

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.465.53

Ф.К. Тузов^{1,2}

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАСКАДИНГА У ПОБЕРЕЖЬЯ АРХИПЕЛАГА СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ

В статье рассмотрен вариант обработки модельных данных, при котором возможно выделить из массива данных области, где наблюдается каскадинг – придонное гравитационное течение, которое переносит более плотную воду, образовавшуюся в прибрежных и шельфовых районах морей и океанов, вдоль и поперек уклонов рельефа дна. В качестве исходного массива данных используется модельный расчет NEMO за 1986–2010 гг. с временным интервалом 5 суток и пространственным разрешением $1/10^\circ$ для района архипелага Северная Земля. Выбор данного района обусловлен наличием гидрологических данных, свидетельствующих о каскадинге во время проведения экспедиций в 1984 и 1985 гг.

Показано, что разработанный алгоритм определяет области возникновения каскадинга. С помощью него было выявлено три случая каскадинга в декабре 1991, 1993 гг. и декабре 2004 – январе 2005 гг. в районе острова Малый Таймыр. Разобран случай прохождения каскадинга в декабре 1991 г. В результате сравнения плотности вод на придонных и вышележащих горизонтах ряда соседних узлов сетки в течение четырех последовательных пятидневных периодов (12–31 декабря) выявлена сменяемость устойчивой плотностной стратификации вод на характерную для каскадинга стратификацию. В узлах с меньшей глубиной (16 м) формируются плотные воды, стекающие по склону в течение третьего пятидневного периода на глубину до 66 м. Повышение плотности вод происходит вследствие осолонения при льдообразовании на мелководье у острова Малый Таймыр. Таким образом, перепад глубин при каскадинге составил 50 м. Во время четвертого пятидневного периода после каскадинга плотностная структура снова становится устойчивой. Таким образом, установлено, что пятидневного временного интервала используемого массива модельных данных достаточно для разрешения процесса каскадинга.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, море Лаптевых, математическое моделирование, массивы дискретных данных, модель NEMO

Введение. Каскадинг – это процесс возникновения вод с отрицательной плавучестью на мелководных участках акватории с последующим стеканием в виде вдольсклоновых гравитационных течений на большую глубину (рис. 1). Несмотря на глобальное распространение, каскадинг является локальным процессом с короткой продолжительностью по времени (дни или недели). Стекая в генеральном направлении понижений рельефа, вода с большей плотностью постепенно смешивается с окружающими водами, обеспечивая передачу свойств (тепла, соли, растворенного кислорода и др.) из поверхностной в глубинную структурную зону. Благодаря этому, каскадинг, наряду с глубокой конвекцией [Marshall, Shott, 1999], в значительной степени способствует обновлению промежуточных и глубинных вод Мирового океана [Shapiro et al., 2003]. В современных условиях сократившегося ледяного покрова в Северном Ледовитом океане предполагаемое усиление каскадинга с арктических шельфов может оказать стабилизирующее воздействие на глобальную термохалинную циркуляцию, контролирующую меридиональный океанский поток тепла от экватора к полюсу [Иванов, 2011].

Движущей силой каскадинга выступает горизонтальный градиент давления между более плотными (холодными и/или солеными) водами в очаге формирования и окружающей жидкостью. Градиент давления возникает вследствие: 1) «топографического эффекта» [Shapiro et al., 2003]; 2) значительного различия в интенсивности энергообмена между океаном и атмосферой через неоднородную подстилающую поверхность (например, вода–лед, см. рис. 1) [Marquedda et al., 2004]; 3) адвективного перераспределения тепла и соли между мелководной и глубоководной зонами [Ivanov, Shapiro, 2005]. При охлаждении или осолонении (за счет испарения/льдообразования) поверхности моря развивается вертикальная гравитационная конвекция: воды с повышенной плотностью опускаются вниз вследствие гидростатической неустойчивости, а их место занимают нижележащие воды с меньшей плотностью. Если глубина места невелика, а охлаждение/осолонение продолжается достаточно длительное время, возможно формирование практически однородного слоя более плотной воды от поверхности до дна. Наличие такого однородного по глубине столба воды с

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, аспирант; e-mail: fedor-tuz@mail.ru

² ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), науч. с.

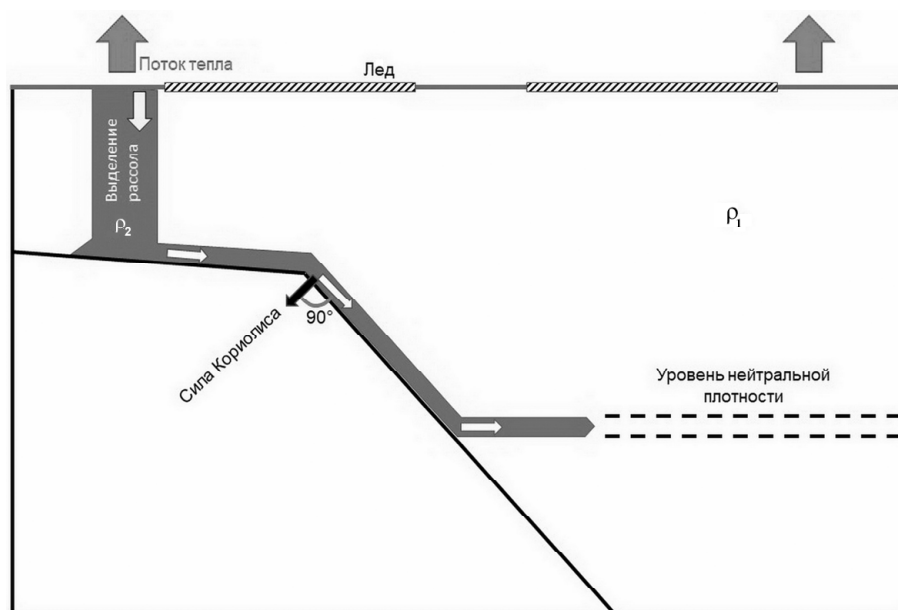


Рис. 1. Схема каскадинга: ρ_1 – плотность воды в глубоководной части акватории; ρ_2 – плотность воды на шельфе акватории; $\rho_1 < \rho_2$ – условие для возникновения каскадинга

Fig. 1. Cascading scheme: ρ_1 – water density under the slope; ρ_2 – water density on the shelf; $\rho_1 < \rho_2$ is the condition for the occurrence of cascading

повышенной плотностью в мелководной зоне указывает на потенциальную возможность развития каскадинга [Ivanov et al., 2004]. Насколько эффективно эта возможность будет реализована зависит от величины положительной аномалии плотности в очаге формирования, особенностей локального рельефа дна и внешних факторов, включающих стратификацию вод в сопредельной глубоководной зоне, атмосферное воздействие и фоновое крупномасштабное поле течений [Chapman, 2000; Gawarkiewicz, 2000]. При благоприятных условиях плотная вода может сохранять свою термохалинную идентичность на расстоянии сотен километров от очага формирования при движении вдоль континентального склона и способна опуститься до его основания. В общем случае предельной глубиной проникновения вод с повышенной плотностью является так называемый уровень эквивалентной плотности, на котором плотности опускающейся воды и окружающих ее вод выравниваются [Shapiro et al., 2003]. Характерный пространственный масштаб очагов каскадинга, как правило, не превышает первых десятков километров, а время активной стадии лежит в диапазоне от нескольких дней до нескольких недель [Ivanov et al., 2004]. Кроме того, развитие процесса привязано к холодному сезону и не является регулярным, т. е. не обязательно происходит в одном и том же районе в одно и то же время. Все это усложняет логику изучения каскадинга в натурных условиях и требует применения альтернативных методов, к числу которых в первую очередь относится численное моделирование.

В предлагаемой статье представлен оригинальный метод объективного анализа больших объемов

данных (модельных расчетов, океанского реанализа, натурных измерений), предназначенный для выявления очагов формирования плотной воды на шельфе, картирования траекторий ее стекания вдоль склона и оценки базовых характеристик каскадинга, определенных в [Ivanov et al., 2004]. В рамках данной статьи разработанная методика была протестирована на материалах 30-летнего прогностического расчета на модели NEMO (версия 3.4) для северо-восточного шельфа и континентального склона архипелага Северная Земля в море Лаптевых. Выбор этого района для тестирования разработанной методики обусловлен регистрацией каскадинга во время экспедиций [Головин, 1995] и воспроизведен в модельных экспериментах с различной степенью детализации [Ivanov, Golovin, 2007; Ivanov, Watanabe, 2013; Ivanov et al., 2015].

Материалы и методы исследования. В данной работе была использована модель NEMO (Nucleus of European Modelling of the Ocean) [Madec et al., 2019], адаптированная для арктического региона, с пространственным шагом $1/12^\circ$ и временным интервалом выдачи результатов расчета пять суток. Модельный расчет выполнен для периода с 1986 по 2010 г. и подготовлен для исследования циркуляции вод в придонном слое на континентальном склоне до глубины 300 м. Модель имеет 74 расчетных уровня по глубине, из которых верхние 35 – это сигма-уровни, вертикальные координаты которых меняются в зависимости от глубины узла до 300 м. Ниже расположены 39 уровней с неизменяемой глубиной. Сигма-уровни в районе 300-метровой изобаты расположены чаще для уточнения границ каскадинга (рис. 2). Сравнение результатов модельного расче-

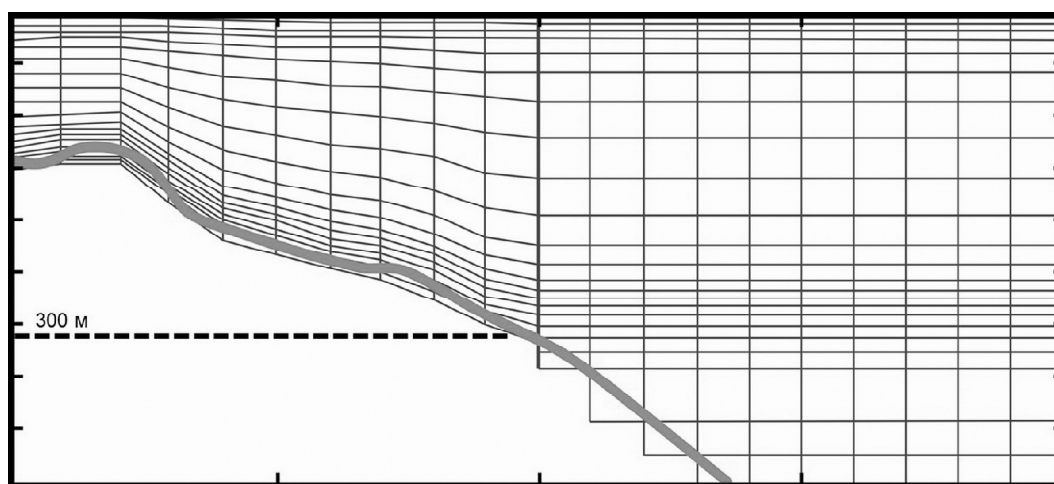


Рис. 2. Схематичное изображение распределения уровней модельного расчета по глубине [Luneva et al., 2018]

Fig. 2. Scheme of the in-depth distribution of model calculation levels [Luneva et al., 2018]

та с данными наблюдений каскадинга в морях Бофорта и Чукотском показало принципиальную возможность для воспроизведения каскадинга при описанных выше параметрах расчета и дискретности выдачи результатов [Luneva et al., 2020]. Однако выводы о возможности данной модели воспроизводить каскадинг были сделаны на основании подбора экспедиционных данных, показывающих наличие каскадинга, и последующего сравнения полей гидрофизических характеристик с модельными данными, полученными в узлах сетки в том же районе за тот же временной период. Также возможность развития каскадинга по модельным данным NEMO в Гренландском море была показана в статье [Marson et al., 2017]. В данной статье предложен алгоритм автоматического определения районов каскадинга и его характеристик по модельным данным и рассмотрены результаты его применения. Алгоритм основан на распределении плотности морской воды и особенностях рельефа дна.

Необходимым условием развития каскадинга является наличие градиента плотности на склоне в направлении уменьшения глубины. Соответственно, выделение таких областей в массиве данных показывает зоны потенциального каскадинга. При анализе данных требуется задать дополнительные условия, рассмотренные ниже.

Для уменьшения обрабатываемого массива данных область поиска зон потенциального каскадинга определяется заранее на основании данных о рельефе дна. Из всего массива выбираются узлы сетки в заданном диапазоне глубин. Для каждого из них строится цепочка последовательных узлов с непрерывно увеличивающейся глубиной, заданной в определенных пределах. Например, для бассейна СЛО в целом производится поиск узлов на континентальном склоне в диапазоне глубин 0–500 м. При этом шельфовые области морей, где не обнаруживается таких цепочек с непрерывно увеличивающейся глубиной, не попадают в выборку. Определение таких узлов значительно сокращает объем инфор-

мации и ускоряет обработку. Для примера, в программной среде Matlab нахождение всех зон потенциального каскадинга в массиве 506×557 узлов для одного временного интервала занимает около суток, тогда как нахождение зон при заранее определенной области поиска занимает около двух часов. На данном этапе не исследуются термохалинная структура и другие особенности зоны потенциального каскадинга, а выбор узлов основывается только на особенностях рельефа дна.

После установления области поиска, все находящиеся в ней узлы проверяются на условие наличия градиента плотности на придонном горизонте с восемью соседними узлами (рис. 3). Дополнительно сравнивается плотность вод на придонном и вышележащем горизонтах исследуемого узла (см. рис. 3) с целью проверки существования конвекции до дна и устойчивости структуры вод. Это позволяет исключить из формируемого выходного массива данных узлы на склоне, в которых происходит перемешивание до дна. Наличие узлов сетки с неустойчивой стратификацией не обязательно. Вертикальная плотностная однородность не является достаточным условием развития каскадинга. Вокруг узлов с равной плотностью могут быть обнаружены узлы с устойчивой стратификацией и максимальной плотностью у дна, равной плотности в соседнем узле с перемешанной водой, которые и становятся первыми в формируемой цепочке.

Условия проверки исследуемого узла можно представить в следующем виде:

1. Плотность на придонном горизонте в заданном узле больше или равна плотности одного из восьми окружающих его узлов.
2. Глубина выбираемого узла больше, чем у заданного узла (см. рис. 3).
3. Плотность над придонным горизонтом заданного узла меньше, чем на придонном. Это условие позволяет определить первый узел на малой глубине, где структура плотности остается устойчивой. Если плотность на горизонте выше придонного рав-

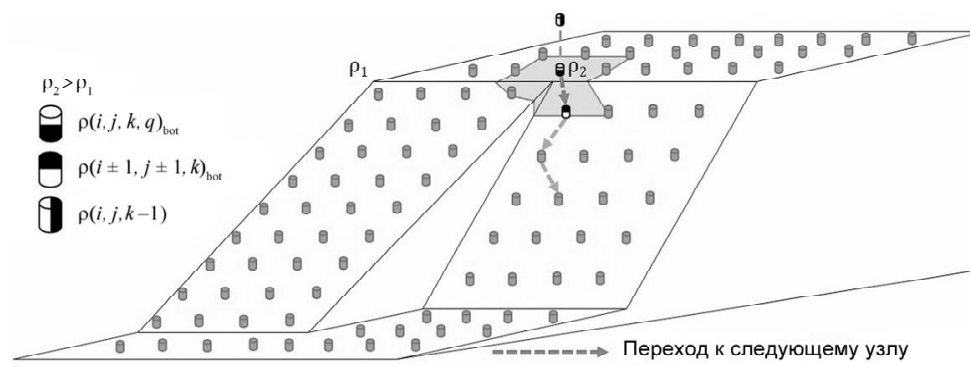


Рис. 3. Схема исследования узлов модельной сетки на наличие зон потенциального каскадинга на склоне. Область исследуемого и восьми окружающих его узлов выделена серым цветом

Fig. 3. Scheme of investigation of the model grid nodes for the areas of potential cascading on the slope. The node under study and eight surrounding nodes are highlighted in gray

на плотности на придонном горизонте, то данный узел не попадает в создаваемую цепочку узлов, так как считается, что в нем происходит перемешивание до дна, но не начало процесса каскадинга. Для любого узла после первого выполнения данного условия подтверждает наличие устойчивой структуры вод, подходящей для развития каскадинга.

При выполнении всех перечисленных условий имеется основание полагать, что на данном участке склона может происходить каскадинг (рис. 4). Перечисленные выше условия можно представить в виде системы неравенств

$$\begin{cases} \rho(i, j, k, q)_{\text{bot}} > \rho(i, j, k - 1), \\ \rho(i, j, k, q)_{\text{bot}} \geq \rho(i \pm 1, j \pm 1, k)_{\text{bot}}, \\ D(i, j) < D(i \pm 1, j \pm 1), \\ q \geq n, \\ D_{\min} \leq D(i, j) \leq D_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho(i, j, k, q)_{\text{bot}}$ – плотность на придонном горизонте в исследуемом узле сетки; $\rho(i, j, k - 1)$ – плотность на горизонте над придонным; $\rho(i \pm 1, j \pm 1, k)_{\text{bot}}$ – плотность на придонном горизонте в следующем ис-

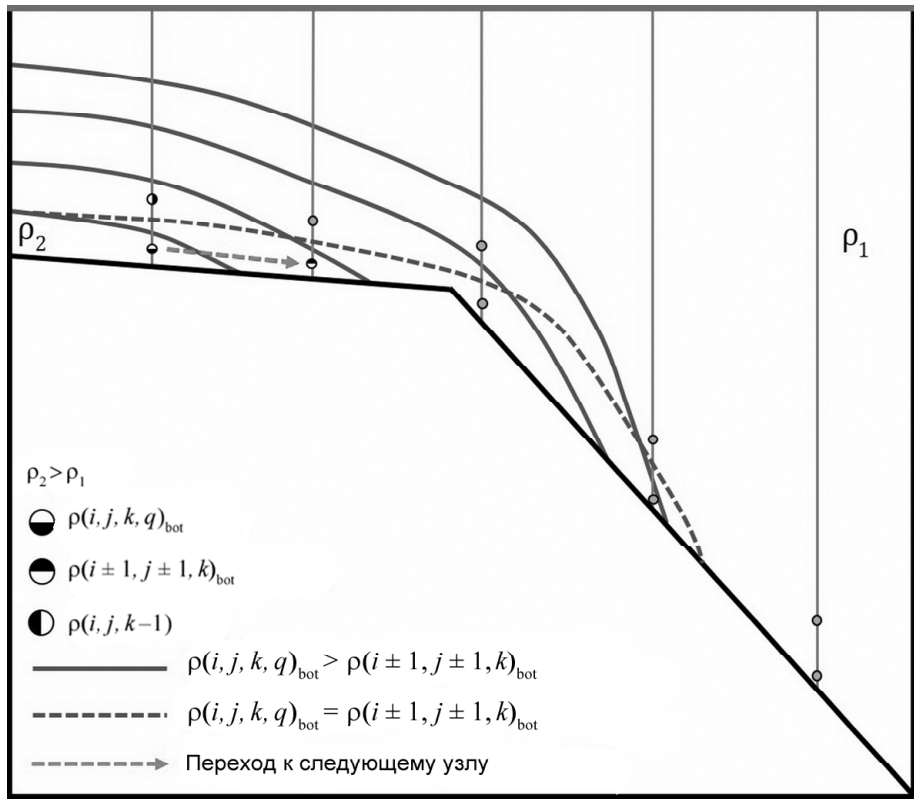


Рис. 4. Схематичное изображение перехода к следующему узлу, исследуемому на условие возникновения каскадинга

Fig. 4. Scheme of transition to the next node being analyzed for the presence of cascading

следуемом узле сетки; $D(i, j)$ – глубина исследуемого узла сетки; $D(i \pm 1, j \pm 1)$ – глубина в следующем исследуемом узле сетки; q – номер узла сетки в последовательности узлов, для которых выполняются приведенные условия; n – минимально возможное количество узлов сетки в последовательности, задается перед началом работы алгоритма; $D_{\min}$, $D_{\max}$ – минимальная и максимальная глубины, ограничивающие область поиска на континентальном склоне.

При соблюдении всех перечисленных выше условий найдется следующий узел сетки, который, в свою очередь, проверяется на соответствие условиям. При наличии нескольких узлов образуется их цепочка с порядковыми номерами от 1 (самая малая глубина) до n (максимальная глубина), через которую можно проследить развитие каскадинга в последующие временные интервалы. Для уточнения интересующих областей каскадинга можно установить минимальное количество узлов в цепочке (n) как дополнительное условие. Это позволяет определить каскадинг только на пологих склонах, где глубина между узлами меняется незначительно и не выходит за границы области поиска, в отличие от крутых склонов, где глубина узлов может выходить за границы области поиска уже при количестве узлов в цепочке более двух.

После проверки всех узлов за определенный временной интервал формируется массив со всеми координатами цепочек узлов, подходящих по услови-

ям. Каждая цепочка узлов образует разрез с распределением плотности, подобным изображенному на рис. 4. На мелких станциях расположены узлы с максимальной плотностью на придонных горизонтах. С увеличением глубины плотность на придонных горизонтах следующих узлов цепочки уменьшается. При таком распределении создаются условия для стекания плотной воды до уровня эквивалентной плотности. Исходя из данных таких массивов, по каждому временному интервалу можно получить величины изменения интенсивности каскадинга в выбранном районе.

Результаты исследования и их обсуждение.

У архипелага Северная Земля каскадинг в районе острова Комсомолец наблюдался во время экспедиций в 1984 и 1985 годах [Ivanov, Golovin, 2007]. В предлагаемом алгоритме были использованы узлы сетки глубиной от 0 до 500 м (рис. 5).

В выбранном районе все узлы были проверены на наличие условий для каскадинга с использованием описанного алгоритма. В результате были найдены узлы начала и конца каскадинга и посчитано количество его случаев (рис. 6). Перепад глубин при каскадинге достигал 50 м. На рис. 6 показана цепочка из трех узлов в районе острова Малый Таймыр, где в декабре 1991 г. сложились условия для возникновения каскадинга с меньшей плотностью придонного горизонта на втором узле цепочки, расположенном на 50 м глубже придонно-

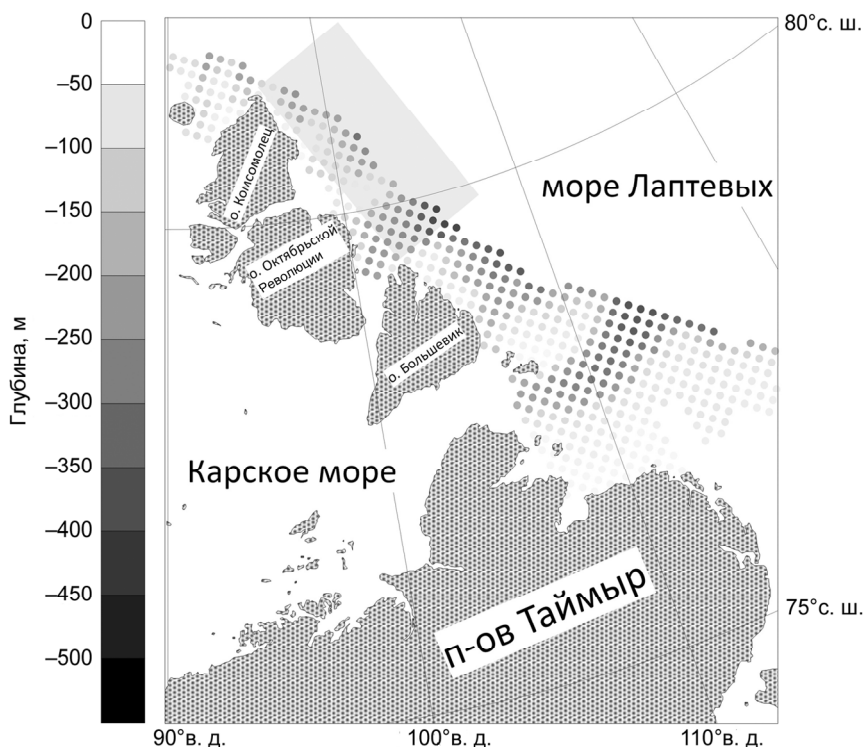


Рис. 5. Район материкового склона моря Лаптевых с областью узлов сетки с глубинами от 0 до 500 м. Серым цветом обозначен полигон, где случай прохождения каскадинга был описан в статье [Ivanov, Golovin, 2007]

Fig. 5. The area of the continental slope of the Laptev Sea with grid nodes with depths from 0 to 500 meters. The polygon where the cascading event is discussed in the article [Ivanov, Golovin, 2007] is highlighted in gray

го горизонта первого узла. По выбранной цепочке узлов было построено распределение плотности на придонном горизонте за весь период модельного расчета (рис. 7). Символами на рис. 7 показаны узлы, в которых наблюдались условия для возникновения каскадинга в определенные временные интервалы.

Всего на полученной цепочке узлов удалось выявить три случая прохождения каскадинга, все – в зимний период, а именно в декабре 1991, 1993 гг. и в декабре 2004 – январе 2005 гг.

17 декабря 1991 г. к востоку от острова Малый Таймыр сложились условия для возникновения каскадинга (рис. 8Б). Именно в эту дату структура плотности воды удовлетворяла всем условиям в системе неравенств (1). Аномалия плотности на придонном горизонте первого узла достигла 27 кг/м^3 . Такая же аномалия плотности наблюдалась на глубине 80–90 м (см. рис. 8Б). В данном случае воды на придонном горизонте первого узла цепочки более плотные, чем на придонном горизонте второго узла, находящегося на большей глубине (66 м). При

этом во всех исследуемых узлах в предыдущий временной интервал 12 декабря наблюдалась устойчивая стратификация плотности, и чем глубже находились придонные горизонты узлов, тем больше была плотность воды в них (см. рис. 8А). 17 декабря температура была близка к температуре замерзания (см. рис. 8Д), а соленость воды повышена в узле начала каскадинга, следовательно, произошло повышение плотности воды из-за осолонения при льдообразовании. На следующих временных интервалах (22 и 27 декабря) можно наблюдать развитие и завершение каскадинга (см. рис. 8В, Г). Вертикальное распределение плотности стало устойчивым, а воды с мелководного участка погрузились на глубину до 60 м (см. рис. 8Г). Распределение солености в следующий после 17 декабря период сходно с распределением плотности (см. рис. 8Б, Д). Каскадинг при осолонении при льдообразовании типичен для арктических морей [Иванов, 2011]. Вклад изменений температуры в плотностные изменения существенно меньше солоностного вследствие малой величины коэффициента термического

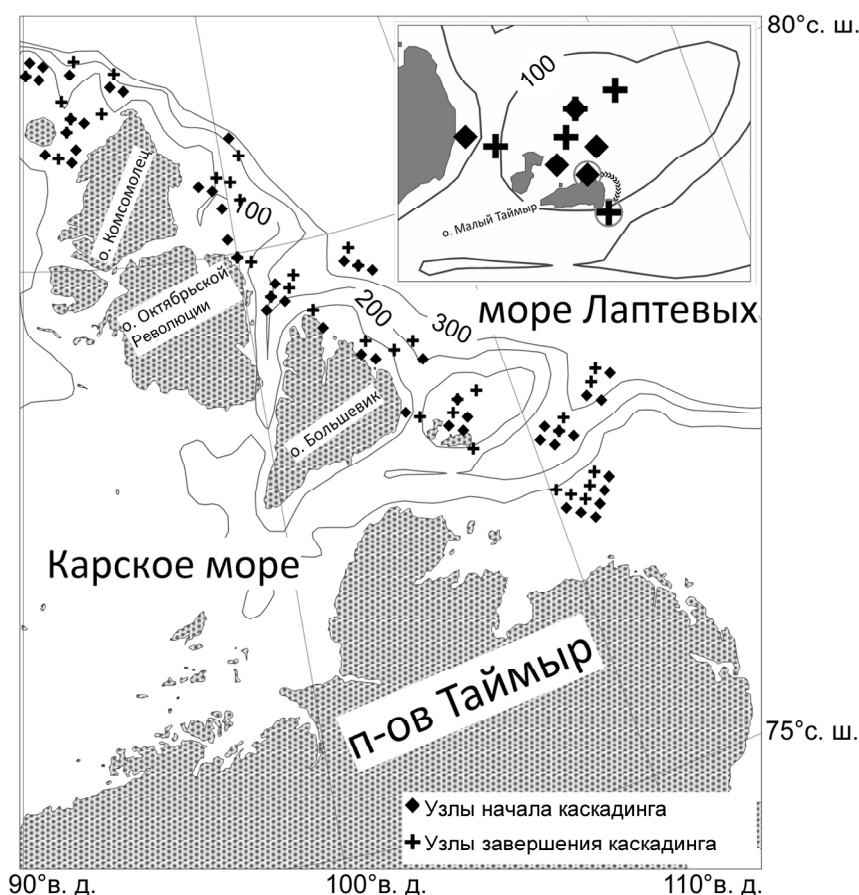


Рис. 6. Распределение узлов начала и завершения каскадинга при минимальной длине цепочки узлов равной двум. Окружностями выделены узлы начала и завершения каскадинга в районе острова Малый Таймыр, по которым были построены распределения температуры, солености и плотности

Fig. 6. Distribution of the nodes where the cascading starts and ends, the minimum length of the chain of nodes is 2. The circles mark the nodes of the beginning and the end of cascading near the Maly Taimyr Island, which were used to draw the temperature, salinity and density distribution

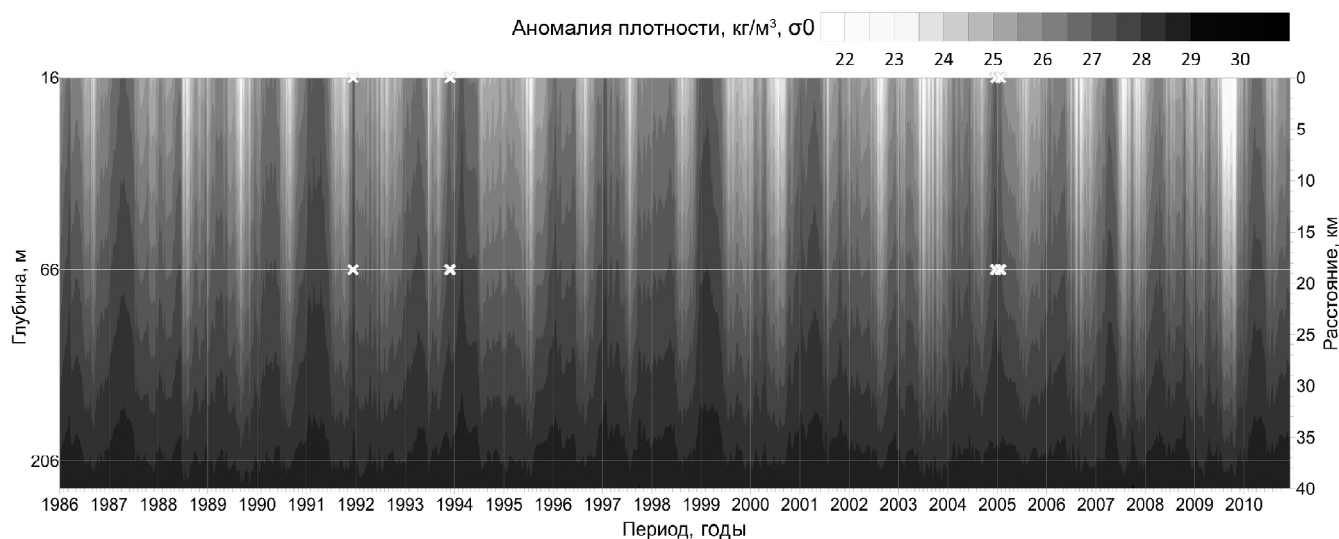


Рис. 7. Распределение придонной аномалии плотности на разрезе у острова Малый Таймыр. Белыми крестиками отмечены узлы с условиями для развития каскадинга

Fig. 7. Distribution of the bottom density anomaly in the section near the Maly Taimyr Island. White symbols mark the nodes where the cascading conditions were observed

расширения при низких температурах. В рассматриваемом случае в последующие после 17 декабря временные интервалы можно проследить стекание осолоненных вод с повышенной плотностью на глубину до 66 м (см. рис. 8Б, В, Г, Д, Е).

В работе [Ivanov, Golovin, 2007] исследуется случай возникновения каскадинга у восточного побережья островов Октябрьской Революции и Большевик. Плотные воды образуются вдоль берега на участках с глубинами около 100 м и затем погружаются на большую глубину. Данные экспедиционных исследований, собранные в октябре 1984 г., показали, что присутствующий осенью на глубине 30–50 м пикноклин препятствует проникновению конвекции до дна. В апреле 1985 г. на мелководных участках конвекция проникает до дна, и погружившиеся на придонные горизонты осолоненные воды стекают на глубину до 250 м. При этом на более глубоководных станциях пикноклин сохраняется. В целом, структура распределения плотности вод соответствует определяемой алгоритмом как случай возникновения каскадинга. Однако при работе с модельными данными не удалось обнаружить каскадинг с разницей глубин между узлами, аналогичной описанному в статье [Ivanov, Golovin, 2007] случаю (около 150 м).

Рассмотренный пример выявления каскадинга с помощью разработанного алгоритма позволяет ожидать, что предложенный методический подход может быть использован для определения областей каскадинга на любом континентальном склоне.

Выводы:

- автором разработан алгоритм определения зон каскадинга на основе данных о плотности воды и рельефе дна. Был разобран пример прохождения каскадинга в определенных алгоритмом узлах в районе острова Малый Таймыр;

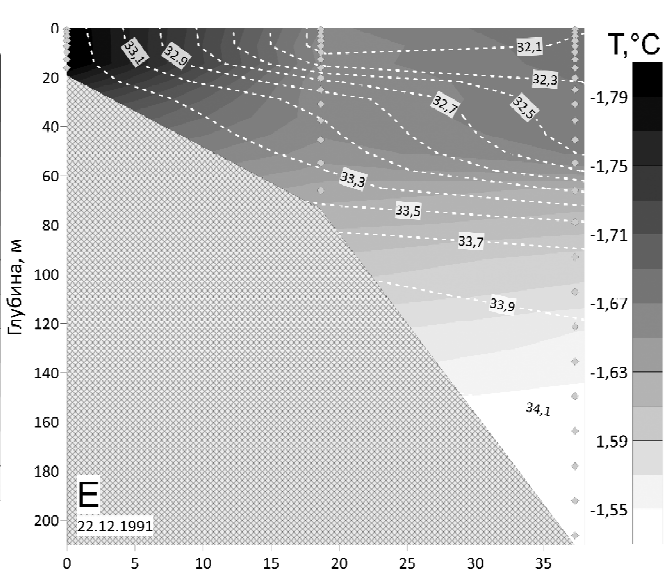
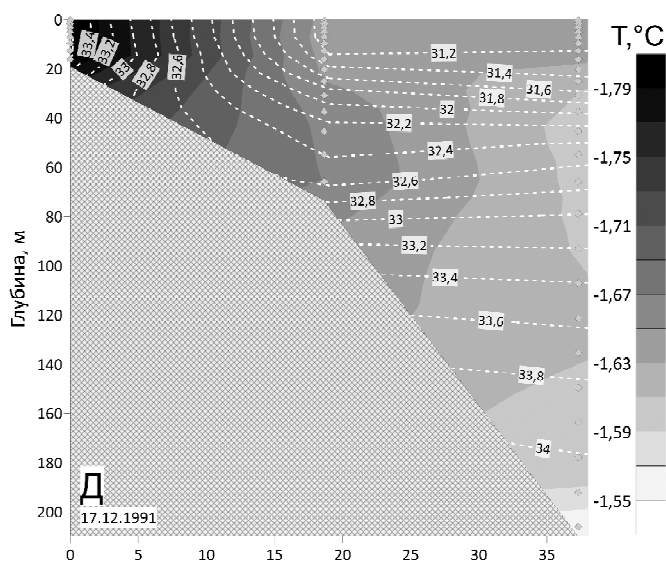
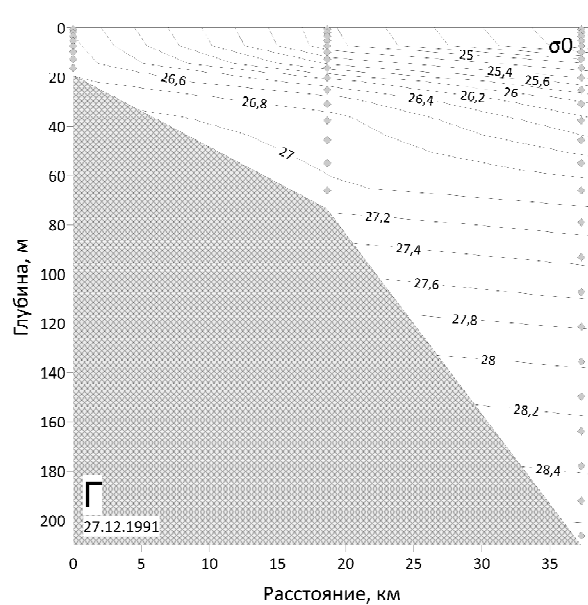
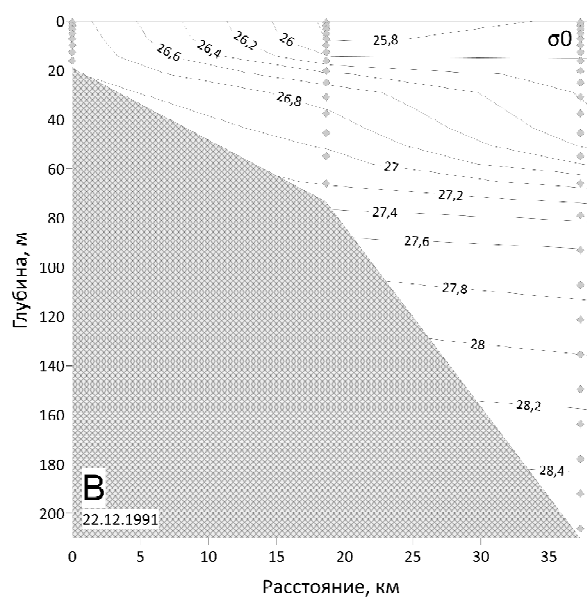
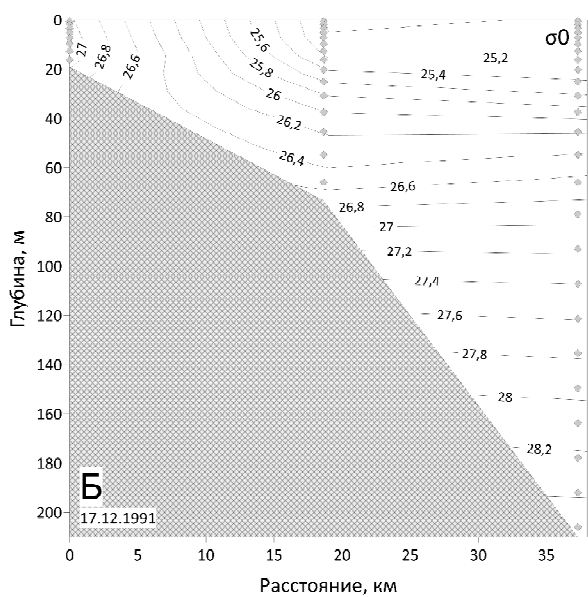
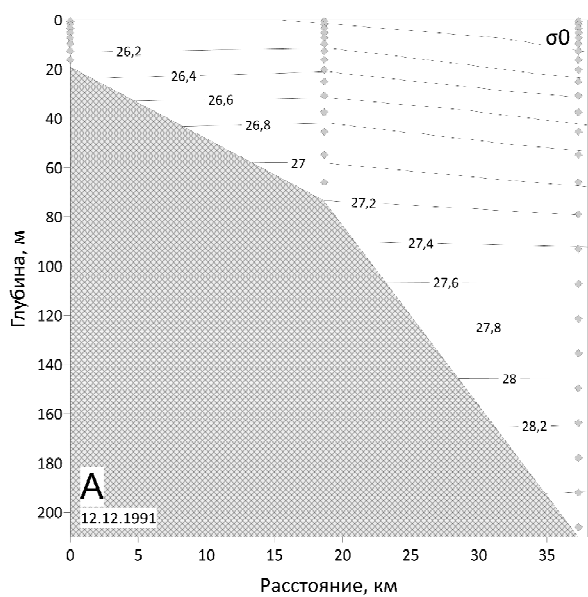
- проведенный при помощи разработанного алгоритма анализ показал возможность идентифицировать зоны каскадинга на основе модельных данных с временным разрешением выдачи пять суток;

- на основе полученных результатов о пространственном распределении районов каскадинга есть возможность получить его качественные и количественные характеристики, а также информацию о предшествующих его образованию процессах. На данном этапе разработки в алгоритме не анализируется структура течений в получаемых цепочках узлов во время прохождения каскадинга. В дальнейшем планируется апробировать разработанный алгоритм на массивах данных с меньшим временным интервалом.

Благодарности. Разработка алгоритма выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-35-90124 «Аспиранты».

Рис. 8. Распределение аномалии плотности на разрезе в декабре 1991 г. (А–Г), распределение температуры и солёности (пунктирные изогалины, епс) на разрезе в декабре 1991 г. (Д, Е)

Fig. 8. Distribution of density anomalies along the section in December 1991 (A–Г), distribution of temperature and salinity (dotted isohalines, psu) along the section in December 1991 (Д, Е)



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Головин П.Н. Конвективный массоперенос в подледном слое зимнего развода в Арктическом бассейне // Океанология. 1995. Т. 35. № 6. С. 854–863.
- Иванов В.В. Усиление водообмена между шельфом и Арктическим бассейном в условиях снижения ледовитости // Доклады академии наук. 2011. Т. 441. № 1. С. 103–107.
- Chapman D.C. The influence of an along slope current on the formation and offshore transport of dense water from coastal polynya, *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, no. C10, p. 24 007–24 019.
- Gawarkiewicz G. Effects of ambient stratification and shelfbreak topography on offshore transport of dense water on continental shelves, *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, no. C2, p. 3307–3324.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.L., Golovin P.N. Cascades of dense water around the world ocean, *Progress in oceanography*, 2004, vol. 60, no. 1, p. 47–98.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I. Formation of a dense water cascade in the marginal ice zone in the Barents Sea, *Deep Sea Research, part I, Oceanographic Research Papers*, 2005, vol. 52, no. 9, p. 1699–1717.
- Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modeling of dense water cascading from the northwestern Laptev Sea shelf, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2007, vol. 112, no. C9, p. 1–15, DOI: 10.1029/2006JC003882.
- Ivanov V., Watanabe E. Does Arctic Sea ice reduction foster shelf–basin exchange? *Ecological applications*, 2013, vol. 23, no. 8, p. 1765–1777, DOI: 10.1890/11-1069.1.
- Ivanov V., Maslov P., Aksenov Y., Coward A. Shelf-basin exchange in the Laptev Sea in the warming climate: a model study, *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 2015, vol. 109, no. 3, p. 254–280.
- Luneva M., Harle J., Holt J. Evaluation of cascading water formation and pathways from NEMO-shelf Arctic Ocean model. *Geophysical Research Abstracts*, 2018, vol. 20, p. 14156.
- Luneva M.V., Ivanov V.V., Tuzov F.K., Aksenov Y., Harle J.D., Kelly S., Holt J.T. Hotspots of Dense Water Cascading in the Arctic Ocean: Implications for the Pacific Water Pathways, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2020, vol. 125, no. 10, p. e2020JC016044, DOI: 10.1029/2020JC016044.
- Madec G., Bourdallé-Badie R., Chanut J., Clementi E., Coward A., Ethé Ch. NEMO ocean engine (Version v4.0). Notes Du Pôle De Modélisation De L'institut Pierre-simon Laplace (IPSL), Zenodo, 2019, DOI: 10.5281/zenodo.3878122.
- Marquedá M.A., Willmott A.J., Biggs N.R. Polynya dynamics: A review of observations and modeling, *Reviews of Geophysics*, 2004, vol. 42, no. 1, p. 1–37.
- Marshall J., Schott F. Open ocean convection: Observations, theory, and models, *Reviews of Geophysics*, 1999, vol. 37, no. 1, p. 1–64.
- Marson J.M., Myers P.G., Hu X., Petrie B., Azetsu Scott K., Lee C.M. Cascading off the West Greenland Shelf: A numerical perspective, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2017, vol. 122, no. 7, p. 5316–5328.
- Shapiro G.I., Huthnance J.M., Ivanov V.V. Dense water cascading off the continental shelf, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2003, vol. 108, no. C12, p. 1–19, DOI: 10.1029/2002jc001610.

Поступила в редакцию 28.07.2020

После доработки 05.11.2020

Принята к публикации 21.01.2021

F.K. Tuzov^{1,2}

ELABORATION AND APPLICATION OF AN ALGORITHM TO DETECT THE CASCADING NEAR THE SEVERNAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO COAST

The article discusses possible processing of data from a mathematical model, which allows identification of areas where cascading is observed. Cascading is a bottom gravity current along and across the bottom topography slopes, that transports denser water formed in the coastal and shelf areas of seas and oceans. The NEMO model calculation for the period 1986–2010 is used as an initial data set for the Severnaya Zemlya Archipelago area with the time resolution of 5 days and the spatial resolution of 1/10°. The choice of the area is due to the availability of hydrological data indicating the occurrence of cascading during 1984 and 1985 expeditions.

The suggested algorithm makes it possible to identify the areas of cascading occurrence, namely three cases in December 1991 and 1993, and December 2004 – January 2005 near the Maly Taimyr Island. The case of cascading in December 1991 was analyzed. The comparison of water densities at the bottom and overlying horizons for the neighboring grid nodes during four consecutive 5-day periods (December 12–31) revealed the transition of stable density stratification of waters to the stratification characteristic of cascading. During the third 5-day period dense waters formed in the nodes with shallow depth (16 m) flow down the slope to a depth of 66 m. The density of water increases as a result of salinization during ice formation in shallow waters near the Maly Taimyr Island. Thus, the depth difference of cascading was 50 m. During the fourth 5-day period after cascading, the density structure becomes stable again. It was found that the 5-day time interval of the model data array applied for the study is sufficient to reveal the cascading process.

Key words: Arctic Ocean, Laptev Sea, mathematical modeling, arrays of discrete data, NEMO model

Acknowledgments. The development of the algorithm was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 19-35-90124 "PHD – students").

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, postgraduate student; e-mail: fedor-tuz@mail.ru

² All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, research fellow.

REFERENCES

- Chapman D.C. The influence of an along slope current on the formation and offshore transport of dense water from coastal polynya, *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, no. C10, p. 24 007–24 019.
- Gawarkiewitz G. Effects of ambient stratification and shelfbreak topography on offshore transport of dense water on continental shelves, *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, no. C2, p. 3307–3324.
- Golovin P.N. Konvektivnyi massopereenos v podlednom sloe zimnego razvod'ya v Arkticheskom basseine [Convective mass transfer in the under-ice layer of winter open water in the Arctic Ocean], *Okeanologiya*, 1995, vol. 35, no. 6, p. 854–863. (In Russian)
- Ivanov V., Maslov P., Aksenov Y., Coward A. Shelf-basin exchange in the Laptev Sea in the warming climate: a model study, *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 2015, vol. 109, no. 3, p. 254–280.
- Ivanov V., Watanabe E. Does Arctic Sea ice reduction foster shelf–basin exchange? *Ecological applications*, 2013, vol. 23, no. 8, p. 1765–1777, DOI: 10.1890/11-1069.1.
- Ivanov V.V. Usilenie vodoobmena mezhdru shel'fom i Arkticheskimi bassejnom v usloviyah snizheniya ledovitosti [Increasing of water exchange between the shelf and the Arctic basin under the decreasing ice cover], *Doklady Akademii nauk*, 2011, vol. 441, no. 1, p. 103–107. (In Russian)
- Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modeling of dense water cascading from the northwestern Laptev Sea shelf, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2007, vol. 112, no. C9, p. 1–15, DOI: 10.1029/2006JC003882.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I. Formation of a dense water cascade in the marginal ice zone in the Barents Sea, *Deep Sea Research, part I, Oceanographic Research Papers*, 2005, vol. 52, no. 9, p. 1699–1717.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.L., Golovin P.N. Cascades of dense water around the world ocean, *Progress in oceanography*, 2004, vol. 60, no. 1, p. 47–98.
- Luneva M.V., Ivanov V.V., Tuzov F.K., Aksenov Y., Harle J.D., Kell S., Holt J.T. Hotspots of Dense Water Cascading in the Arctic Ocean: Implications for the Pacific Water Pathways, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2020, vol. 125, no. 10, p. e2020JC016044, DOI: 10.1029/2020JC016044.
- Luneva M., Harle J., Holt J. Evaluation of cascading water formation and pathways from NEMO-shelf Arctic Ocean model, *Geophysical Research Abstracts*, 2018, vol. 20, p. 14 156.
- Madec G., Bourdallé-Badie R., Chanut J., Clement E., Coward A., Ethé Ch. NEMO ocean engine (Version v4.0). Notes Du Pôle De Modélisation De L'institut Pierre-simon Laplace (IPSL), Zenodo, 2019, DOI: 10.5281/zenodo.3878122.
- Marquedda M.A., Willmott A.J., Biggs N.R. Polynya dynamics: A review of observations and modeling, *Reviews of Geophysics*, 2004, vol. 42, no. 1, p. 1–37.
- Marshall J., Schott F. Open ocean convection: Observations, theory, and models, *Reviews of Geophysics*, 1999, vol. 37, no. 1, p. 1–64.
- Marson J.M., Myers P.G., Hu X., Petrie B., Azetsu Scott K., Lee C.M. Cascading off the West Greenland Shelf: A numerical perspective, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2017, vol. 122, no. 7, p. 5316–5328.
- Shapiro G.I., Huthnance J.M., Ivanov V.V. Dense water cascading off the continental shelf, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2003, vol. 108, no. c12, p. 1–19, DOI: 10.1029/2002jc001610.

Received 28.07.2020

Revised 05.11.2020

Accepted 21.01.2021