

УДК 551.465+551.321.8

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОЗАПАСА ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ НА ЭВОЛЮЦИЮ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

А.В. Даньшина

кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник отдела океанологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург
danshina@aari.ru

Представленное исследование строится на основе данных численных экспериментов, полученных на адаптированной для Арктического региона совмещенной термогидродинамической модели NEMO морской лед – океан. Связь изменений ледяного покрова с теплозапасом деятельного слоя океана продемонстрирована на примере двух лет, представляющих собой «теплый» и «холодный» год, на акватории Восточно-Сибирского моря. Региональные особенности влияния теплосодержания деятельного слоя на толщину льда были выявлены при анализе распределения величины коэффициента взаимной корреляции со сдвигом по времени между этими двумя исследуемыми параметрами. Показано, что в «теплый» год, в отличие от «холодного», на почти всей акватории прослеживается влияние теплосодержания деятельного слоя на ледовую обстановку. Более тесная связь проявляется в «теплый» год при сдвигах во времени в 1 месяц. В «холодный» год наибольшее влияние теплозапаса деятельного слоя на толщину льда наблюдается при сдвигах в 2 –3 месяца. Оценка неравномерностей в распределении величины коэффициента взаимной корреляции по акватории на основе данных численного моделирования позволяет выделять районы с высокой теснотой связи и обоснованно учитывать в этих областях вклад теплозапаса деятельного слоя при прогнозировании ледовых условий.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, Восточно-Сибирское море, морской лёд, теплозапас, численное моделирование, динамико-термодинамическая модель

HEAT CONTENT EFFECT OF THE ACTIVE LAYER ON THE ICE COVER EVOLUTION IN THE EAST SIBERIAN SEA

A.V. Danshina

candidate of physics and mathematics sciences, research scientist of the Department of Oceanology, Federal State Budgetary Institution "Arctic and Antarctic Research Institute", St. Petersburg, danshina@aari.ru

ABSTRACT

This study is based on the data of numerical experiments obtained on the coupled ocean – sea ice thermo-hydrodynamical NEMO model adapted for the Arctic region. The relationship between the changes in the ice cover and the active layer heat content of the ocean is illustrated by the example of two years that represent a "warm" and a "cold" year, in the area of the East Siberian Sea. Regional features of the heat content effect of the active layer on the ice thickness were revealed by the analysis of the distribution of the cross-correlation coefficient value with the time shift between these two studied parameters. It is shown that in the "warm" year, unlike the "cold", the influence of the active layer heat content on the ice situation is traced for almost the whole area of the sea. A closer above connection is manifested in the "warm" year with shifts in time of 1 month. The greatest effect of the active layer heat content on the ice thickness is observed in the "cold" year with shifts of 2 -3 months. An estimate based on numerical modeling of inhomogeneities in the distribution of the magnitude of the cross-correlation coefficient across the water area makes it possible to identify regions with a high closeness of connection and allows to take into account for these areas the contribution of the active layer heat content in forecasting of ice conditions.

Keywords: Arctic Ocean, East Siberian Sea, sea ice, heat content, numerical simulation, dynamic-thermodynamic model

Введение

Российский сектор Северного Ледовитого океан с его гидродинамическим и ледовым режимом остаётся на протяжении последних десятилетий объектом пристального изучения не только со стороны Российского государства. Такой интерес, прежде всего, связан с важной стратегической нагрузкой, которая отводится этому региону, как важной судоходной артерии и кладовой минеральных и биологических ресурсов, и как району, влияющему на климат Земли в целом, особенно в период его изменения. Сложности с получением натуральных данных в Арктике для пополнения знаний о ее водной толще, в том числе требуемых при строительстве различного вида объектов на его акватории и при прогнозировании условий судоходства, можно обойти, воспользовавшись данными, полученными с помощью численных математических моделей океана.

В условиях быстро меняющегося климата Арктического региона, исследование факторов, влияющих на эволюцию ледяного покрова, с целью его дальнейшего успешного прогнозирования, является актуальной проблемой. В данном исследовании акцент сделан на получении оценки влияния изменений теплозапаса деятельного слоя на изменение толщины ледяного покрова в одном из морей российского сектора Северного Ледовитого океана – Восточно-Сибирском море.

По приведенным выше причинам исследование, представляемое в статье, опирается на данные именно численного моделирования. К условиям арктического региона была адаптирована перспективная европейская гидродинамическая модель NEMO ((англ. The Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO)) [1]. Эта модель, представляющая собой целый программный комплекс с пред- и постпроцессинговыми утилитами, является программным продуктом с открытым кодом, который достаточно удобен для

использования и с успехом работает в ряде европейских странах в качестве прогностической модели и модели для изучения климата.

Материалы и методы исследования

Методология оценки влияния теплозапаса деятельного слоя океана на изменение толщины ледяного покрова в данном исследовании сводится к синтезу методов численного моделирования и статистической обработки и анализа гидрометеорологической информации. На первом этапе была разработана конфигурация модели NEMO для Северного Ледовитого океана, в которой ледовый блок LIM (англ. Louvain-la-Neuve sea Ice Model) был прикреплен и синхронизирован с работой основного блока модели OPA (англ. Ocean PArallellis), обеспечивающего описание физических процессов, протекающих в водной толще. Численная расчетная схема модели построена на созданной для исследуемого региона криволинейной ортогональной сетке с минимальным пространственным разрешением до 3 км в прибрежной зоне. Вертикальная сетка состоит из 74 расчетных уровней. Используемая разностная сетка является разнесенной и относится к сетке типа «С» по классификации Аракавы. Распределение глубин Мирового океана в узлах выбранной сетки было получено на основе баз данных GEBKO [2] и ETOPO [3]. Причем с целью устранения пространственной изменчивости, масштабы которой меньше шага расчетной сетки, батиметрические данные были сглажены.

Для данной расчетной сетки была произведена подготовка входных данных, включающих в себя распределение температуры и солёности океана, баротропной составляющей течений, превышения уровня морской поверхности, а также данные, необходимые для адекватной работы ледового блока: толщина морского льда и снежного покрова, температура на поверхности и внутри морского льда.

Перечисленные выше данные для воспроизведения начальных и граничных условий для данного регионального варианта модели NEMO были заданы путем интерполяции полей этих океанологических параметров, как по пространству, так и по времени на требуемый для расчета момент времени из узлов грубой сетки семейства ORCA с 0.25 градусным разрешением на основании данных океанского реанализа проекта «MERCATOR OCEAN», находящихся в свободном доступе.

Поскольку приливы играют важную роль в формировании гидродинамического режима особенно в прибрежных районах морей Северного Ледовитого океана, то в разработанной конфигурации модели NEMO используются 13 приливных гармоник, данные для описания, которых получены с помощью расчетов на инверсионной приливной модели TPXO7.2 [4].

Для задания потоков тепла, влаги и импульса на границе разделов лед-атмосфера и океан-атмосфера, необходимых для процесса адекватной работы адаптированной региональной конфигурации с применением балк-формулы CORE-II (англ. Common Ocean-Ice Reference Experiments), используются данные атмосферного реанализа ERA-interim Европейского центра среднесрочного прогноза погоды ECMWF (англ. European Centre for Medium Range Weather Forecast) [5]. В данной модели предусмотрена в автоматическом режиме интерполяция атмосферных форсингов в узлы расчетной сетки «на лету».

На боковой твердой и нижней границе применяется условие отсутствия потоков для трассеров, а для вектора скорости – условие свободного скольжения и нелинейного трения.

На данной адаптированной конфигурации модели была реализована серия численных экспериментов, охватывающая период с 2000 года по 2016 год.

Таким образом, на втором этапе исследования данные, полученные в ходе этих расчетов, были использованы для нахождения теплового содержания (Q) в столбе воды с единичной площадью по следующей формуле:

$$Q = \int_0^H C_p \rho T_w dz, \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость морской воды при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); ρ – плотность морской воды, кг/м³; T_w – температура воды, °С; H – глубина залегания нижней границы деятельного слоя, м.

Для оценки теплозапаса всего деятельного слоя требовалось проинтегрировать теплосодержание в каждом расчетном слое до глубины залегания его нижней границы. С целью выявления этой глубины залегания в разные сезоны и годы были построены в исследуемом море вертикальные разрезы температуры. Восточно-Сибирское море располагается на шельфе и не отличается большой глубиной. Оценка изменчивости структуры вертикального распределения температуры показала, что в среднем нижняя граница деятельного слоя достигает дна.

Сравнение построенных пространственных полей распределения теплосодержания морской воды и толщины льда не позволяют в явном виде выявить зоны наибольшего влияния теплозапаса на изменение толщины ледяного покрова за расчетный период в целом. С целью оценки степени влияния теплосодержания деятельного слоя изучаемого моря на изменчивость толщины льда был применен подход, основанный на использовании математического аппарата статистического анализа. В рамках исследования был произведен расчет взаимокорреляционной функции $r_{xy}(\tau)$ с различным сдвигом по времени между рядами этих двух исследуемых океанографических параметров:

$$r_{xy}(\tau) = \frac{\sum^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(y_{i+\tau} - \bar{y})}{(N-\tau)\sigma_x\sigma_y}, \quad (2)$$

где N – длина реализации, τ – сдвиг по времени между двумя исследуемыми рядами данных $X(x_i)$ и $Y(y_i)$, \bar{x} и \bar{y} – средние арифметические соответствующих рядов, σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения соответствующих рядов.

Вычисление значений взаимокорреляционной функции по данной формуле шло с временным сдвигом, меняющимся в пределах до 5 месяцев. Такой разброс в величине сдвига имеет под собой физическое обоснование, которое заключается в том, что процессы, протекающие как в толще, так и на поверхности моря, и определяющие тесноту связи теплозапаса с толщиной ледяного покрова, обладают инерционностью.

Результаты и их обсуждение

Полученные поля коэффициентов взаимной корреляции были построены для всех лет, входящих в расчетный период проведения численных экспериментов. В этой работе демонстрируются основные особенности в распределении взаимокорреляционной функции на примере двух лет, которые отражают ледовый режим, наблюдающийся в «теплые» и «холодные» годы. В качестве представителя «холодного года» был выбран 2004 год с развитым ледяным покровом, а в качестве «теплого» – 2007 год, что подтверждается и данными мониторинга [6].

При анализе тесноты связи между изучаемыми океанографическими параметрами, следует рассматривать значимые коэффициенты взаимной корреляции, имеющие отрицательный знак. Эти коэффициенты будут говорить, как раз о прямом воздействии теплозапаса на толщину ледяного покрова и определять области моря, в которых этим влиянием не следует пренебрегать. Визуализация распределения величины

взаимнокорреляционной функции показала различия в ее пространственном распределении и величине тесноты связи в «теплый» и «холодный» год.

Как оказалось, в «теплый» 2007 год (рисунки 1-4) теплозапас деятельного слоя оказывает значительное влияние на эволюцию ледяного покрова, и его воздействие сказывается на почти всей акватории Восточно-Сибирского моря. Причем в «теплый» год значимые величины коэффициента взаимной корреляции проявляются при сдвигах по времени до 2 месяцев (рисунок 1б, 2б, 3б), с максимальной теснотой связи при смещении в 1 месяц (рисунок 2б).

В «холодный» 2004 год влияние теплосодержания деятельного слоя на толщину льда проявляется не на столь обширной акватории и наиболее ярко выражено при смещении во времени от 2 до 3 месяцев (рисунок 3а, 4а). В отличие от 2007 года тесная связь между рассматриваемыми параметрами проявляется и при смещении в 4 месяца, причем эта зона влияния смещается к северной границе моря (рисунок 5а).

Если рассматривать влияние теплозапаса деятельного слоя на эволюцию ледяного покрова более детально, то в зависимости от ледовитости года можно отметить следующие региональные особенности.

В 2004 году при нулевом сдвиге по времени наблюдаются локальные очаги со значимыми коэффициентами взаимной корреляции, причем самый обширный из них располагается с западной стороны острова Врангеля в пределах между 70° с.ш. и 73° с.ш., достигая величины равной 0.9.

При сдвиге по времени в 1 месяц на северо-востоке моря в районе 148° в.д. начинает образовываться еще одна зона с повышенной теснотой связи. В целом остальные очаги со значимыми величинами коэффициента взаимной корреляции разрастаются, и теснота связи в них увеличивается, что и демонстрирует рисунок 2а.

При дальнейшем увеличении сдвига по времени начинается перестройка зон влияния теплозапаса деятельного слоя моря на толщину льда. На рисунке 3а отчетливо прослеживается уменьшение влияния теплозапаса с западной стороны острова Врангеля. Значимое воздействие теплосодержания на толщину льда проявляется в районе между 157° и 167° в.д., и у северной границы моря.

Дальнейшее увеличение сдвига по времени до 4 месяцев между исследуемыми рядами данных приводит к исчезновению очага влияния в районе острова Врангеля (рисунок 4а). В центре акватории Восточно-Сибирского моря влияние теплозапаса на изменение ледяного покрова снижается, зато вдоль северной границы зона влияния увеличивается, как территориально, так и по величине тесноты связи.

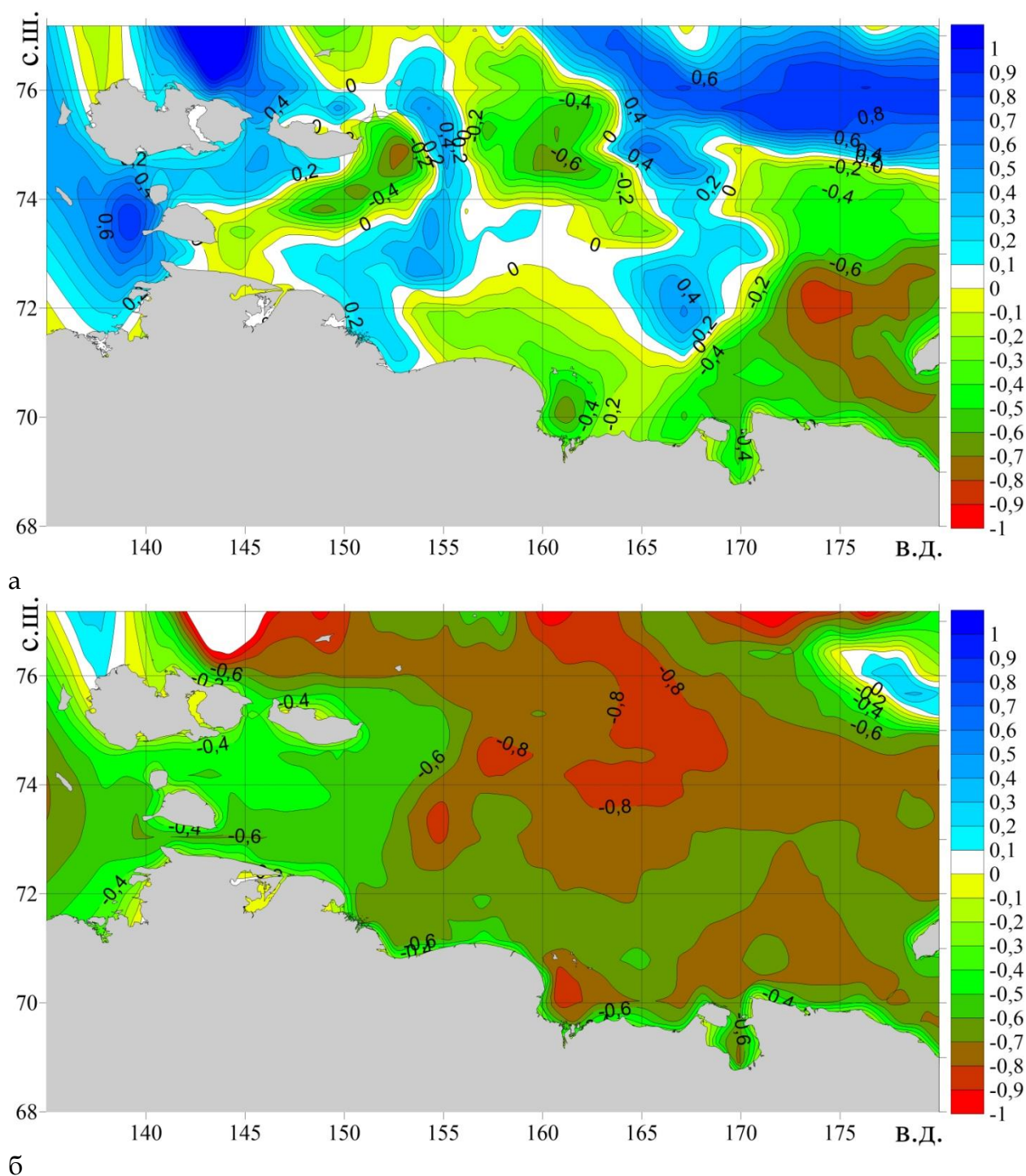


Рисунок 1. Пространственное распределение коэффициентов взаимной корреляции между теплозапасом деятельного слоя Восточно-Сибирского моря и толщиной ледяного покрова при нулевом сдвиге по времени в 2004 году (а) и в 2007 году (б)

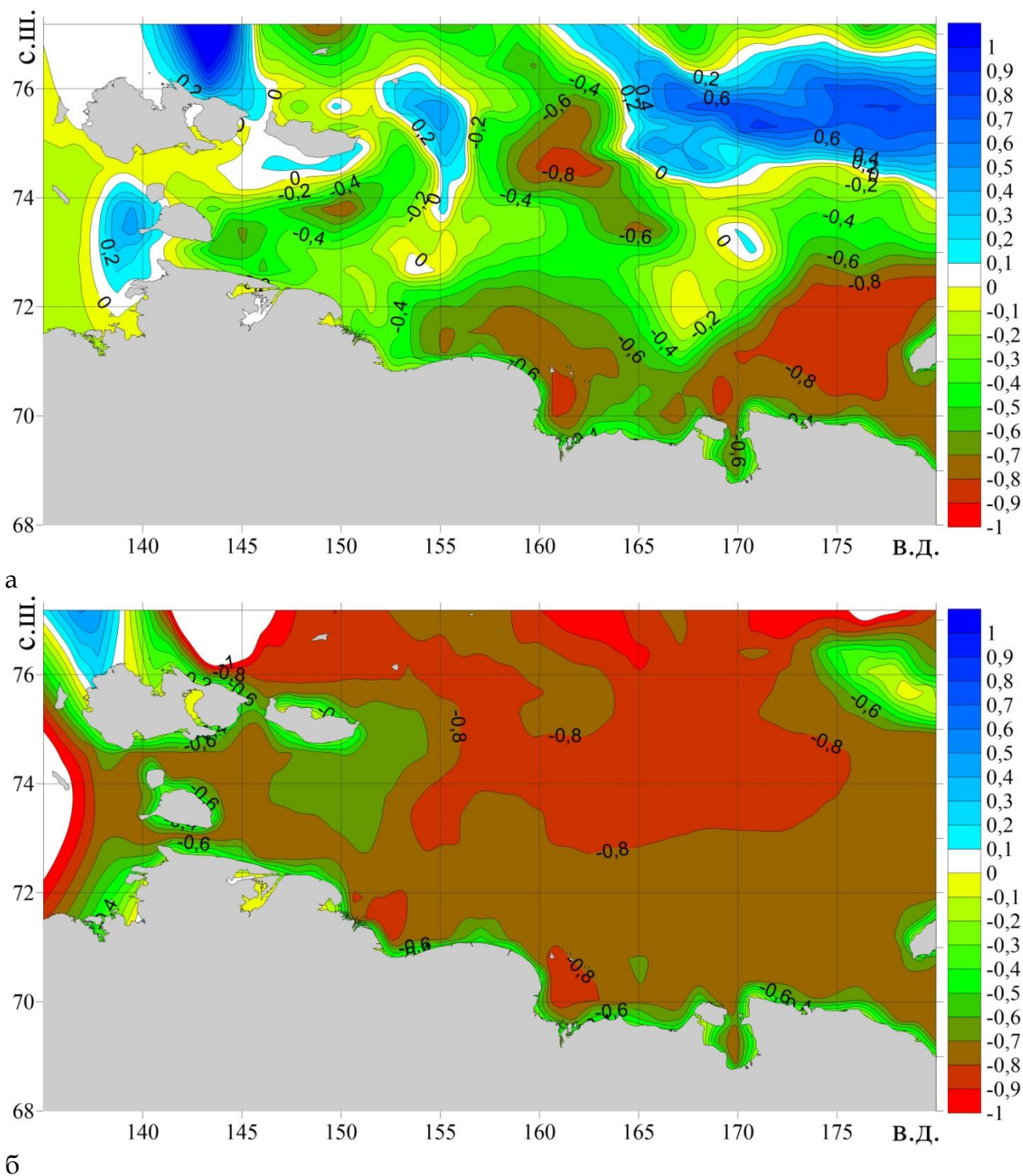
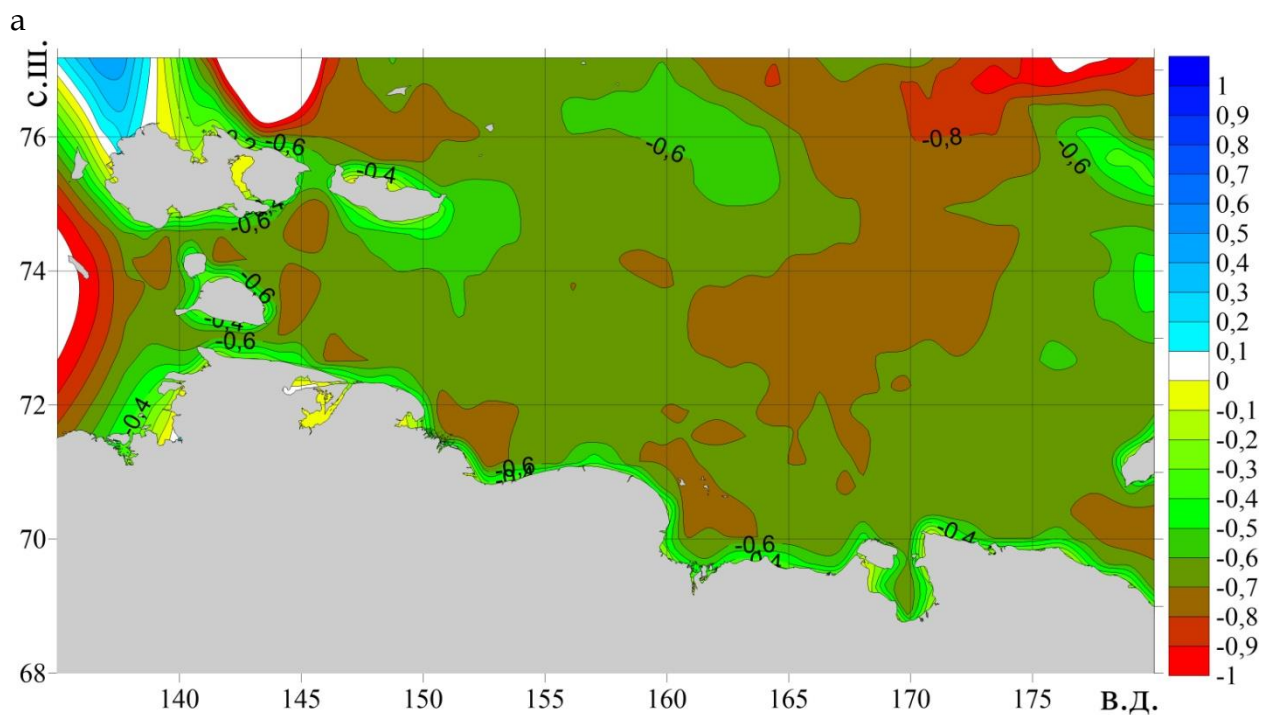
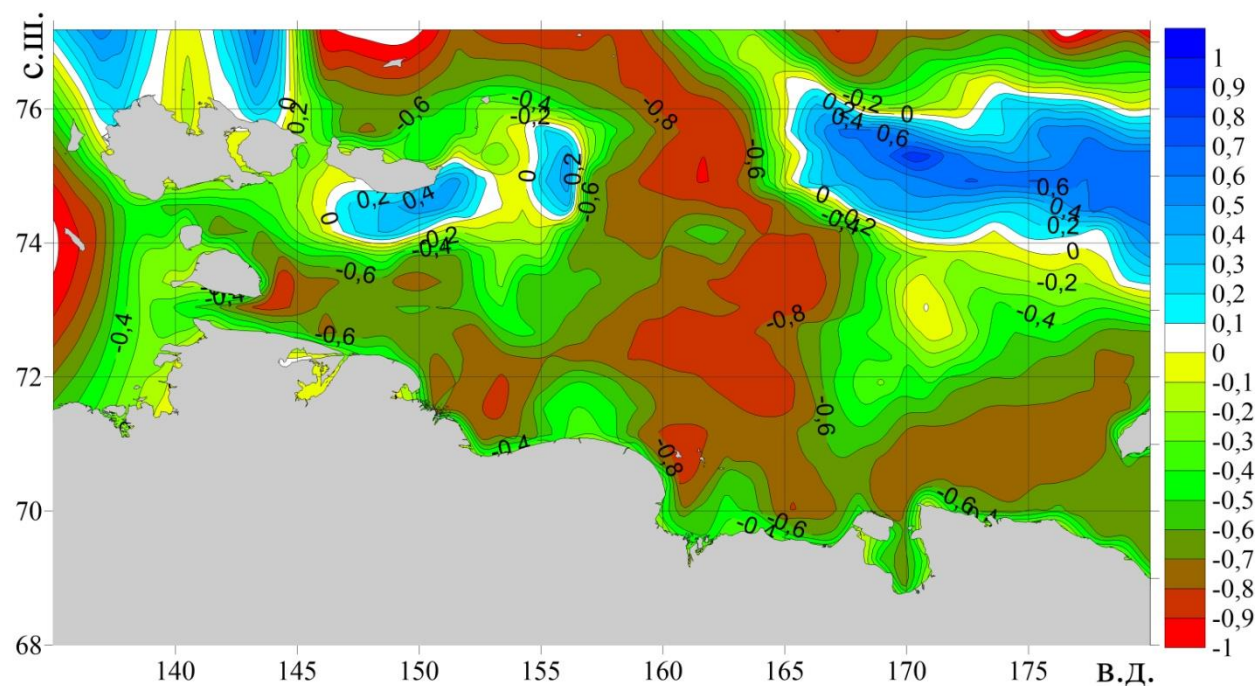


Рисунок 2. Пространственное распределение коэффициентов взаимной корреляции между теплозапасом деятельного слоя Восточно-Сибирского моря и толщиной ледяного покрова при сдвиге по времени в 1 месяц в 2004 году (а) и в 2007 году (б)



б

Рисунок. 3. Пространственное распределение коэффициентов взаимной корреляции между теплозапасом деятельного слоя Восточно-Сибирского моря и толщиной ледяного покрова при сдвиге по времени в 2 месяца в 2004 году (а) и в 2007 году (б)

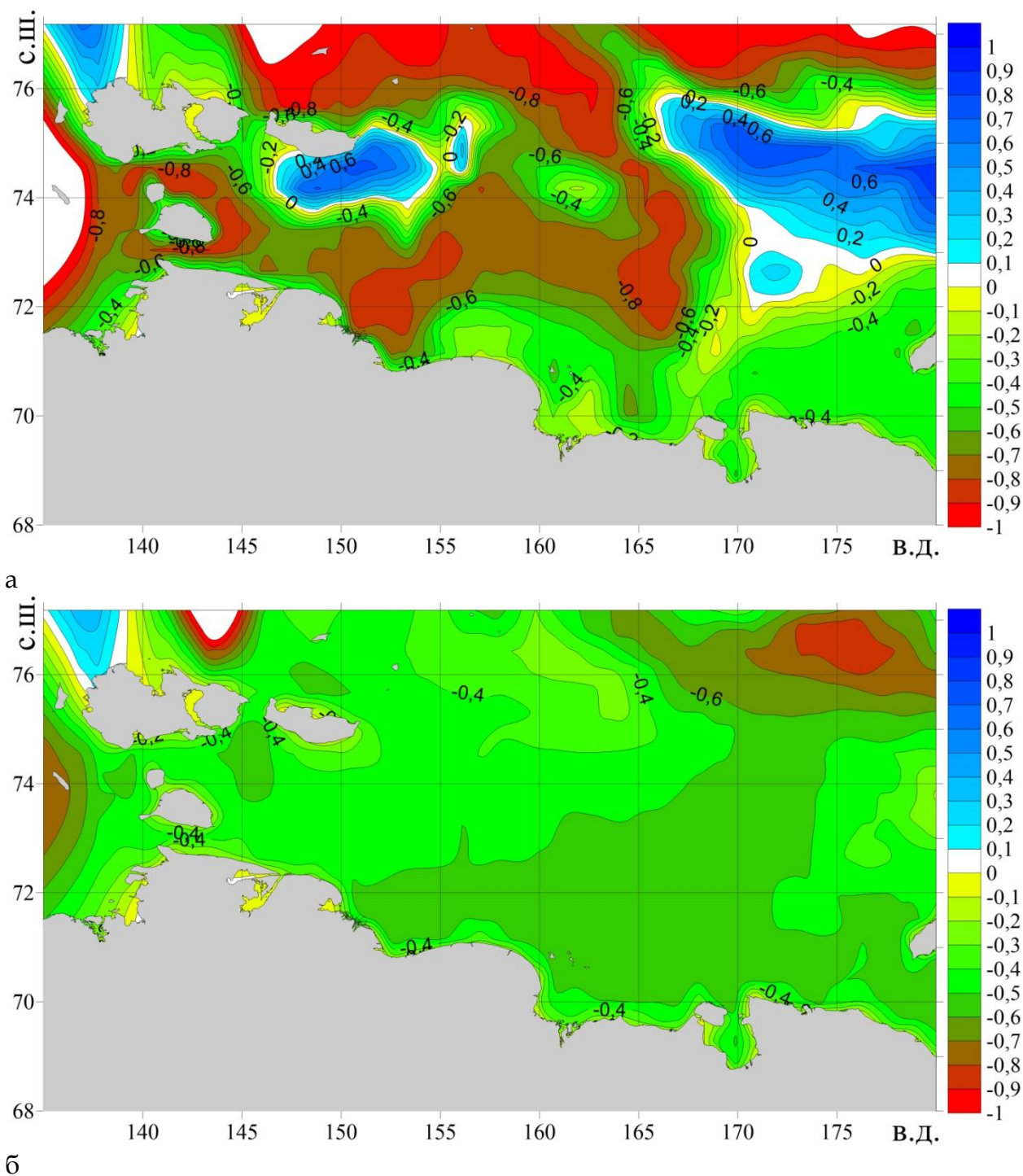


Рисунок 4. Пространственное распределение коэффициентов взаимной корреляции между теплозапасом деятельного слоя Восточно-Сибирского моря и толщиной ледяного покрова при сдвиге по времени в 3 месяца в 2004 году (а) и в 2007 году (б)

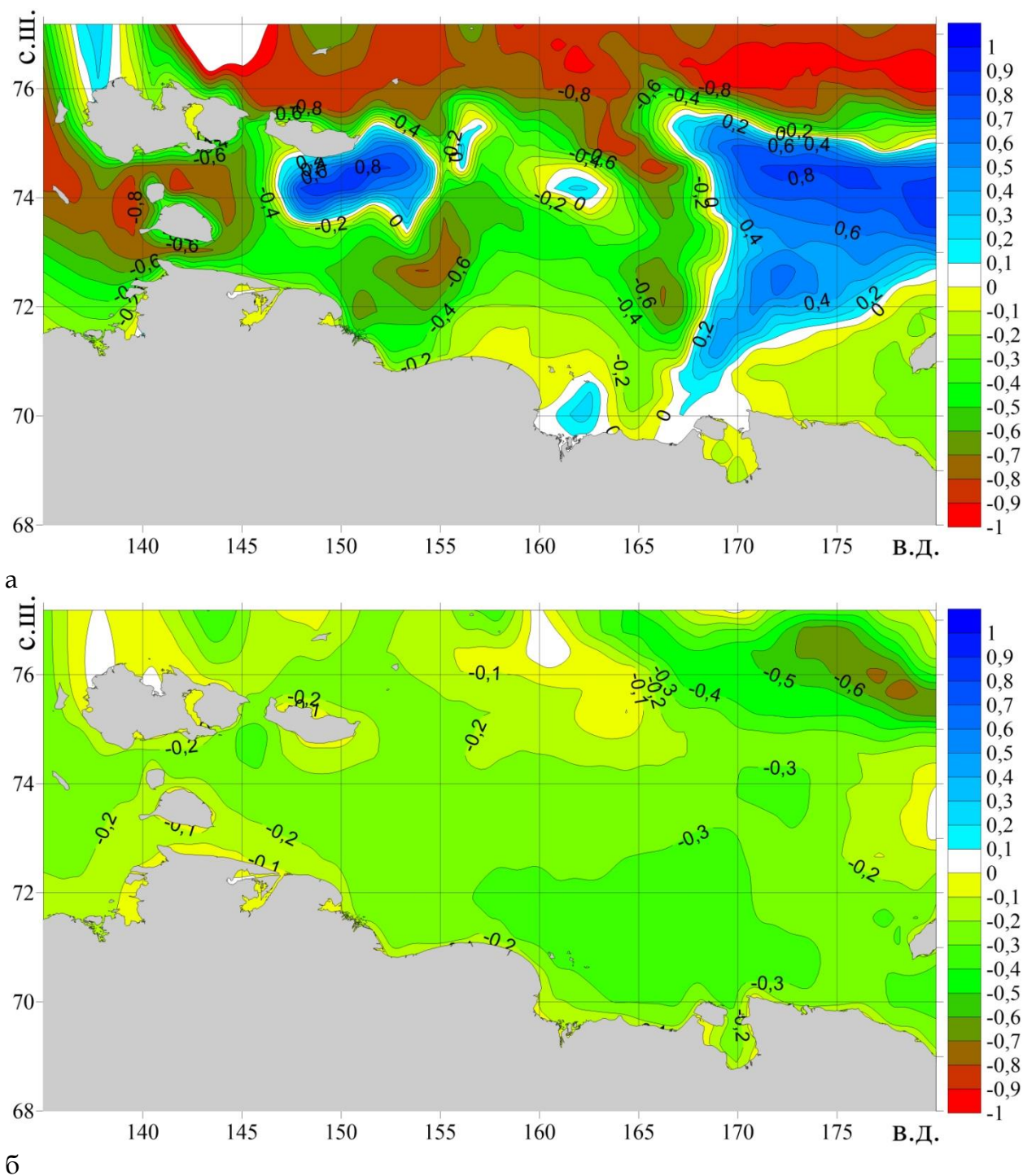


Рисунок 5. Пространственное распределение коэффициентов взаимной корреляции между теплозапасом деятельного слоя Восточно-Сибирского моря и толщиной ледяного покрова при сдвиге по времени в 4 месяца в 2004 году (а) и в 2007 году (б)

При сдвиге до 5 месяцев значимые величины коэффициента взаимной корреляции в основном проявляются на северной оконечности моря в полосе между 75.5° и 77° с.ш.

В «теплый» 2007 год складывается следующая ситуация. При нулевом сдвиге исследуемых рядов данных распределение значимых коэффициентов взаимной корреляции более равномерное по всей акватории моря, поскольку не наблюдается смена знаков (рисунок 1б), как в 2004 году. Теснота связи между теплозапасом и толщиной льда при этом на всей акватории также гораздо выше. Вне зоны влияния оказывается узкая полоса вдоль континентального побережья и островов и один район на северо-востоке моря.

При сдвиге в 1 месяц в этом году влияние теплосодержания деятельного слоя на толщину ледяного покрова достигает своего максимального проявления. Наибольшая теснота связи проявляется в центральной области моря и у северных границ. Там величина коэффициента взаимной корреляции превышает величину, равную 0.7, а в некоторых районах достигает значения 0.9 и выше (рисунок 2б).

С дальнейшим увеличением сдвига по времени теснота связи между теплозапасом и толщиной ледяного покрова ослабевает. Наибольшее влияние теплосодержания деятельного слоя при сдвиге в 2 месяца проявляется на северо-востоке моря (рисунок 3б). В этом районе моря на участке между 170° и 180° в.д. и 75° и 77° с.ш. при дальнейшем сдвиге во времени сохраняется влияние теплосодержания деятельного слоя на эволюции ледяного покрова, но это влияние с увеличением сдвига по времени снижается. При сдвиге по времени в 4 месяца в этой области величина коэффициента взаимной корреляции не превышает 0.8, тогда как на остальной акватории Восточно-Сибирского моря теплозапас не оказывает влияние на толщину ледяного покрова (рисунок 5б).

Таким образом, при сравнении распределения полей величины взаимнокорреляционной функции при различных сдвигах во времени были выделены основные особенности влияния теплозапаса на толщину льда.

Заключение

Как показал анализ распределения значений взаимнокорреляционной функции со сдвигом по времени между рядами данных по теплозапасу деятельного слоя и толщиной ледяного покрова, можно на его основе выявить области и региональные особенности влияния теплозапаса на эволюцию ледяного покрова в разные по режиму ледовитости годы. «Теплый» год отличается от «холодного», как по размерам зоны охвата проявления наибольшей тесноты связи и ее силе, так и по степени инерционности отклика эволюции ледяного покрова на воздействие теплозапаса верхнего слоя моря.

В частности, было показано, что теплосодержание деятельного слоя оказывает значительное влияние на толщину льда, и его воздействие сказывается на почти всей акватории Восточно-Сибирского моря в «теплый» год. При этом наибольшее воздействие проявляется при сдвигах по времени до 2 месяцев с максимумом на сдвиге в 1 месяц.

В «холодный» год проявляется большая инерционность отклика толщины ледяного покрова на влияние теплозапаса деятельного слоя, и это влияние наиболее ярко выражено при смещении во времени от 2 до 3 месяцев. В отличие от 2007 года влияние теплозапаса сказывается не на всей территории Восточно-Сибирского моря, и можно выделить отдельные очаги, где теснота связи велика.

Таким образом, по значимой величине отрицательных значений взаимнокорреляционной функции можно оценить области, в которых при прогнозировании ледовых условий можно учитывать влияние теплозапаса на эволюцию ледяного покрова.

Список литературы

1. Madec G. NEMO ocean engine, Version 3.6 stable / G. Madec // Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France. – 2016. – № 27. – 396 pp.
2. GEBKO: Data and products [Электронный ресурс]: GEBKO. URL: https://www.gebco.net/data_and_products/ (дата обращения: 07.05.2017).
3. 2-Minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2v2) June, 2006 [Электронный ресурс]: NOAA. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html> (дата обращения: 10.05.2017).
4. Egbert D.G. Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides / D.G. Egbert, S.Y. Erofeeva // J. Ocean. Atmos. Technol. –2002. – V. 19. – № 10. –P. –182–204.
5. Browse reanalysis datasets [Электронный ресурс]: ECMWF. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/browse-reanalysis-datasets> (дата обращения: 12.05.2017).
6. Океанография и морской лёд / ред. И.Е. Фролов. – М.: Паулсен, 2011. – 432 с.

References

1. Madec G. NEMO ocean engine, Version 3.6 stable / G. Madec // Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France. – 2016. – № 27. – 396 pp.
2. GEBKO: Data and products [Electronic resource]: GEBKO. URL: https://www.gebco.net/data_and_products/ (date of reference: 07.05.2017).
3. 2-Minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2v2) June, 2006 [Electronic resource]: NOAA. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html> (date of reference: 10.05.2017).
4. Egbert D.G. Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides / D.G. Egbert, S.Y. Erofeeva // J. Ocean. Atmos. Technol. –2002. – V. 19. – № 10. –P. –182–204.
5. Browse reanalysis datasets [Electronic resource]: ECMWF. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/browse-reanalysis-datasets> (date of reference: 12.05.2017).
6. Oceanography and sea ice / Editor-in-chief Frolov I.Ye.–Moscow.: Paulsen Editions, 2011. – 432 pp.