФ (грант № 14-17-0681, обработка и анализ материалов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. Изд-во ГУНИО МО СССР, 1980. 184 с.
2. Буренков В.И., Васильков А.П. О влиянии материкового стока на пространственное распределение гидрологических характеристик вод Карского моря // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 652–661.
3. Власова Е.С., Маккавеев А.П., Маккавеев П.Н. Растворенный неорганический углерод в водах юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море) // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 2. С. 217–223
4. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
5. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Мысль, 1982. 196 с.
6. Завьялов П.О., Ижицкий А.А., Осадчиев А.А. и др. Структура термохалинных и биооптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 514–525
7. 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.
8. Кубряков А.А., Зацепин А.Г., Станичный С.В. Формирование и распространение поверхностного опресненного слоя в Карском море // *Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований*. М.: АПР, 2015. 320 с. С. 11–14
9. Лисицын А.П., Виноградов Е.М. Международная высокоширотная экспедиция в Карское море (49-й рейс научно-исследовательского судна “Дмитрий Менделеев”) // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 643–651.
10. Маккавеев П. Н., Мельникова З.Г., Полухин А.А. и др. Гидрохимическая характеристика вод западной части Карского моря (по материалам 59-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”) // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 540–551.
11. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А. Гидрохимическая характеристика вод Карского моря // *Океанология*. 1994. Т.34. № 5. С. 662–667.
12. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А., Мельникова З.Г. и др. Гидрохимическая характеристика вод западной части Карского моря / *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 730–739.
13. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А., Хлебонашев П.В. О выделении вод Оби и Енисея в распресненных линзах Карского моря в 1993 и 2007 гг. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 740–747.
14. Маккавеев П.Н., Хлебонашев П.В. Изменение химического состава вод в нижнем течении арктических рек (по материалам экспедиций 2002–2003 г.) // *Геология морей и океанов. Тезисы докладов*

- XVI Международной научной школы по морской геологии. Т. 1. Москва, 14–18 ноября 2005 г. М.: ГЕОС, 2005. С. 81–82.
15. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
 16. Пивоваров С.В. Химическая океанография арктических морей России. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 88 с.
 17. Пипко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П. Характерные особенности динамики карбонатных параметров вод восточной части моря Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 78–92.
 18. Реми Г. Курс неорганической химии. Т.1. Пер. с 11-го немецкого издания. М.: Мир, 1972. 824 с.
 19. Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.242-92. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 264 с.
 20. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Ред. Сапожников В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
 21. Русанов В.П. Гидрохимическая характеристика поверхностных вод Арктического бассейна // Биология Центрального Арктического бассейна. М.: Наука, 1980. С. 15–35.
 22. Русанов В.П. Кремний как индикатор тихоокеанских вод в Северном Ледовитом океане // Химико-океанографические исследования морей и океанов. М.: Наука, 1975. С. 181–186.
 23. Русанов В.П., Васильев А.Н. Распространение речных вод в Карском море по данным гидрохимических определений // Тр. ААНИИ. 1976. Т. 323. С. 188–196.
 24. Русанов В.П., Иванов В.В. Особенности определения морских границ устьевых областей рек Арктики // Тр. ГОИН. 1978. Вып. 142. С. 122–125.
 25. Смагин В.М., Бердников С.В., Пивоваров С.В. Исследования гидрохимической структуры и моделирование экологических последствий антропогенной деятельности в Карском море // Тезисы докладов на российско-норвежском рабочем совещании 28 февраля–2 марта 1995. СПб.: ААНИИ, 1995. С. 16.
 26. Смирнов А.А. Проникновение речных вод в Карское море и море Лаптевых // Тр. Арктического научно-исследовательского института. Л.: Морской транспорт, 1955. Т. 72. Вып. 2. С. 92–104.
 27. Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. Бордовский О.К., Иваненков В.Н. М.: ИО РАН, 1992. 200 с.
 28. Стунжас П.А. Разделение вод Енисея и Оби в Карском море по щелочности и кремнию // Океанология. 1995. Т. 35. № 2. С. 215–219.
 29. Стунжас П.А., Маккавеев П.Н. Объем вод Обской губы как фактор формирования гидрохимической неоднородности // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 622–634.
 30. Флинт М.В. 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 677–682.
 31. Цуриков В.Л. Жидкая фаза в морских льдах. М.: Наука, 1976. 210 с.
 32. Anderson L.G., Jutterström S., Kallin S. et al. Variability in river runoff distribution in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // J. of Geophys. Res. 2004. V. 109. C01016, doi 10.1029/2003JC001773
 33. Garcia H.E., Locarnini R.A., Boyer T.P. et al. 2013 World Ocean Atlas. V.4. Dissolved Inorganic Nutrients (phosphate, nitrate, silicate) / Eds. Levitus S., Mishonov A. NOAA Atlas NESDIS 76, 2013. 25 p.
 34. Holmes R.M., Peterson B.J., Zulidov V.V. et al. Nutrient Chemistry of the Ob’ and Yenisey Rivers, Siberia: Results from June 2000 Expedition and Evaluation of Long-term Data Sets // Marine Chemistry. 2001. V. 75. P. 219–227.
 35. Kalnay S., White G., Woollen J. et al. The NCEP // NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V.77. P. 437–471.
 36. Makkaveev P.N., Stunzhas P.A., Khlebopashev P.V. et al. Flux of nutrients from Ob’ and Yenisey rivers to the Arctic Ocean : Results from June 2000 expedition // Proceedings of the Arctic Regional Centre. V. 3. Chapter 2. Hydrochemistry and Greenhouse Gases. Vladivostok, 2001. P. 97–106.
 37. Pozdnyakov D.V., Korosov A.A., Pettersson L.H. et al. MODIS evidences the river run-off impact on the Kara Sea trophy // International Journal of Remote Sensing. 2005. 26:17. P. 3641–3648.
 38. Richardson C. Phase relationship in sea ice as a function of temperature // J. of Glaciology. 1976. V. 17. № 77. P. 507–719
 39. Yamamoto-Kawai M., Tanaka N., Pivovarov S. Freshwater and brine behaviors in the Arctic Ocean deduced from historical data of $\delta^{18}\text{O}$ and alkalinity (1929–2002 A. D.) // J. of Geophys. Res. 2005. V. 110. C10003, doi 10.1029/2004JC002793
 40. Yamamoto-Kawai M., McLaughlin F.A., Carmack E.C. et al. Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: effects of ocean acidification and sea ice melt // Science. 2009. V. 326. P. 1098–1100, doi 10.1126/science.1174190

Features of the Continental Runoff Distribution on the Kara Sea Water Area

A. A. Polukhin, P. N. Makkaveev

The paper shows different types of the continental runoff distribution on the Kara Sea according to hydrological and meteorological processes using 1993–2014 Shirshov Institute of Oceanology expedition data. Furthermore there are presented results of calculation of the relative contribution of fresh water from several sources (rivers Ob, Yenisei and melted ice as well) using hydrochemical parameters.