

О НОВОМ ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

канд. физ.-мат. наук М.Ю.КУЛАКОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: mod@aari.ru

Анализируются методы реконструкции циркуляции вод арктических морей на примере Карского моря. Предлагается оригинальный метод, основанный на использовании новой динамико-термодинамической модели совместной циркуляции вод и льдов (AARI-IOCM). Циркуляция вод всего Северного Ледовитого океана рассчитывалась в прогностическом режиме за период с 2000 по 2010 г. Схема циркуляции вод Карского моря получена осреднением течений на его акватории за июнь–сентябрь выбранного десятилетия. Оценен вклад бароклинной и ветровой составляющих течения в циркуляцию моря.

Ключевые слова: циркуляция вод, Карское море, динамико-термодинамическая модель.

Интенсификация освоения шельфа, наблюдающаяся в настоящее время, требует все более детального описания гидрологического режима арктических морей. Одной из важнейших составляющих режима моря является циркуляция его вод. Однако построение схем циркуляции в мелководных арктических морях представляет значительные трудности. Репрезентативных данных инструментальных наблюдений за течениями немного, тем более синхронных, и они не могут служить основой для создания генеральной схемы циркуляции. Авторы предыдущих исследований режима арктических морей привлекали различные методы и косвенные данные для реконструкции схем циркуляции. Не всегда это приводило к достоверным результатам. Постараемся разобраться в этом вопросе на примере Карского моря.

В большинстве опубликованных в открытой печати работ, посвященных режиму Карского моря [Березкин, Ратманов, 1940; Добровольский, Залогин, 1965; Советская Арктика, 1970; Атлас океанов, 1980], приводятся схемы циркуляции его вод, однако методы их получения не указываются. По всей видимости, основой для построения таких схем течений послужили данные немногочисленных инструментальных наблюдений за течениями, данные по дрейфу льда и распределения температуры и солености. Последние, очевидно, обрабатывались динамическим методом, что не совсем правомерно в мелководном море со значительными градиентами рельефа дна.

Согласно всем упомянутым работам, движение воды в Карском море в основном циклоническое, с такими основными течениями, как восточное Новоземельское течение, Ямальское течение и стоковое Обь-Енисейское течение. На рис. 1 [Panteleev et al., 2007] схематично представлены основные особенности циркуляции вод Карского моря, отмеченные в цитируемых выше работах.

С началом эры численного моделирования в конце прошлого века были предприняты попытки получить схемы циркуляции вод Карского моря на основании диагностических расчетов. В [Доронин и др., 1991] были рассчитаны трехмерные

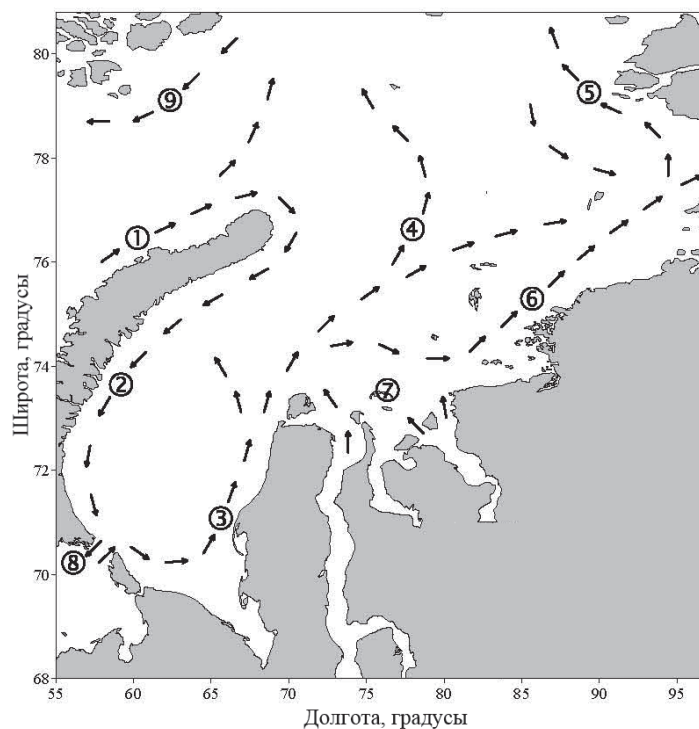


Рис. 1. Схема течений на поверхности Карского моря [Panteleev et al., 2007]:

1 – Западное Новоземельское течение, 2 – Восточное новоземельское течение, 3 – Ямальское течение, 4 – течение Святой Анны, 5 – течение Воронина, 6 – Западное Таймырское течение, 7 – Обь-Енисейское течение, 8 – течение Литке, 9 – течение Персея.

термохалинные течения по данным гидрологических съемок, проведенных в разные годы и в разные сезоны. Получено, что в центральной части моря практически при любом наблюдаемом распределении температуры и солености существует антициклоническое движение со скоростями до 10 см/с (т.е. сравнимыми с ветровыми). В юго-западной и северо-восточной частях моря циркуляция изменчива и говорить о какой-либо схеме течений трудно.

Подобные результаты были получены и в работах [Harms, 1994; Яковлев, 1996; Volkov et al., 2002; Кулаков, 2008]. Во всех упомянутых работах генеральная схема циркуляции вод Карского моря имеет преимущественно антициклонический характер.

В работе [Krosshavn, et al., 1997] приведено наиболее полное обобщение натурных наблюдений за течениями (буйковые станции и бортовые доплеровские профилографы), полученных в 1990-е годы в российско-норвежских экспедициях (рис. 2).

Этот рисунок также демонстрирует, что в большей части моря циркуляция вод имеет ярко выраженный антициклонический характер.

Похожие результаты были получены и в результате лабораторных экспериментов на гидравлической модели Карского моря, построенной в SINTEF, Норвегия [McClimans et al., 2000].

Наибольший интерес представляет реконструкция циркуляции вод Карского моря в летний период, выполненная в работе [Panteleev et al., 2007]. Для решения

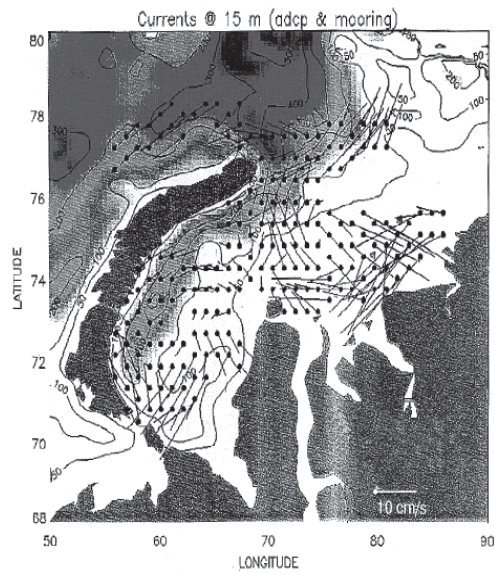


Рис. 2. Циркуляция вод Карского моря на горизонте 15 м, построенная на основании натуральных наблюдений [Krosshavn et al., 1997].

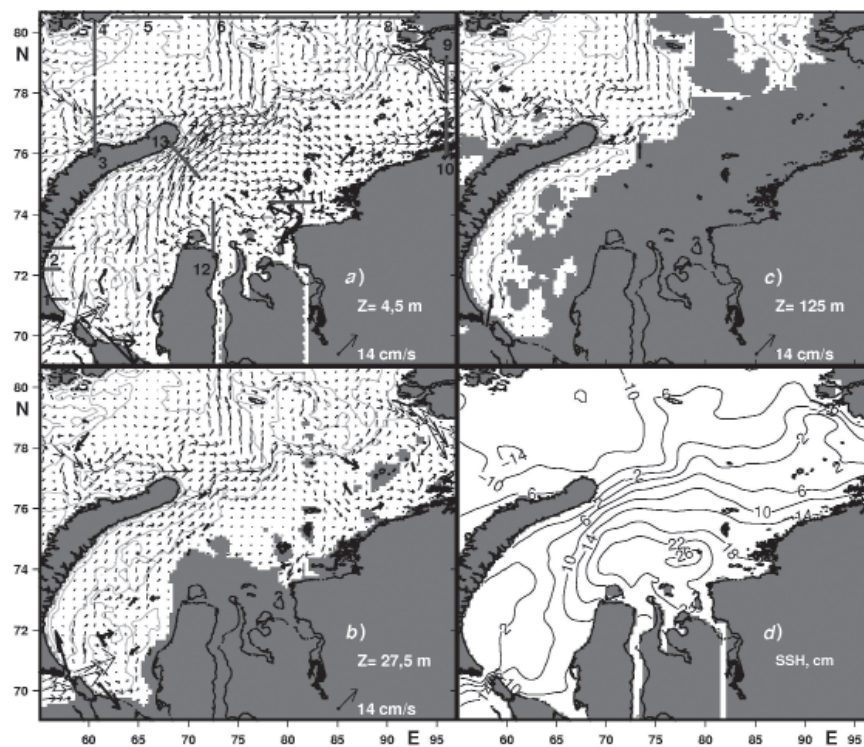


Рис. 3. Реконструкция циркуляции вод Карского моря на различных горизонтах (a, b, c) и уровень моря (d) для летнего периода [Panteleev et al., 2007].

задачи авторы применили метод вариационной ассимиляции данных. Причем в расчет принимались данные по температуре и солености воды, доступные наблюдения за течениями на буйковых станциях, а также результаты моделирования на трехмерной модели циркуляции вод при среднеклиматических форсингах. Результаты реконструкции представлены на рис. 3. На сегодняшний день это наиболее достоверная схема циркуляции вод Карского моря в летний период, выполненная на основе самых современных технологий. К одному из недостатков подхода можно отнести использование при расчетах среднего за год расхода рек, а не среднемесячных значений, что привело к занижению скоростей течений в эстуариях Оби и Енисея и приустьевой области моря.

В сценариях всех численных экспериментов, поставленных для воспроизведения циркуляции вод Карского моря, есть уязвимые места. Все расчеты производились на основании несинхронизированных полей температуры и солености. Ветровую составляющую или не учитывали совсем [Доронин и др., 1991], или для ее учета использовали осредненные поля давления или ветра [Harms, 1994; Яковлев, 1996; Panteleev et al., 2007; Кулаков, 2008], что занижает ветровую составляющую течения, поскольку тангенциальное напряжение трения ветра на поверхности воды пропорционально квадрату скорости ветра. Сеточные области аппроксимировали только акваторию Карского моря, что вызывало проблемы с граничными условиями. Еще в работе [Доронин и др., 1991] авторы пришли к выводу, что для корректных расчетов необходима термогидродинамическая модель совместной циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана.

В данной работе предлагается сценарий, исключающий все перечисленные выше недостатки. Это стало возможным при использовании новой модели – AARI–IOCM [Кулаков и др. 2012], которая аппроксимирует всю акваторию Северного Ледовитого океана с пространственным разрешением менее 14 км. Модель в прогностическом режиме позволяет производить расчеты циркуляции вод за длительный промежуток времени (в нашем случае это период с 2000 по 2010 г.), учитывая все особенности синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости форсингов. В качестве последних использовались ежедневные 4-срочные данные по приземному атмосферному давлению и температуре воздуха на высоте 2 м из NCEP/NCAR Reanalysis, ежесуточные климатические данные по облачности, осадкам, влажности и приходящей солнечной радиации, среднемесячные климатические расходы основных рек (Обь, Енисей, Пяси́на, Пур, Таз). Для начального приближения температуры и солености воды были использованы данные WORLD OCEAN DATABASE 2005. Схема циркуляции вод Карского моря в летний период определялась осреднением результатов расчетов течений за период с июня по сентябрь каждого года.

Полученная в результате расчетов схема циркуляции поверхностного слоя вод Карского моря для летнего периода представлена на рис. 4. Для улучшения восприятия рисунков векторы течения приведены с разрядкой через один узел.

Главная особенность циркуляции вод Карского моря летом, отчетливо прослеживающаяся на рисунке, это ее общий антициклонический характер. Обильный пресноводный сток Оби и Енисея формирует в приустьевой области положительную аномалию уровня. Это приводит к тому, что течение из Обской губы частично распространяется не на восток, что характерно для речных вод в Северном полушарии, а сначала на запад, по периферии купола распресненных вод. Наиболее сильные

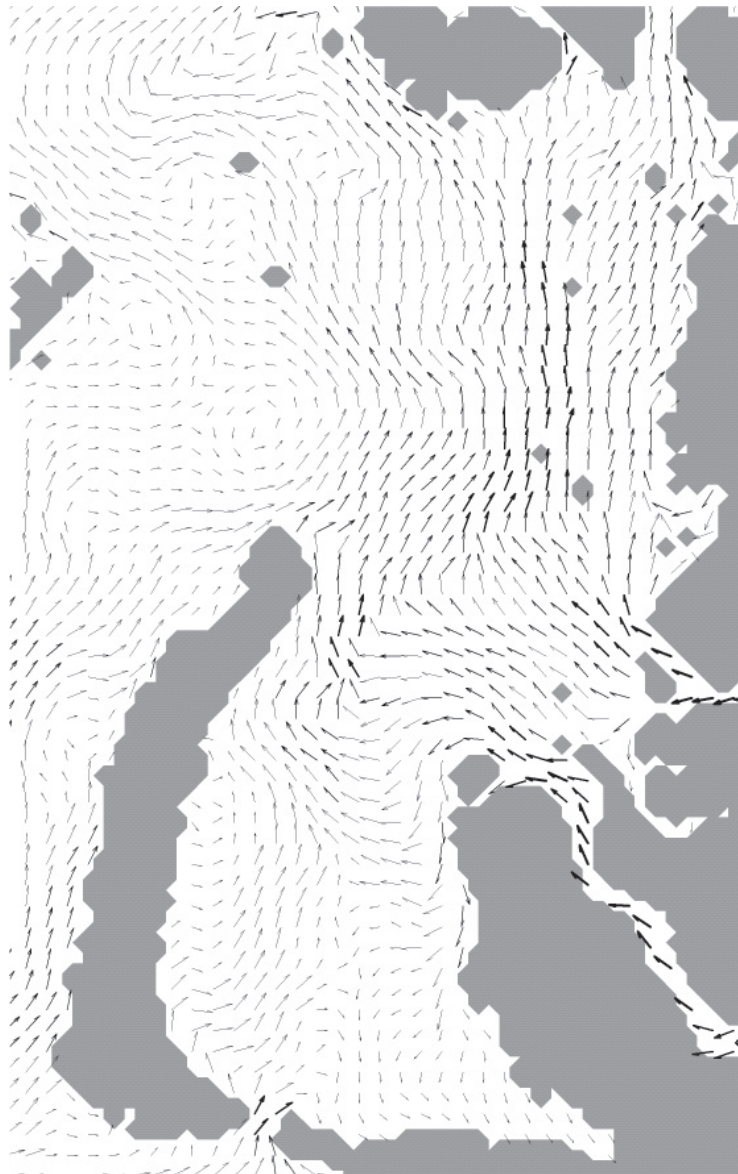


Рис. 4. Рассчитанная циркуляция вод поверхностного слоя Карского моря в летний период.

течения со скоростями, достигающими 20 см/с, приурочены к фронтальной зоне, совпадающей с изобатой 50 м, и похоже, что такая глубина достаточна для развития квазигеострофических течений. Действительно, течения в этой фронтальной зоне направлены по касательной к градиенту солёности. Такое направление течений не позволяет переносить речные воды по нормали к фронтальной зоне, и результаты расчетов демонстрируют, что в определенный момент наступает некоторое динамическое равновесие: форма и размеры ареала распресненных вод перестают значительно изменяться, а излишек речных вод вытекает через восточную границу моря.

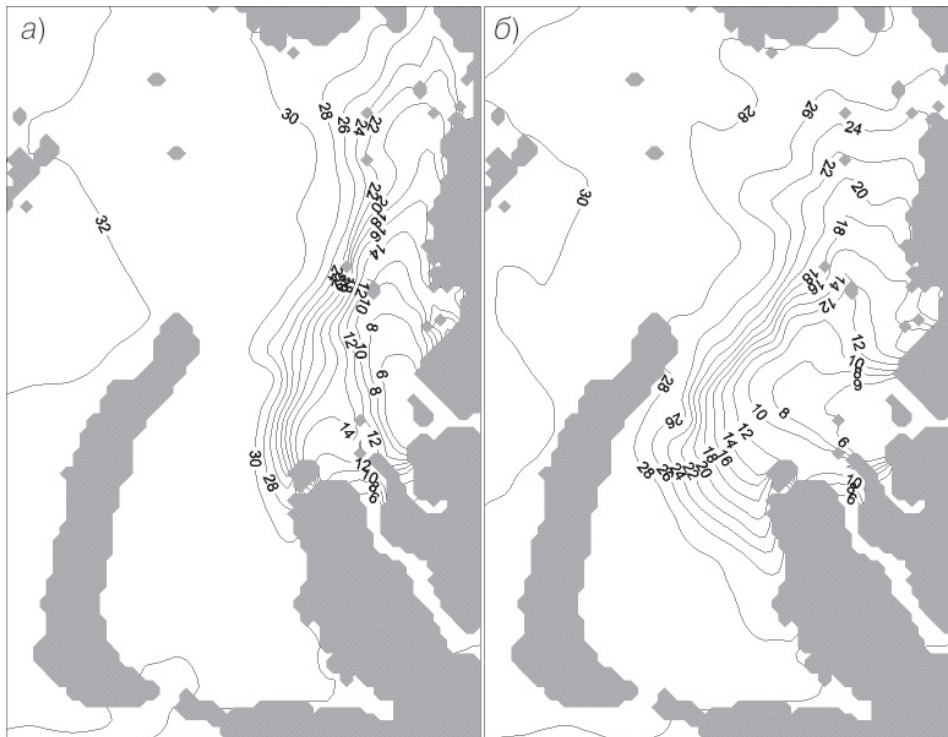


Рис. 5. Распределение солёности вод поверхностного слоя Карского моря 1 августа 2003 (а) и 2007 (б) гг.

В центральной части моря течение разделяется на две ветви. Одна уходит в Центральный Арктический бассейн вдоль желобов Святой Анны и Воронина. Другая ветвь (Обь-Енисейское течение) через проливы Вилькицкого и Шокальского уходит в море Лаптевых.

Баренцевоморские воды, поступающие через пролив Карские Ворота, переносятся по акватории моря вдоль восточного склона Новоземельской впадины. Большая часть этой водной массы транзитом через Карское море уходит в Центральный Арктический бассейн вдоль желоба Святой Анны.

Проведенный анализ показал, что характерные черты циркуляции вод Карского моря в летний период определяются в основном распределением плотности воды и рельефом дна. Это объясняется основной особенностью Карского моря, а именно, огромным речным стоком. Однако ветер тоже играет существенную роль в формировании циркуляции. Для выявления его влияния приведем рисунок 5, на котором представлено сопоставление распределений солёности вод Карского моря на 1 августа 2003 и 2007 гг. В поставленном нами эксперименте только ветер и температура воздуха меняются от года к году. Влиянием температуры на циркуляцию вод, которое осуществляется через ледовые условия, пренебрежем.

Анализ рис. 5 показывает, что ветер может значительно изменить схему циркуляции. В 2003 г. преобладали ветры западного направления, которые «поджали» к берегу ареал распресненных вод и создали дополнительное повышение уровня моря вдоль побережья. При этих условиях существенно возрастает северо-восточная

вдольбереговая составляющая течения. Скорость течения увеличивается за счет обострения градиентов плотности и дополнительного уклона уровня моря, и распределенная вода вдоль берега переносится к проливу Вилькицкого и через него в море Лаптевых. Летом 2007 г. преобладали сгонные ветры, которые увеличили северную составляющую течения и несколько размыли фронтальную зону. При этом скорости течений ослабли.

Результаты расчетов показывают, что на поверхности Карского моря мгновенные скорости течения могут превышать 100 см/с, а в проливе Карские Ворота достигать 150 см/с. Причем максимальные течения приурочены к фронтальной зоне между речными и морскими водами, где дрейфовые течения складываются с максимальными бароклинными течениями. В нижележащих слоях скорости течения существенно меньше и только в районах больших градиентов глубины могут достигать 20 см/с, причем их направление может отличаться от направления поверхностного течения на 180°. С приближением ко дну циркуляция разбивается на ряд вихревых структур в соответствии с особенностями рельефа дна. Скорости течения у дна в Новоземельской впадине не превышают 5 см/с. И только в желобе Святой Анны наблюдается устойчивый вынос вод вдоль восточного склона со скоростями до 10 см/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в работе исследование циркуляции вод Карского моря показало, что применение совместной модели циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана – AARI–IOCM для изучения режима арктических морей предоставляет большие возможности исследователям. Модель позволяет избежать трудностей в задании граничных условий, поскольку аппроксимирует весь Северный Ледовитый океан. В процессе расчетов происходит синхронизация полей температуры и солености вод и их согласование с течениями. Предоставляется возможность непрерывного моделирования на достаточно продолжительный период для получения статистически обоснованных оценок параметров режима моря. Модель не ограничивается расчетом только течений, но также позволяет определять характеристики изменчивости температуры и солености вод, уровня моря, характеристик ледового покрова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по Госконтрактам № 16.515.11.5074 и № 16.420.12.0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Березкин В.с., Ратманов Г.* Генеральная схема течений Северного Ледовитого океана и сопредельных морей. Л.: ГУНИО, 1940. 10 с.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: Мысль, 1965. 351 с.
- Доронин Н.Ю., Кузнецов В.Л., Прошутинский А.Ю.* К вопросу о циркуляции вод Карского моря // Тр. ААНИИ. 1991. Т. 424. С. 34–41.
- Кулаков М.Ю.* Распространение речных вод в Карском море // Тр. ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 131–148.
- Кулаков М.Ю., Макитас А.П., Шутилин С.В.* AARI–IOCM – совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 5–17.

Советская Арктика. моря и острова Северного Ледовитого океана. М.: Наука, 1970. 526 с.

Яковлев Н.Г. Численная модель и предварительные результаты расчетов по воспроизведению летней циркуляции вод Карского моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. № 5. С. 714–723.

Harms I.H. Numerische modellstudie zur winterlichen Wassermassenformation in der Barentssee. Zentrum für Meeres- und Klimaforschung der Universität Hamburg. Institute für Meereskunde, 1994. Reihe B, Ozeanographie. 1994. № 7. 97 s.

Krosshavn M., Carroll J., Grennes O., Johnson D., King S., Johnsen A., Bjornstad H., Engoy T. Environmental pollution and oceanography in the Arctic–EPOCA95. Tech. Rep. FFI/RAPPORT-97/02129. Oslo: Norwegian Defense Research Establishment, 1997. 46 p.

McClimans T.A., Jonson D.R., Krosshavn M., King E.E., Carrol J., Grennes O. Transport processes in the Kara Sea // J. of Geoph. Res. 2000. Vol. 105. C6. P. 14,121–14,139.

Panteleev G., Proshutinsky A., Kulakov M., Nechaev D., Maslowski W. Investigation of the summer Kara Sea circulation employing a variational data assimilation technique // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. C04S15. P. 1135–1172.

Volkov V.A., Johannessen O.M., Boradachev V.E., Voinov G.N., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kouraev A.V. Polar Seas Oceanography // Integrated Case Study of the Kara Sea. New York: Springer, 2002. 450 p.

M.YU.KULAKOV

ABOUT THE NEW APPROACH TO MODELLING OF WATER CIRCULATION OF THE ARCTIC SEAS

Methods of reconstruction of circulation of waters of the Arctic seas are analyzed by the example of Kara sea. The original method based on use of new coupled model of waters and ice circulation (AARI-IOCM) is offered. Circulation of waters of all Arctic ocean is simulated for the period of 2000 on 2010. The circulation pattern obtained by averaging of currents for June - September of chosen decade is described. The contribution of buoyancy-forced and wind-driven components of current in circulation of the sea is estimated.

Keywords: water circulation, Kara Sea, dynamic-thermodynamic model.