

УДК 551.465

**СТРУКТУРА ТЕРМОХАЛИННЫХ И БИООПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ КАРСКОГО МОРЯ В СЕНТЯБРЕ 2011 г.****© 2015 г. П. О. Завьялов, А. С. Ижицкий, А. А. Осадчиев,
В. В. Пелевин, А. Б. Грабовский***Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: peter@ocean.ru*

Поступила в редакцию 03.06.2013 г., после доработки 01.07.2013 г.

В статье представлены данные измерений термохалинных и биооптических полей в поверхностном слое Карского моря, выполненных в сентябре 2011 г. в 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”. Измерения проводились на ходу судна с помощью проточной STD-системы (температура и соленость) и ультрафиолетового флуоресцентного лидара (концентрации хлорофилла, общей взвеси и растворенных органических веществ), что позволило обеспечить высокое пространственное разрешение (порядка 10–100 м) по маршруту экспедиции. Приведены подробные карты распределений указанных величин по акватории моря, выделены фронтальные зоны, построены *T,S*-диаграммы для приповерхностной водной массы и определены базисные водные типы. Показано, что одним из главных факторов, влияющих на формирование свойств поверхностного слоя, является обско-енисейский пресноводный сток. Во второй части статьи предложена численная модель динамики материкового стока в Карском море. Модельные эксперименты проведены для реальных ветровых условий августа–сентября 2011 г. (реанализ NCAR/NCEP), выполнена валидация модели на основе полученных в рейсе натуральных данных.

DOI: 10.7868/S0030157415040176

ВВЕДЕНИЕ

Достаточно посмотреть на географическую карту, чтобы предположить, что свойства вод Карского моря в решающей мере определяются взаимодействием трех существенно разных по происхождению и характеристикам водных масс: вод баренцево-морского происхождения, поступающих с запада через пролив Карские Ворота, вод арктического бассейна, вторгающихся с севера в районе желоба Св. Анны восточнее острова Новая Земля, и опресненных вод материкового стока из района устьев Оби и Енисея. Для поверхностного слоя материковые воды играют особенно важную роль, при этом характер их распространения по акватории моря характеризуется значительной межгодовой изменчивостью и определяется как величиной и изменчивостью речного стока, так и ветровыми воздействиями ([3, 11], см. также статью Зацепина и др. в этом выпуске).

Реки приносят в Карское море в среднем около 1350 км³ пресной воды в год [2] (напомним здесь для сравнения, что, например, средний годовой сток Дуная в Черное море составляет “все-го” около 200 км³, а сток Волги в Каспийское – около 250 км³). Объем среднегодового стока в Карское море, отнесенный к площади его акватории, составляет слой толщиной 152 см [5]. Этот крайне значительный объем поступающих реч-

ных вод – обладающих собственным запасом тепла и импульса, несущих взвесь, растворенную органику и биогенные вещества – распространяется на обширной территории в сравнительно мелководном бассейне и оказывает определяющее воздействие на все системы Карского моря. При этом воздействие стока не сводится только к прямому обмену свойствами между смешивающимися речными и морскими водами. Не менее важны динамические эффекты, связанные со способностью стока формировать мощную плотностную стратификацию в приповерхностном слое моря, тем самым подавляя вертикальное перемешивание и эффективно “экранируя” нижележащую водную толщу от обменов теплом и импульсом с атмосферой. Закономерности переноса материковых вод в море под влиянием ветрового воздействия и морских течений во взаимодействии с окружающими водными массами не до конца изучены.

Исследования гидрологии и гидрофизики современного Карского моря представляют большой интерес в контексте изменений климата в окраинных арктических морях. Однако это море пока остается одним из наименее изученных и обеспеченных данными морей России. Принимая во внимание многоплановый характер происходящих здесь гидрофизических процессов, а также учитывая затрудненную доступность этой

части океана средствам дистанционного зондирования ввиду почти постоянного присутствия облачности, можно утверждать, что основным средством изучения Карского моря должны стать комплексные экспедиционные наблюдения. Именно такие работы были выполнены в ходе 59-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре–октябре 2011 г.

В данной статье представлены результаты этой экспедиции в части измерений термохалинных и био-оптических параметров поверхностного слоя моря. На основе полученных данных мы опишем пространственные распределения гидрологических полей по акватории моря, выделим фронтальные зоны и основные водные массы и обсудим количественные характеристики смещения последних. Для интерпретации наблюдавшейся термохалинной структуры поверхностного слоя мы также представим численную модель, специально разработанную для воспроизведения переноса материкового стока в море, и применим ее к условиям, соответствующим периоду проведения экспедиции.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе 59-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” выполнялась непрерывная регистрация термохалинных характеристик поверхностного слоя моря по ходу судна с помощью проточной STD-системы. Отбор воды осуществлялся с помощью всасывающего центробежного насоса Grundfos JP-6 мощностью 1.5 кВт через гибкий витой шланг длиной 9 м, выведенный за борт с рабочей палубы. На ходу судна заборный конец шланга удерживался системой свинцовых грузов и растяжек на глубине 0.5–1 м под поверхностью воды. Фактическая производительность насоса — до 0.8 л/с. Вода подавалась в укрепленный на палубе специальный закрытый контейнер объемом 70 л с установленным в нем STD-зондом SeaBird SBE911. Данные зондирования передавались по кабелю на компьютер в лаборатории вместе с данными судовой системы GPS. Частота первичных измерений зондом SBE911 — 24 зондирования в секунду при частоте опроса судовой системы GPS 2 Гц. Однако время обновления воды в баке составляло около 100 с. При скорости судна 10 узлов это соответствует пространственному масштабу “сглаживания” данных около 500 м.

При движении судна выполнялось также дистанционное зондирование поверхности моря флуоресцентным сканирующим лидаром. Лидар УФЛ-9 предназначен для экспрессных определений концентрации в морской воде растворенной органики, хлорофилла фитопланктона и взвеси. Основные технические характеристики лидара следующие: длина волны лазера — 354 нм, частота зондирования — 2 Гц, энергия импульса — 2 мДж,

длительность зондирующего импульса — 10 нс, входная апертура приемника — 140 мм, количество спектральных каналов — 11. Лидар был размещен в носовой части судна на планшире правого борта палубы надстройки, на высоте 7.5 м над поверхностью моря. Зондирующий луч направлялся на поверхность воды под углом 45 градусов к вертикали в область водной поверхности, свободную от пены. Проникающий в воду на глубину 1–3 м ультрафиолетовый лазерный импульс индуцирует флуоресценцию растворенных в этом столбе воды либо находящихся на поверхности органических веществ, а также испытывает комбинационное (рамановское) рассеяние непосредственно водой. Лазерное и флуоресцентное излучения в спектральном диапазоне 354–685 нм принимаются и анализируются спектроанализирующим блоком лидара. Интенсивности излучения в разных отрезках этого спектрального интервала затем пересчитываются в концентрации хлорофилла, взвеси и растворенной органики согласно методикам, описанным в работах [1, 6].

На станциях и в отдельных точках на переходах также отбирались пробы морской воды, которые затем фильтровались и консервировались. Одной из целей отбора проб было определение суммарной концентрации sestона в весовых единицах для последующего сопоставления с оптическими лидарными данными. Пробы отбирались с поверхности ведром. Фильтрация производилась через стекловолоконные фильтры фирмы Whatman марки GF/F (размер пор — 0.7 мкм) и ядерные мембранные фильтры (размер пор — 0.45 мкм).

АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

На основе данных проточной зондирующей системы удалось построить достаточно детальные горизонтальные распределения солёности и температуры на поверхности акватории Карского моря в сентябре и начале октября 2011 г. (рис. 1а, 1б).

По представленным выше данным можно условно оконтурить область опресненных поверхностных вод. С нашей точки зрения, для этой цели наилучшим образом подходит изохалина 19 епс. При таком допущении линза опреснения распространяется от енисейского взморья в узкой полосе на восток и в более широкой — в центральную часть моря, достигая северной оконечности острова Новая Земля. Следует отметить, что эта область довольно существенно отличается от соответствующей линзы опреснения, наблюдавшейся нами здесь в сентябре 2007 г. Тогда она состояла из двух отделенных друг от друга частей: одна была расположена вблизи устья, а другая была изолирована у центральной части Новой Земли [3]. Таким образом, положение, размер и состояние стоковой линзы обладают значительной изменчивостью в масштабах от синоптического (см.

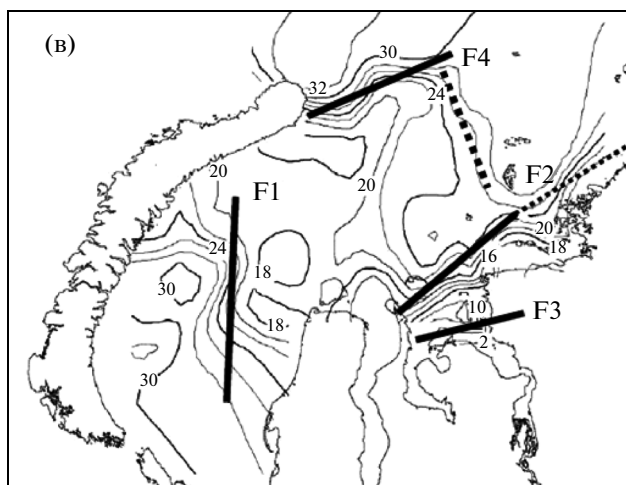
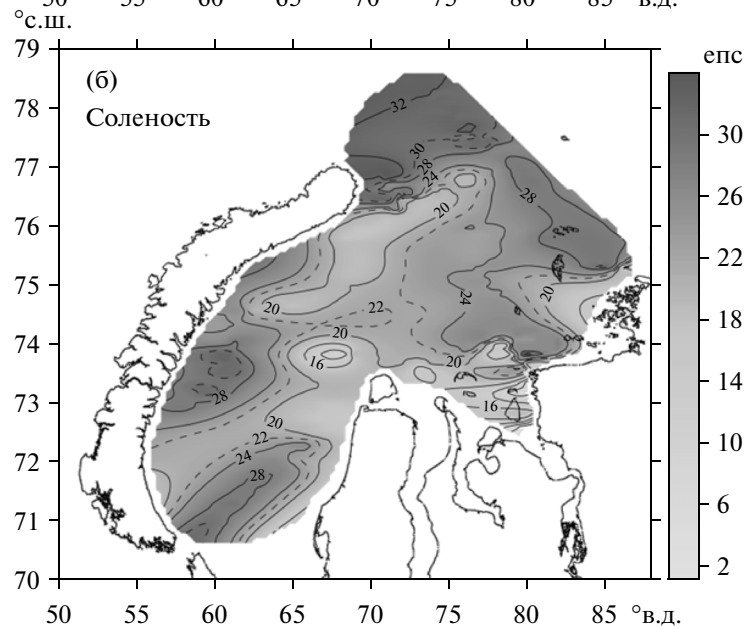
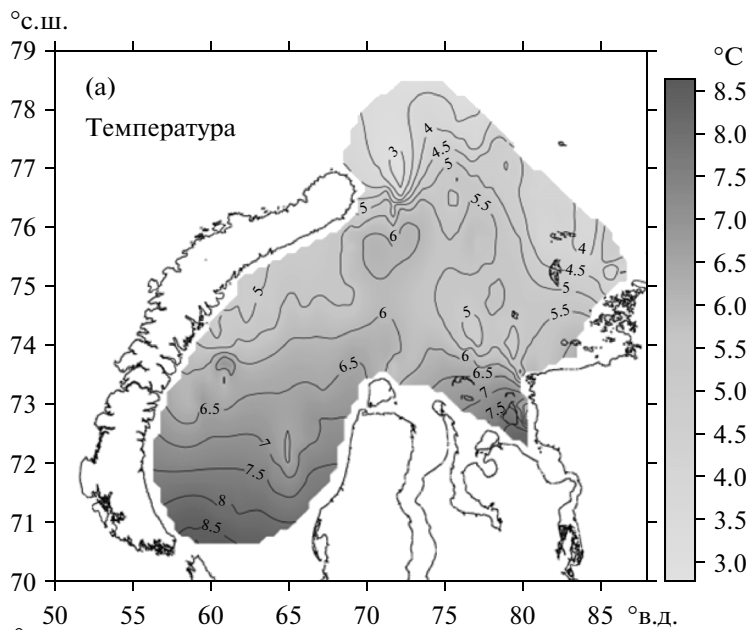


Рис. 1. (а) – Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) на поверхности Карского моря в сентябре–октябре 2011 г.; (б) – распределение солености (епс) на поверхности Карского моря в сентябре–октябре 2011 г., (в) – схематическое изображение выделенных фронтальных зон на фоне изолиний поверхностной солености (епс).

следующий раздел) до межгодового, связанной, по нашему предположению, прежде всего с влиянием ветрового воздействия.

Можно выделить несколько высокоградиентных зон, разграничивающих различные водные массы в поверхностном слое моря (рис. 1в):

1) фронт между водами баренцевоморского происхождения восточнее пролива Карские Ворота и водами, опресненными материковым стоком в центральной части моря (F1 на рис. 1в);

2) фронт между арктическими водами и водами, опресненными материковым стоком в северо-восточной части моря у южной оконечности желоба Св. Анны (F4 на рис. 1в);

3) внешний стоковый приустьевой фронт реки Енисей севернее о-ва Сибирякова и его продолжение на восток у побережья полуострова Таймыр (F2 на рис. 1в);

4) внутренний стоковый фронт реки Енисей в пределах Енисейской губы южнее острова Сибирякова (F3 на рис. 1в);

5) фронтальная зона, ограничивающая область опресненных вод с востока и вытянутая в меридиональном направлении из района восточнее желоба Св. Анны в сторону полуострова Таймыр (жирный пунктир на рис. 1в).

Наблюдавшаяся термохалинная структура поверхностного слоя моря в целом может быть охарактеризована общей T,S -диаграммой, построенной по всем имеющимся данным проточной измерительной системы (всего 20484 точек).

Следует отметить, что T,S -анализ обычно применяется для консервативных водных масс океана и, вообще говоря, не годится для случая, когда свойства последних меняются в результате не только их взаимного смешивания, но и действия других внешних факторов, например, нагревания верхнего слоя моря солнечной радиацией. Однако и в этой ситуации мы можем рассмотреть общую T,S -диаграмму поверхностного слоя (рис. 2). Если термохалинные свойства значительно модулируются обменами с атмосферой, а температура

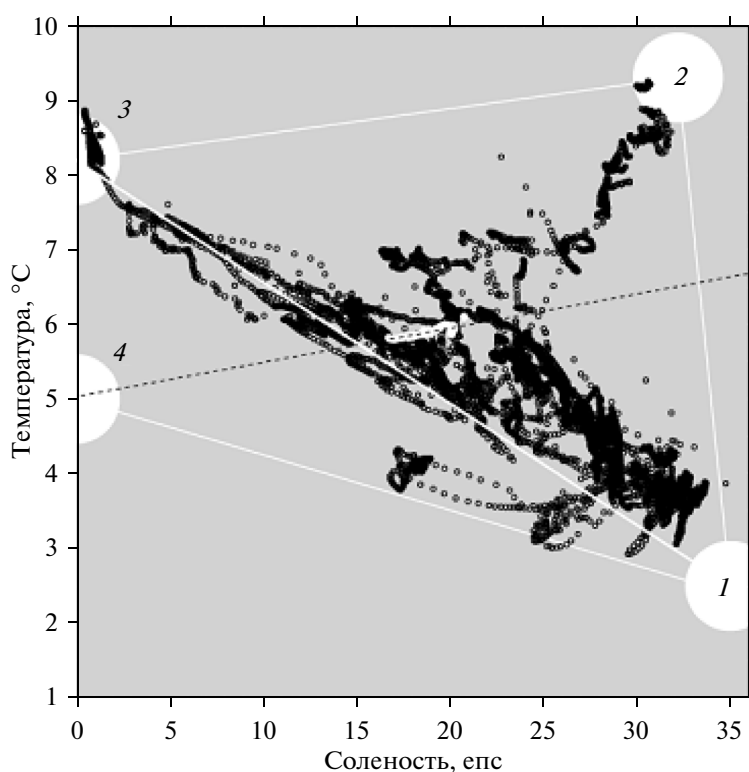


Рис. 2. Общая T,S -диаграмма вод поверхностного слоя Карского моря в сентябре–октябре 2011 г. и основные водные типы.

1 – поверхностная вода арктического бассейна, 2 – баренцевоморская вода, 3 – материковый сток реки Енисей, 4 – материковый сток реки Обь (предположительно). Выделенный белым цветом участок в центре диаграммы соответствует отрезку пути судна, наиболее близко расположенному к устью Оби.

участвующих в перемешивании вод меняется со временем, то, очевидно, следует ожидать, что диаграмма будет представлять собой “облако” точек с неочевидной организацией. Линейные структуры на ней будут искажены, а те, которые все же видны – будут проецироваться в различные интервалы значений температуры на оси, соответствующей нулевой солёности. В данном случае оказалось, что диаграмма выглядит совершенно иначе, и именно к этому мы хотели привлечь внимание читателя.

Можно видеть, что T,S -анализ указывает на взаимодействие следующих основных водных типов: 1) Солёная (34–35 епс) и холодная (температура ниже 3.5°C) вода арктического происхождения, поступающая из района желоба Св. Анны; 2) Несколько менее солёная (31–32 епс) и теплая (до 9.5°C) вода в западной части моря, вероятно, поступающая из Баренцева моря через пролив Карские Ворота; 3) Пресная вода енисейского происхождения с температурой около 8°C ; 4) В довольно локализованной области в восточной части района исследований были также обнаружены опресненные воды иного генезиса, образовавшиеся в результате смешения арктических вод и речных вод предположительно обского происхождения, которые значительно холоднее енисейских (5.5°C). К сожалению, этот последний тип вод может быть соотнесен с обским стоком лишь гипотетически, поскольку измерения непосредственно в Обской губе в этой экспедиции выполнены не были, и фактическая температура вод в устье Оби осталась неизвестной. Можно отметить, что во время предыдущей экспедиции в Карское море в сентябре 2007 г., выполненной в этот же месяц года, обские воды действительно были холоднее енисейских, и их температура составляла как раз около 6°C , но это, конечно, не означает, что и в 2011 г. ситуация была такой же.

Еще одним непрямым, но довольно наглядным аргументом в пользу предположения о том, что водный тип 4 на рис. 2 соответствует стоку Оби, является следующий. В центральной части T,S -диаграммы белым цветом выделены данные, приходящиеся на участок траектории судна, пройденный 17 сентября 2011 г. и наиболее близко расположенный к внешнему створу Обской губы, примерно от северо-восточной оконечности острова Белый до точки севернее острова Шокальского. Ввиду геометрической близости этого участка к устью Оби можно ожидать, что большая или меньшая примесь обских вод в этом районе, вероятно, должна была присутствовать в любом случае. Действительно, соответствующие данные на T,S -диаграмме ложатся на прямую (черный пунктир на рис. 2), указывающую на перемешивание с водным типом 4, что косвенно подтверждает наше предположение. Если оно справедливо, то это означает, что основная часть объема матери-

кового стока, участвовавшего в формировании вод поверхностного слоя Карского моря в сентябре 2011 г., принадлежит Енисею (водный тип 3 на рис. 2), в то время как роль обского стока была значительно меньшей и более локализованной.

Так или иначе, судя по T,S -диаграмме, практически все многообразие водных типов в верхнем слое моря неожиданно хорошо описывается простым перемешиванием названных поверхностных водных масс, что позволяет говорить о своего рода “двумерности” преобладающих здесь взаимодействий и лишь второстепенной роли потоков океан–атмосфера и вертикального перемешивания в процессах формирования вод.

Для каждой из точек T,S -диаграммы, находящихся в пределах треугольника 1–2–3, легко рассчитать процентные содержания α_1 , α_2 и α_3 выделенных основных водных типов. Для этого достаточно решить следующие простейшие уравнения:

$$\begin{aligned}\alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \alpha_3 T_3 &= T_0, \\ \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 &= S_0, \\ \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= 100\%,\end{aligned}\quad (1)$$

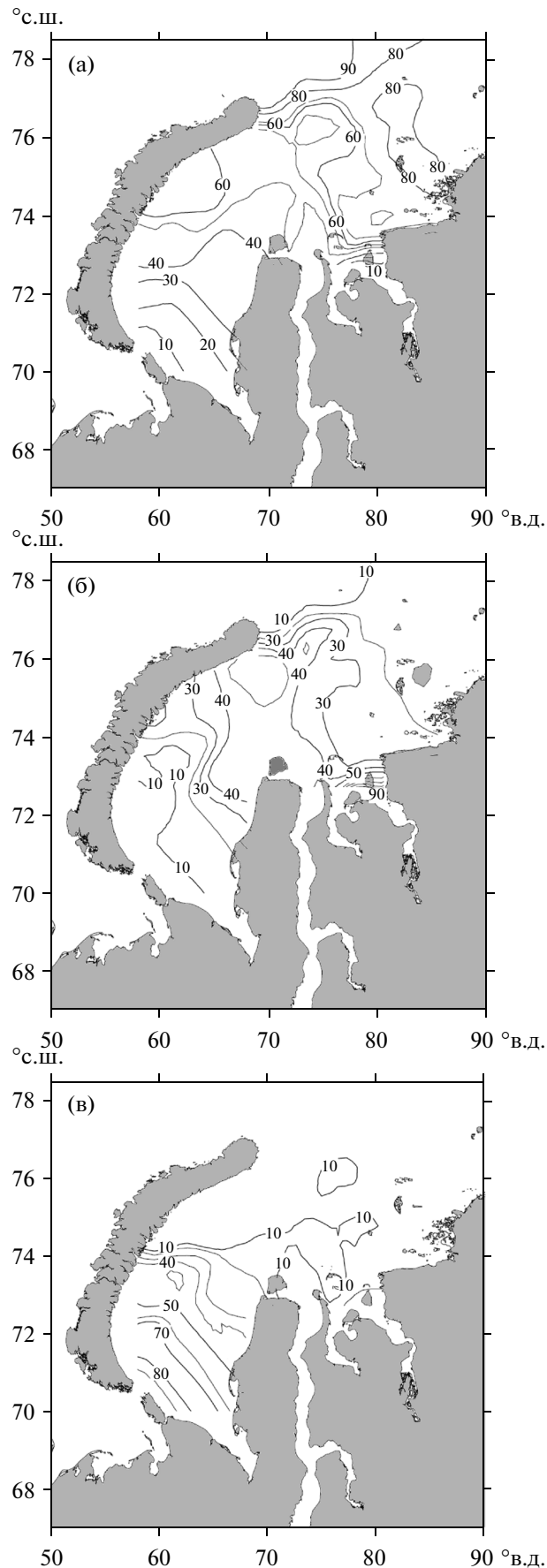
где T_0 и S_0 – соответственно температура и солёность, соответствующие данной точке, а T_i и S_i ($i = 1, 2, 3$) – температура и солёность i -го основного типа. Численные значения для T_i и S_i были приведены выше. Результаты решения системы уравнений (1) для всех точек полигона показаны на рис. 3а.

Видно, что поверхностная вода арктического бассейна (рис. 3а) поступает в Карское море в северо-восточной части акватории и особенно в районе желоба Св. Анны, где содержание ее достигает 90% и более. Относительно высокое содержание этой воды (свыше 60%) отмечено вдоль восточного побережья северной и центральной части Новой Земли – как раз там, где в сентябре 2007 г. наблюдалась изолированная линза вод, опресненных материковым стоком [3]. Следует отметить, что поверхностная вода арктического бассейна в целом является доминирующим компонентом состава вод поверхностного слоя Карского моря – практически по всей акватории моря (за исключением областей, примыкающих к речным устьям и проливу Карские Ворота) ее доля составляет от 30 до 80%, а общее ее содержание в верхнем слое Карского моря для сентября 2011 г. оценивается в 59%. Материковый сток (рис. 3б) был локализован в широкой полосе, протянувшейся от устья Енисея до северной оконечности Новой Земли. Содержание материкового стока в этом районе достигает 50%, а общее его содержание в поверхностном слое моря составляет 34%. Наконец, баренцевоморская вода (рис. 3в) почти целиком локализуется в западной части моря, а общее ее содержание не превышает 7%.

Рис. 3. Доли (в процентах по объему) содержания основных водных типов в составе вод поверхностного слоя Карского моря в сентябре–октябре 2011 г.: (а) – поверхностная вода арктического бассейна, (б) – материковый сток, (в) – баренцевоморская вода.

На рис. 4 показаны распределения содержания общей взвеси, хлорофилла и растворенных органических веществ, построенные по данным зондирования ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром УФЛ-9. На рис. 4а видно, что области повышенных концентраций взвешенных частиц, превосходящих фоновые значения на 40–100%, наблюдались в центральной части моря в полосе от речных устьев до северной оконечности Новой Земли. Характер распределения концентрации взвеси в целом повторяет особенности распределения вод пониженной солености, связанных с материковым стоком (см. рис. 2б). Заметим, что это может считаться еще одним косвенным аргументом в пользу высказанного выше предположения о том, что на момент измерений основной вклад в формирование вод материкового происхождения в Карском море принадлежал Енисею, а не Оби. Действительно, известно [4], что содержание общей взвеси в стоке Оби более чем на порядок ниже, чем в стоке Енисея. Следовательно, влияние стока Оби, даже когда оно отчетливо проявляется в снижении солености, должно сравнительно мало сказываться на распределениях взвеси. Распределения концентрации хлорофилла (рис. 4б) и растворенной органики (рис. 4в) в целом повторяют структуру распределения взвеси, однако обладают некоторыми особенностями. Так, распределение хлорофилла характеризуется большей неоднородностью: наряду с проявлениями влияния речного стока в нем можно отметить максимумы, локализованные у восточного побережья центральной части Новой Земли, связанные, вероятно, с поступлением биогенных веществ со стоком талых вод с берега. Наиболее олиготрофные области с низким содержанием хлорофилла отмечены в западной части моря в зоне преобладания баренцевоморских вод, поступающих из пролива Карские Ворота. Здесь же наблюдался и минимум содержания растворенных органических веществ.

Все высказанные выше соображения молчаливо опираются на предположение о том, что полученные в измерениях распределения термохалинных и био-оптических полей можно считать квазисиноптическими, то есть они не слишком сильно менялись со временем за почти месячный период выполнения рейса. С другой стороны, для обоснования применимости методов T,S -анализа при фиксированных значениях солености и температуры основных водных типов требуется, чтобы их смешивание происходило достаточно быст-



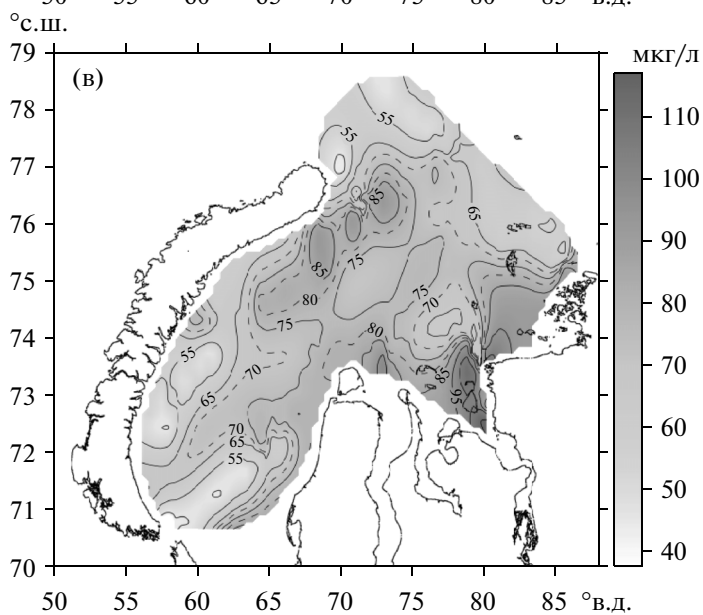
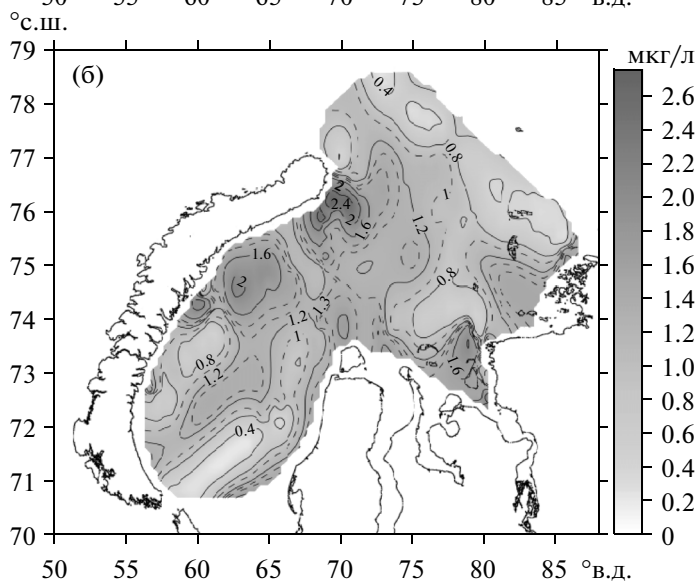
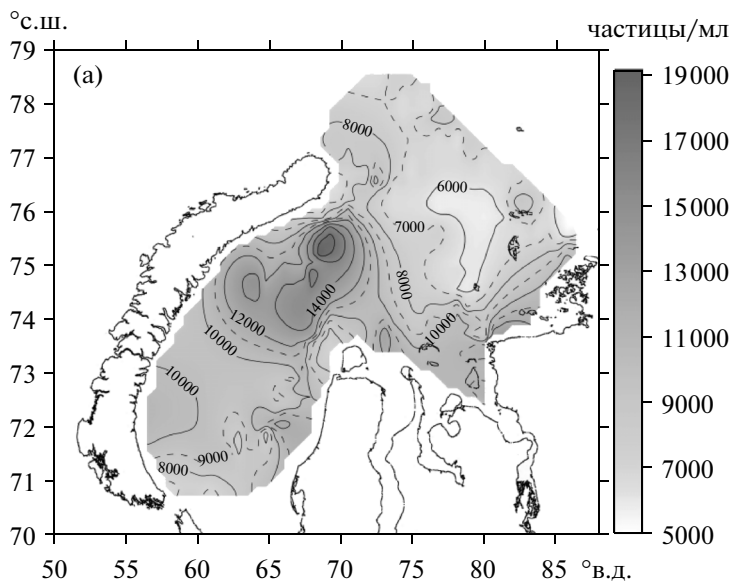


Рис. 4. Распределения концентраций: (а) — общей взвеси, (б) — хлорофилла и (в) — растворенных органических веществ на поверхности Карского моря в сентябре–октябре 2011 г. по данным зондирований ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром.

ро и изменения во времени параметров этих типов можно было не учитывать. Таким образом, естественно возникает важный вопрос о характерных временных масштабах изменчивости верхнего слоя Карского моря вообще и линз (“плюмов”) опреснения речным стоком в частности. Выполненные натурные наблюдения не дают возможности ответить на этот вопрос, так же как и спутниковые данные (ввиду почти постоянного в период рейса присутствия плотной облачности — доступны анализу лишь несколько спутниковых изображений за интересующий нас период, хотя бы частично свободных от облаков). Поэтому в следующем разделе статьи мы используем численную модель, разработанную для описания движения линзы вод, опресненных обско-енисейским стоком, в условиях ветрового воздействия, наблюдавшегося в августе–октябре 2011 г.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОД, ОПРЕСНЕННЫХ РЕЧНЫМ СТОКОМ

Мы используем здесь специальную численную модель распространения речного стока. Модель, получившая имя STRIPE (“Surface-Trapped River Plume Evolution”), первоначально была разработана для исследования поведения плюмов небольших рек российского побережья Черного моря. Однако впоследствии оказалось, что приме-

ненный подход может быть реализован и в более крупных пространственных масштабах. Ниже будет дано лишь сокращенное описание модели и особенностей ее адаптации для Карского моря. Полная информация о модели, а также ее валидации содержится в нашей статье [10].

Описание модели. Модель основана на лагранжевом подходе — она воспроизводит движение отдельных “частиц” речного стока под действием приложенных к ним гидродинамических сил. Каждая из таких частиц считается однородным столбом воды, простирающимся по вертикали от поверхности до границы между речным плюмом и морской водой. Частицы испускаются из речных устьев через определенные промежутки времени. Им приписывается начальная скорость, причем ее модулю и направлению позволено флуктуировать вокруг заданного среднего значения (которое полагается пропорциональным мощности речного стока) в соответствии с равномерным вероятностным распределением. Число частиц, выпускаемых за единицу времени, также пропорционально объему стока. На каждом шаге интегрирования модели поля поверхностных солёности и скорости могут быть построены посредством интерполяции соответствующих значений для отдельных частиц на регулярную сетку.

Уравнения движения для отдельной частицы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} a_x^{i+1} &= fV^i + \frac{\tau_x^i}{\rho^i h^i} - \frac{\mu_v^i u^i - u_{\text{sea}}^i}{h^i} + \frac{\mu_h}{h^i} \left(\frac{u_{x+\Delta x, y}^i + u_{x-\Delta x, y}^i - 2u^i}{\Delta x} + \right. \\ &\left. + \frac{u_{x, y+\Delta y}^i + u_{x, y-\Delta y}^i - 2u^i}{\Delta y} \right) - g\aleph \frac{h_{x+\Delta x, y}^i - h_{x-\Delta x, y}^i}{\Delta x}, \\ a_y^{i+1} &= -fu^i + \frac{\tau_y^i}{\rho^i h^i} - \frac{\mu_v^i V^i - v_{\text{sea}}^i}{h^i} + \frac{\mu_h}{h^i} \left(\frac{v_{x+\Delta x, y}^i + v_{x-\Delta x, y}^i - 2v^i}{\Delta x} + \right. \\ &\left. + \frac{v_{x, y+\Delta y}^i + v_{x, y-\Delta y}^i - 2v^i}{\Delta y} \right) - g\aleph \frac{h_{x, y+\Delta y}^i - h_{x, y-\Delta y}^i}{\Delta y}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где верхний индекс нумерует шаг интегрирования модели; u , v , a_x и a_y — соответственно зональные и меридиональные компоненты скорости и ускорения частицы; $(u_{x, y}, v_{x, y})$ — компоненты скорости, интерполированные на узел сетки с координатами (x, y) ; Δx и Δy — шаги сетки в зональном и меридиональном направлениях; f — параметр Кориолиса; (τ_x, τ_y) — компоненты напряжения

трения ветра, ρ — плотность воды для данной частицы; h — высота колонны воды в частице, интерпретируемая как толщина плюма; $h_{x, y}$ — толщина плюма, интерполированная на узел сетки с координатами (x, y) ; μ_h и μ_v — коэффициенты вертикального и горизонтального турбулентного трения, $(u_{\text{sea}}, v_{\text{sea}})$ — зональная и меридиональная компоненты скорости течения под плюмом, g —

ускорение свободного падения, а \aleph – безразмерный масштабирующий коэффициент. В этих уравнениях первый член в правой части соответствует ускорению силы Кориолиса, второй – силе, приложенной к частице со стороны ветра, третий и четвертый – вертикальному и горизонтальному трению соответственно, а последний член – ускорению, связанному с градиентом давления.

В целях учета горизонтального турбулентного перемешивания мелкого масштаба детерминированные уравнения (2) дополнены схемой случайных блужданий:

$$\left. \begin{aligned} x^{i+1} &= x^i + u^{i+1} \Delta t - \frac{a_x^{i+1} \Delta t^2}{2} + \sqrt{2D_h^i \Delta t} \eta_x, \\ y^{i+1} &= y^i + v^{i+1} \Delta t - \frac{a_y^{i+1} \Delta t^2}{2} + \sqrt{2D_h^i \Delta t} \eta_y, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где (x, y) – координаты частицы, Δt – шаг по времени, D_h – коэффициент горизонтальной диффузии, а η_x и η_y – независимые нормально распределенные случайные переменные, реализуемые в модели с помощью генератора случайных чисел. Временная эволюция плотности ρ и солёности воды S для отдельной частицы задается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} S^{i+1} &= S^i + \frac{D_v^i (S_{\text{sea}} - S^i)}{h_\tau h^i} \Delta t, \\ \rho^{i+1} &= \rho^i + \frac{D_v^i (\rho_{\text{sea}} - \rho^i)}{h_\tau h^i} \Delta t, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где ρ_{sea} и S_{sea} – плотность и солёность морской воды под плюмом соответственно, h_τ – вертикальный масштаб турбулентности. Коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии, используемые в приведенных выше уравнениях, рассчитывались по формулам:

$$\begin{aligned} D_h^i &= \xi_h \Delta x \Delta y \times \\ &\times \left[\left(\frac{u_{x+\Delta x, y}^i - u_{x-\Delta x, y}^i}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{v_{x, y+\Delta y}^i - v_{x, y-\Delta y}^i}{\Delta y} \right)^2 \right] + \\ &\times \left[\frac{1}{2} \left(\frac{v_{x+\Delta x, y}^i - v_{x-\Delta x, y}^i}{\Delta x} + \frac{u_{x, y+\Delta y}^i - u_{x, y-\Delta y}^i}{\Delta y} \right)^2 \right], \quad (5) \\ \frac{D_v^i}{h_\tau} &= \xi_v (1 - \min(1, Ri^i)^2)^3, \quad (6) \end{aligned}$$

где ξ_h и ξ_v – масштабирующие коэффициенты, $Ri^i = \frac{N^i}{S^i}$ – число Ричардсона, $N^i = \sqrt{\frac{g(\rho_{\text{sea}} - \rho^i)}{\rho^i h_i}}$ – частота плавучести, $S^i = \frac{\sqrt{(u^i - u_{\text{sea}}^i)^2 + (v^i - v_{\text{sea}}^i)^2}}{h^i}$ – вертикальный сдвиг скорости. Уравнение (5) представляет собой хорошо известную формулу Смагоринского [12], а формула (6) заимствована

из работы [8]. В качестве граничного условия используется следующее: если частица достигает берега, нормальная поперечная компонента ее скорости обнуляется, в то время как тангенциальная остается без изменений.

В рамках данной работы модель STRIPE была адаптирована для моделирования крупномасштабных процессов распространения стока Оби и Енисея в Карском море. Для упрощения было решено пренебречь деталями движения опресненных вод в пределах Обской и Тазовской губ, а также Енисейского залива. В связи с этим, модельные источники материкового стока были расположены на выходе из Обской губы и Енисейского залива. В качестве входных данных по ветру использовались поля реанализа NCAR/NCEP для района исследования с 6-часовым временным и 1-градусным пространственным разрешением [7]. Мощностям стока рек Обь и Енисей в модели приписывались фиксированные значения, соответствующие многолетним средним для сентября [5]. Стоки рек Таз, Пясины и других более мелких рек, впадающих в Карское море, не учитывались.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассчитывалось распространение пресноводного стока Оби и Енисея в период с 18 августа по 5 октября 2011 г. с дискретностью в 12 минут. Исходная конфигурация речного плюма была задана условно на основе спутниковой карты распределения хлорофилла от 18 августа. Результаты моделирования сравнивались с несколькими имеющимися спутниковыми картами распределений хлорофилла и взвеси, являющихся неплохими маркерами речного стока (21 августа, 4 и 8 сентября 2011 г.), а также с натурными данными, полученными в ходе рейса.

Пример такого сравнения приведен на рис. 5. Он соответствует 23 сентября 2011 г., когда, выполняя разрез от островов Арктического института до побережья полуострова Таймыр, судно вошло из морских вод (солёность около 28 епс) в зону опреснения материковым стоком (солёность 17–18 епс). С точки зрения модельных карт солёности, курс судна в этот момент также пересек границу плюма, распространявшегося вдоль берега полуострова Таймыр. Как модельная солёность в области опреснения, так и положение внешней границы плюма в данном случае практически совпали с данными натурных измерений.

На рис. 6 показаны также смоделированные положения обско-енисейского плюма на 21 августа, 8 сентября, 20 сентября и 4 октября 2011 г. На две первые карты схематически нанесены “фактические” положения плюма, оцененные по спутниковым изображениям распределений хлорофилла и взвеси. Эти и другие выполненные сравнения говорят о том, что модель в целом вер-

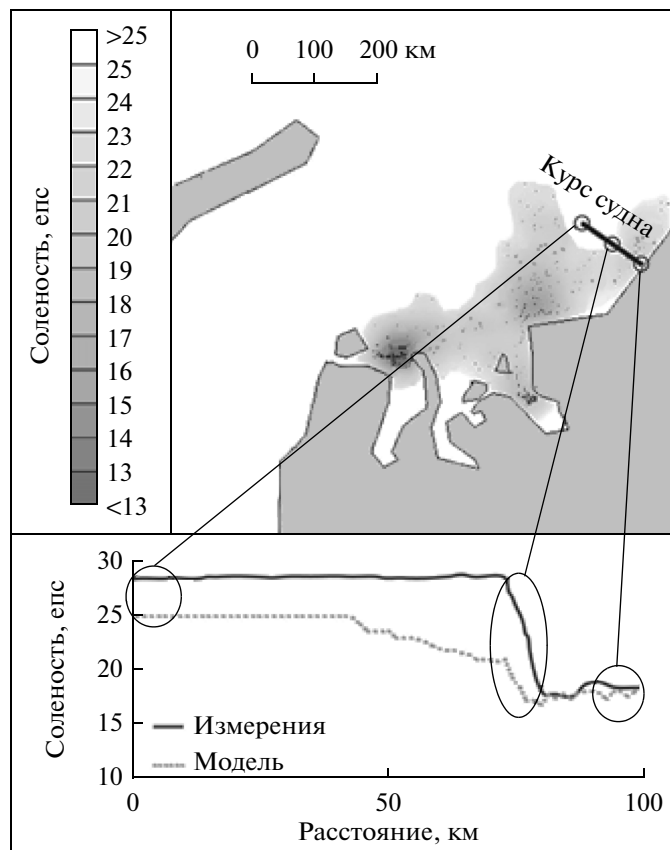


Рис. 5. Вверху: смоделированное расположение области опреснения материковым стоком на 23.09. 2011 г. (штриховка) и траектория судна. Внизу: распределения поверхностной солености вдоль трека судна по результатам измерений (сплошная линия) и моделирования (пунктир).

но отражает расположение плюма, хотя и не может воспроизвести многие детали.

Результаты моделирования дают возможность судить о временной изменчивости области опреснения. Согласно этим расчетам, во второй половине августа материковые воды под воздействием сильных северо-восточных и северных ветров переносились в западном направлении из приустьевых областей к архипелагу Новая Земля. В это время большие площади моря между полуостровом Ямал и восточным побережьем острова Новая Земля находились в зоне распространения обско-енисейского плюма (рис. 6а).

В первой половине сентября преобладали умеренные до сильного юго-восточные ветры, “прижимавшие” плюм к восточному побережью острова Новая Земля, где он приобрел вид изолированной линзы. В то же время материковый сток сформировал “новый” плюм значительных размеров к северу от речных устьев. К середине сентября изолированная часть плюма, находившаяся между полуостровом Ямал и о. Новая Земля, окончательно диссипировала (рис. 6в). К концу сентября—началу октября в условиях преобладания юго-западных и западных ветров плюм сме-

стился в восточном направлении и приблизился к берегу Таймыра (рис. 6г).

Таким образом, если верить приведенным результатам моделирования, то оказывается, что в условиях интенсивного ветрового воздействия временные масштабы, на которых происходят существенные изменения локализации области опреснения материковым стоком, являются сравнимыми или меньшими времени выполнения экспедиционных измерений. К сожалению, это в известной степени ставит под сомнение возможность признания последних — а, следовательно, и распределений, приведенных в первой части статьи, — квазисиноптическими.

ВЫВОДЫ

Структура термохалинных и био-оптических полей поверхностного слоя Карского моря в сентябре 2011 г. определялась взаимодействием обско-енисейского материкового стока, поверхностных вод арктического бассейна из района желоба Св. Анны и вод Баренцева моря, поступающих через пролив Карские Ворота. Пропорции содержания этих трех основных водных типов в целом по акватории моря (точнее по ее части, охваченной

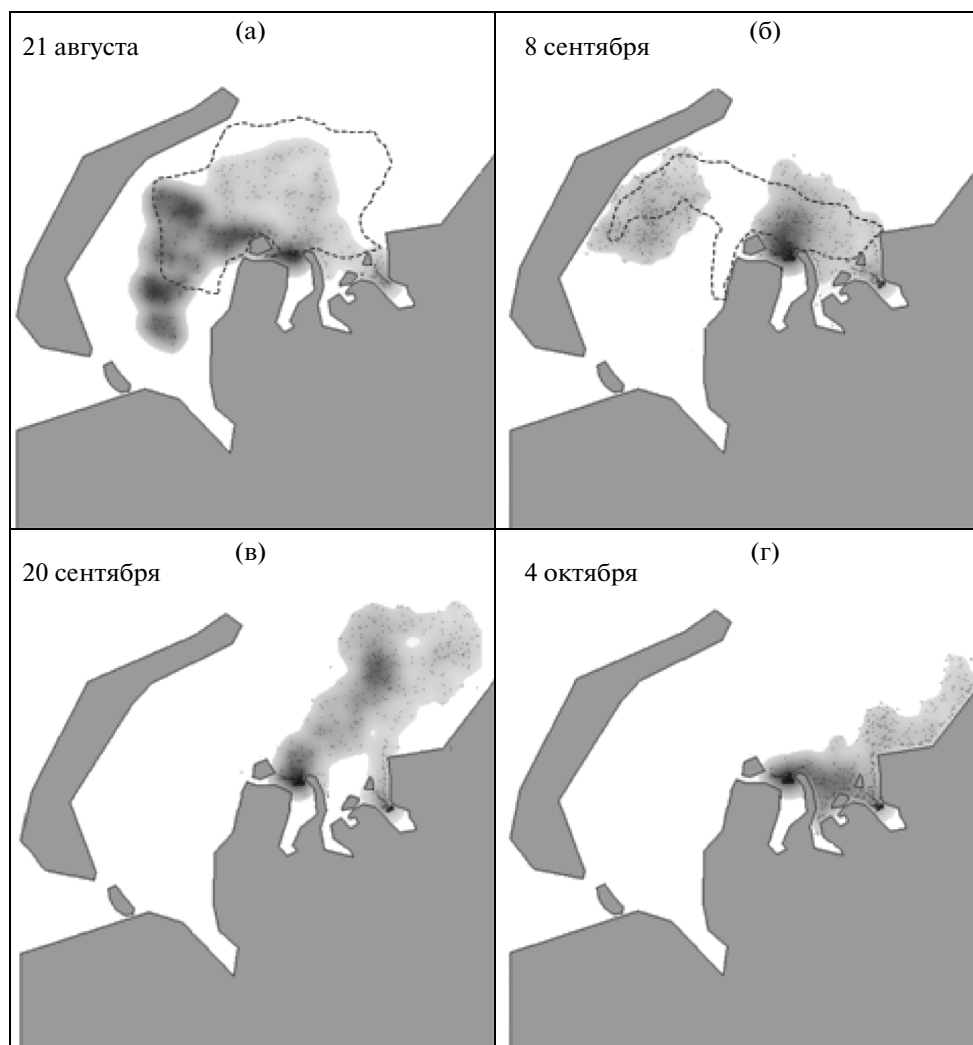


Рис. 6. Смоделированное расположение области опреснения материковым стоком на 21.08.2011 г. (а), 08.09.2011 г. (б), 20.09.2011 г. (в) и 4.10.2011 г. (г). На две первые карты схематически нанесены “фактические” положения плюма, оцененные по спутниковым изображениям распределений хлорофилла и взвеси.

экспедиционными измерениями) составляли приблизительно $34 : 59 : 7$. Практически все разнообразие водных типов в поверхностном слое моря удовлетворительно описывалось линейным смещением этих базовых водных масс — таким образом, динамика поверхностного слоя являлась в основном “двумерной”. Подобная же картина наблюдалась и в экспедиции 2007 г. [3].

Линии соприкосновения ядер основных поверхностных водных масс образуют фронтальные зоны, играющие огромную роль в функционировании многих систем Карского моря и формировании его биопродуктивности (см. статью Флинта и др. в этом выпуске). Таких зон по данным съемки 2011 г. мы выделили пять.

T, S -анализ дает сильные указания на то, что в период исследования главная роль в формировании вод материкового происхождения в Карском море принадлежала стоку Енисея. Присутствие

стока Оби прослеживалось также отчетливо, но в объеме, примерно на порядок меньшем енисейского, и было более локализованным в пространстве. Впрочем, как неполнота использованных данных (например, отсутствие прямых измерений характеристик стока Оби), так и некоторые принципиальные ограничения метода (например, предположение о постоянстве термохалинного состояния базисных водных типов) не позволяют считать последние утверждения доказанными и заставляют относиться к ним как к более или менее аргументированной гипотезе.

Установлено, что положение плюма вод, опресненных материковым стоком, а также его площадные и термохалинные характеристики обладают значительной межгодовой изменчивостью. Положение и выраженность плюма, зафиксированные измерениями в экспедиции 2011 г., существенно отличались от наблюдавшихся в

2007 г. Если в сентябре 2007 г. зона максимального опреснения занимала изолированную область у побережья центральной части Новой Земли, то в сентябре 2011 г. она образовывала непрерывную полосу к северу и востоку от речных устьев, периферийно достигающую северо-западной оконечности острова, но наиболее ярко выраженную у побережья полуострова Таймыр. Абсолютные значения солёности в плюме в 2011 г. превышали значения, характерные для 2007 г., на 1–3 епс.

По нашему мнению, изменчивость обско-енисейского плюма определяется, в первую очередь, ветровыми воздействиями. Для исследования этого механизма была разработана и применена к условиям Карского моря в августе–октябре 2011 г. специализированная численная модель. Модельные эксперименты, использовавшие реальные данные по ветру (поля реанализа NCAR/NCEP), позволили предложить сценарий эволюции плюма в период исследования, который не вступает в явные противоречия с фрагментарными натурными данными за конкретные отрезки времени и немногочисленными спутниковыми изображениями. Согласно этому сценарию, в начале сентября 2011 г. область опреснения имела вид, близкий к ситуации сентября 2007 г., однако уже в ходе экспедиции сместилась на восток под влиянием юго-западных ветров и частично диссипировала. Это говорит о том, что временные масштабы изменчивости термохалинных и био-оптических полей поверхностного слоя Карского моря, по крайней мере в области влияния материкового стока, могут оказаться меньшими, чем принято думать, и экспедиционную съёмку акватории моря продолжительностью в 3–4 недели едва ли можно считать квазисиноптической.

Авторы благодарят Д.М. Соловьева (МГИ, Севастополь) за предоставленные спутниковые изображения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках

тройственного соглашения № 14.1325.31.0026, ГК 2042 и ГК 8338, РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-00626 а, а также проекта CLIMSEAS в рамках международного гранта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А., Завьялов П.О., Пелевин В.В. Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // Геоэкология. 2008. № 4. С. 301–310.
2. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. Природа и хозяйство. М.: Мысль, 1965. 350 с.
3. 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.
4. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
5. Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
6. Пелевин В.Н., Абрамов О.И., Карлсен Г.Г. и др. Лазерное зондирование поверхностных вод Атлантики и морей, омывающих Европу // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 704–709.
7. Kistler R., Kalnay E., Collins W. et al. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2001. V. 82. P. 247–268.
8. Large W.G., McWilliams J.C., Doney S.C. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization // Reviews of Geophysics. 1994. V. 32. P. 363–403.
9. Osadchiv A.A., Zavialov P.O. Lagrangian model of surface-advected river plume // Continental Shelf Res. 2013. P. 58. P. 96–106.
10. Pavlov V.K., Pfirman S.L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // Deep-Sea Res (II). 1995. V. 42. № 6. P. 1369–1390.
11. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equation. 1. The basic experiment // Monthly Weather Review. 1963. V. 91. P. 99–165.

The Structure of Thermohaline and Bio-Optical Fields in the Upper Layer of the Kara Sea in September, 2011

P. O. Zavialov, A. S. Izhitskiy, A. A. Osadchiv, V. V. Pelevin, A. B. Grabovskiy

This paper presents the results of data measurements of thermohaline and bio-optical fields in the upper layer of the Kara Sea which were conducted in September, 2011 during the 59th cruise of the R/V “Academician Mstislav Keldysh”. The measurements were performed during the ship motion using a pump-through CTD system (temperature and salinity) and ultraviolet fluorescent lidar (concentrations of chlorophyll, total suspended matter and dissolved organic matter) that provided high space resolution (about 10–100 m) along the expedition track. The detailed sea distribution maps of the mentioned quantities are presented, the frontal zones are detected, the *T,S*-diagrams for the upper water layer are drawn, and the basic water types are identified. It is shown that Ob and Enisey freshwater discharge is one of the main factors that influence the formation of the properties of the upper layer. At the second part of the article the numerical model of dynamics of continental discharge at the Kara Sea is described. The model experiments were held under the real wind conditions of August–September, 2011 (NCAR/NCEP reanalysis), the model validation was performed basing on the *in situ* data collected during the survey.