



УДК 551.465.41

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ БРЕНТА-ВЯЙСЯЛЯ
В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ В СОВРЕМЕННЫХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ
ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ**

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

Аннотация

Данное исследование направлено на изучение изменений в распределении частоты Брента-Вяйсяля Восточно-Сибирского моря, вызванных потеплением климата Арктики. Эта частота рассчитана по реконструированным термохалинным полям, которые были получены с помощью региональной конфигурации модели NEMO. Проведена оценка величины частоты Брента-Вяйсяля и выявлены основные особенности её распределения в контрастные по ледовому режиму годы.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, Восточно-Сибирское море, гидрофизический режим, частота Брента-Вяйсяля, реконструированные термохалинные поля, модель NEMO

**SPECIAL FEATURES OF THE BRENT-VÄISÄLÄ FREQUENCY
DISTRIBUTION IN THE EAST SIBERIAN SEA BASED ON THE
RECONSTRUCTION OF THERMOHALINE FIELDS UNDER MODERN
CLIMATIC CONDITIONS****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 aimed on studying changes in the Brent-Väisälä frequency distribution for the East Siberian Sea caused by climate warming in the Arctic. This frequency was calculated on the basis of reconstructed thermohaline fields, which were obtained using the regional configuration of the NEMO model. An assessment of the Brent- Väisälä frequency value was

carried out and the main features of its distribution in opposite cold and warm ice condition years were revealed.

Keywords: Arctic Ocean, East Siberian Sea, hydrophysical regime, Brunt-Väisälä frequency, reconstructed thermohaline fields, NEMO model.

Введение

Современное потепление, наметившееся на территории Арктического региона [1-4], вызывает сокращение ледяного покрова особенно в летний период, а также изменения в гидрофизическом режиме его морей [5-7]. Полноценно оценить структурные изменения, происходящие в водной тоще Северного Ледовитого океана, на сегодняшний день без привлечения реконструированных термохалинных полей, полученных на основе численного моделирования, крайне сложно [8-10]. Знания о гидрофизическом режиме морей Северного Ледовитого океана в последние годы востребованы не только со стороны научного сообщества, но и со стороны секторов экономики, напрямую связанных с активизацией освоения территорий Арктического региона.

В представляемом исследовании проводится анализ одного из параметров гидрофизического режима Восточно-Сибирского моря, характеризующего устойчивость вод – квадрата частоты Брента-Вяйсяля. Расчет частоты Брента-Вяйсяля строится в данном случае на основании реконструированных модельных данных по температуре и солености. Частота Брента-Вяйсяля возрастает при увеличении устойчивости слоев морской воды, тогда как в слабо стратифицированных водах её величина уменьшается.

Материалы и методы исследования

Как уже было отмечено выше, материалом для исследования в данной работе послужили реконструированные термохалинные поля. Эти поля температуры и солености были получены в ходе численных экспериментов на адаптированной к Арктическому региону конфигурации модели NEMO (англ. The Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO)), которая подробно описана в [8, 11]. По модельным данным с помощью уравнения состояния EOS-80 [12] были произведены вычисления плотности вод бассейна Восточно-Сибирском моря. Сам расчет частоты Брента -Вяйсяля осуществлялся по следующей формуле [13]:

$$N^2 = \frac{g}{\rho} E, \quad (1)$$

где N^2 – квадрат частоты Брента-Вяйсяля, s^{-2} , g – ускорение свободного падения, m/s^2 , ρ – плотность морской воды, kg/m^3 , а E – термохалинная устойчивость слоев, kg/m^4 , полученная согласно выражению [13, 14]:

$$E = \alpha \left(\frac{dT}{dz} - \frac{dT_a}{dz} \right) + \frac{\beta dS}{dz}, \quad (2)$$

где T – температура воды in situ, $^{\circ}C$, S – соленость воды in situ, $^{\circ}/_{\infty}$, $a = dp/dT$ – коэффициент термического расширения, $kg/(m^3 \cdot ^{\circ}C)$, $\beta = dp/dS$ – коэффициент соленостного сжатия, $kg/(m^3 \cdot ^{\circ}/_{\infty})$, dT_a/dz – адиабатический градиент температуры, $^{\circ}C/m$.

Анализ распределения рассчитанного квадрата частоты Брента-Вяйсяля был произведен для различных по ледовому режиму лет. Из них в качестве «холодного» года был взят за основу 2004 г., а 2007, 2012 и 2016 гг. рассматривались, как «теплые». Причем наибольшие контрасты в ледовом режиме наблюдались между 2004 и 2007 гг. Для анализируемых лет были построены поля осредненных за год величин квадрата частоты Брента-Вяйсяля в верхнем 10-метровом слое моря. Также была проведена визуализация распределения квадрата частоты Брента-Вяйсяля на разрезе с дискретностью 5 суток для

каждого расчетного года. Выбранный для демонстрации структурных изменений в распределении частоты Брента-Вяйсяля разрез проходил через акваторию Восточно-Сибирского моря с северо-востока из точки с координатами 72.8391° с.ш. и 179.9294° в.д. на юго-запад до точки с координатами 72.2266° с.ш. и 148.5324° в.д. Протяженность данного разреза составила 1038.6 км.

Результаты и их обсуждение

В период потепления климата в Арктическом регионе, помимо изменений в температурном режиме водной толщи, имеется тенденция к постепенному уменьшению величины солёности в целом на всей акватории бассейна Восточно-Сибирского моря в верхнем 10-метровом слое, что продемонстрировано на рисунке 1. Такие изменения отражаются и на распределении плотности морской воды и частоты Брента-Вяйсяля в бассейне Восточно-Сибирского моря. Так при сравнительном анализе выбранных лет проинтегрированная в 10-метровом слое и осредненная за год величина квадрата частоты Брента-Вяйсяля уменьшается на всей акватории моря в «теплые» годы (рис. 3) по сравнению с «холодным» годом (рис. 2). При этом максимальные величины на локальных участках акватории моря достигают самого большого значения 0.054 с^{-1} в 2004 г., наименьшего значения 0.037 с^{-1} – в 2007 г., а в 2012 и 2016 гг. постепенно незначительно возрастают до величин 0.042 с^{-1} и 0.044 с^{-1} , соответственно.

На этих рисунках также прослеживаются пространственные изменения в распределении величин N^2 , осредненных за год в верхнем слое моря. В центральной части исследуемого моря между 153 и 165° в.д. отмечается снижение величины квадрата Брента-Вяйсяля по 2012 г. В 2016 г. (рис. 3в) на этом участке вблизи его южной и северной границы отмечается незначительный рост величины N^2 . По сравнению с 2004 г. в «теплые» годы постепенно исчезает локальный очаг повышенных величин квадрата частоты Брента-Вяйсяля севернее островов Анжу.

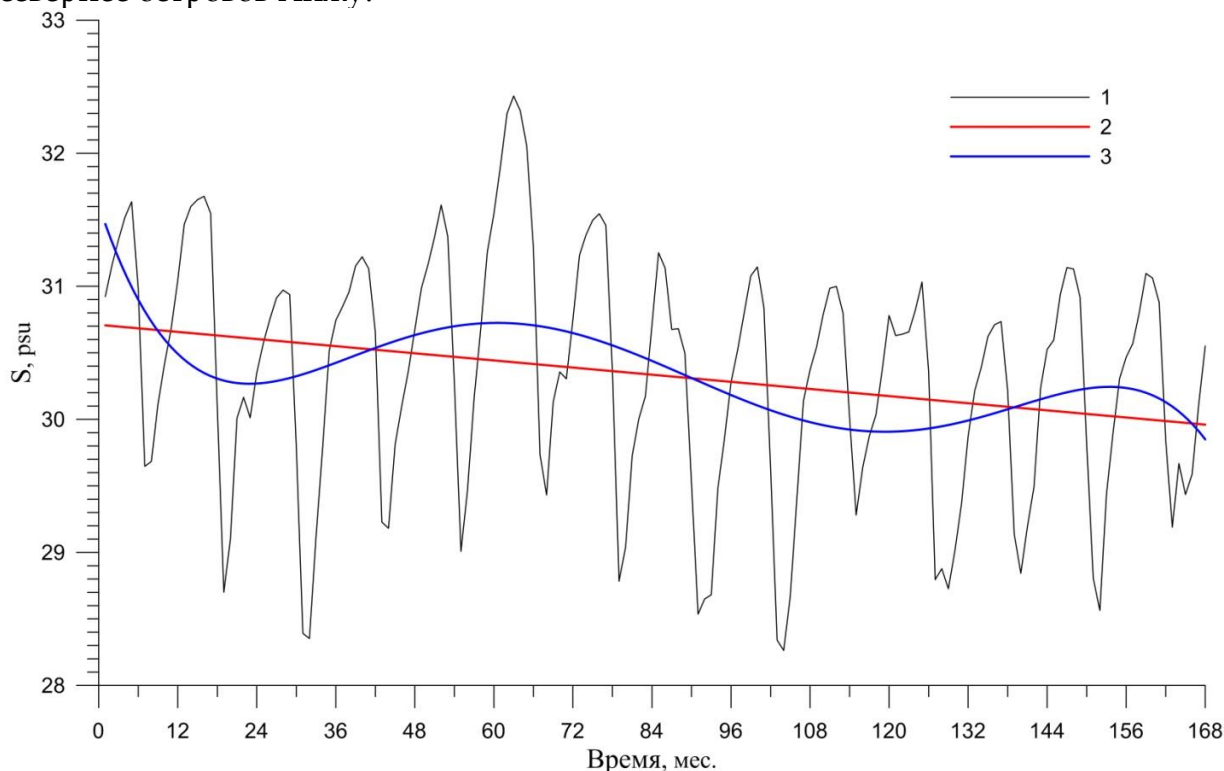


Рисунок 1. Временной ход среднемесячной солёности, осредненной по площади Восточно-Сибирского моря в верхнем 10 м слое с 2003 г. по 2016 г. по данным численных экспериментов региональной модели NEMO (1- временной ход солёности, 2- линейный тренд солёности, 3-полиномиальный тренд солёности 4 порядка)

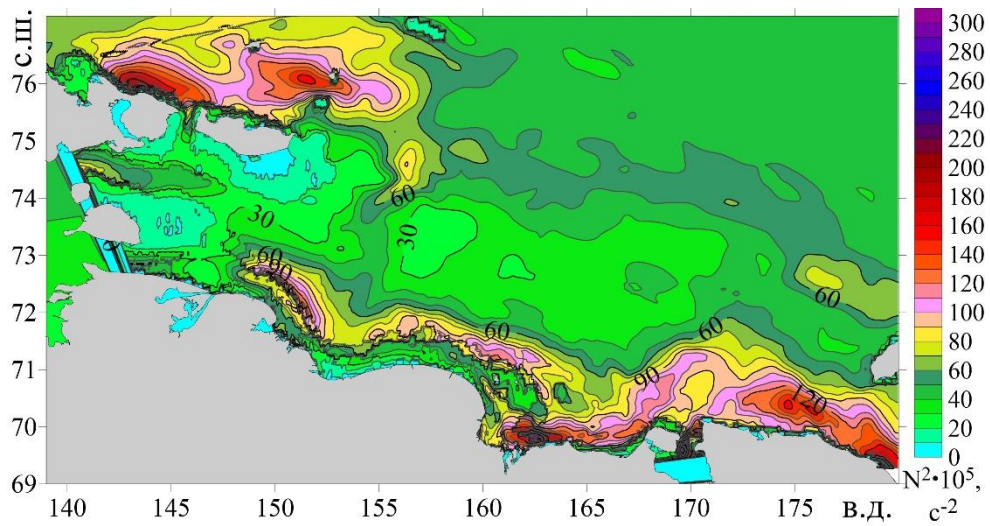
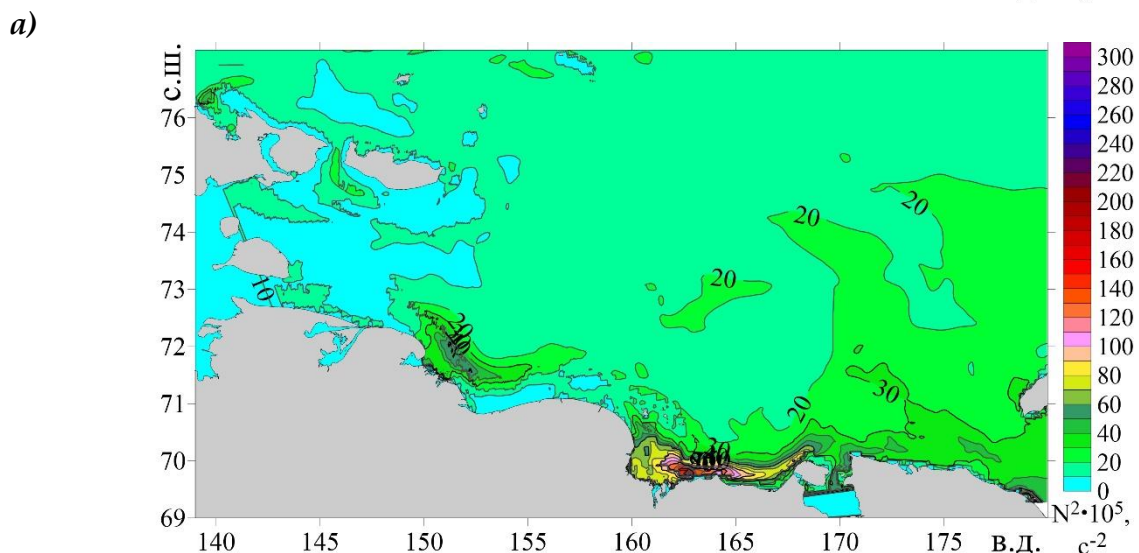
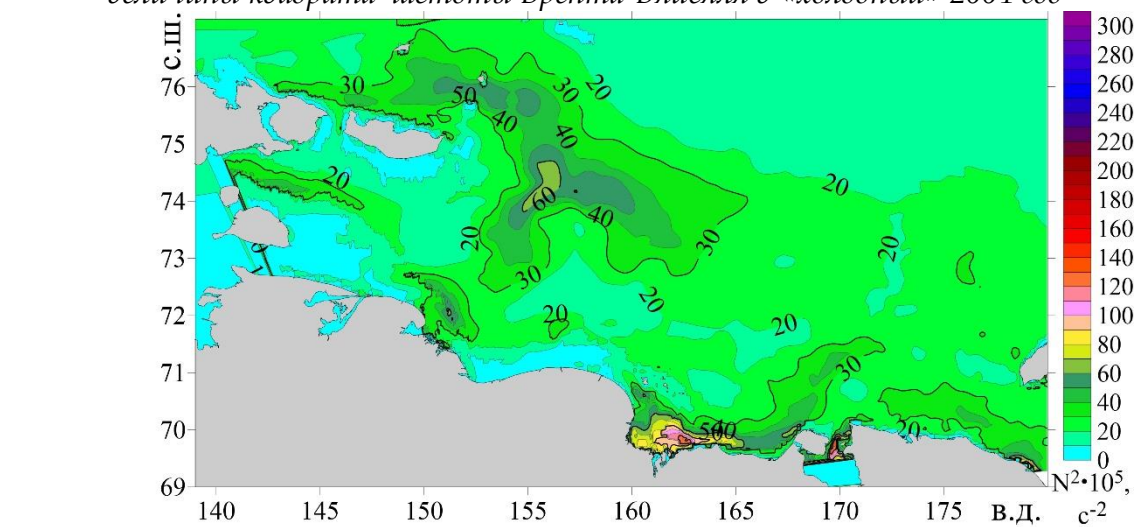
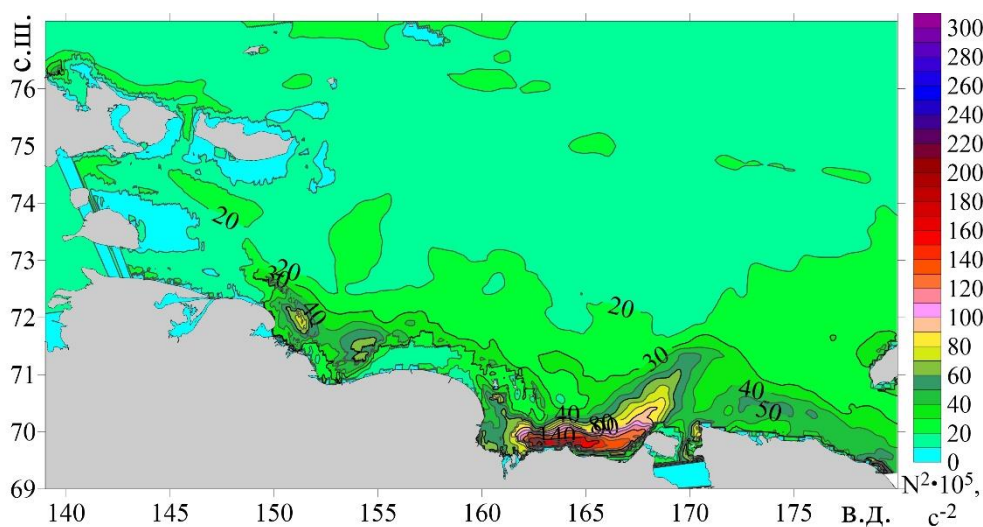


Рисунок 2. Распределение проинтегрированной в слое толщиной 10м и осредненной за год величины квадрата частоты Брента-Вяйсяля в «холодный» 2004 год





в)

Рисунок 3. Распределение проинтегрированной в слое толщиной 10м и осредненной за год величины квадрата частоты Брента-Вяйсяля в «теплые» годы: а) 2007 г., б) 2012 г., в) 2016 г.

Сравнение величины частоты Брента-Вяйсяля в верхнем слое толщиной 10м со значением этой частоты Брента-Вяйсяля в верхнем перемешанном слое на основании расчетов по натурным данным [7] показало отличие величин между собой. В один и тот же временной интервал летне-осеннего периода 2007 г. в северо-западной части Восточно-Сибирского моря по модельным данным частота Брента-Вяйсяля составляла 0.024 с^{-1} , а по натурным данным равнялось 0.077 с^{-1} . Такое отличие может быть связано в том числе с разной дискретностью и регулярностью данных, расчетной площадью, толщиной интегрирования слоя и расчетными горизонтами.

Рассматривая распределение величины изучаемого параметра гидрофизического режима на разрезе Восточно-Сибирского моря, также можно отметить в целом уменьшение его значений в «теплые» годы, по сравнению с «холодным». Во внутригодовом ходе прослеживается аналогичная тенденция.

В зимний период года распределение N^2 отличается большей однородностью в распределении по глубине почти без переслоенности. В «холодный» год слой с ярко выраженным максимумом проявляется почти на всем протяжении разреза. На глубоководном участке разреза на расстоянии 0 – 380 км максимальные значения выделяются на глубинах от 17 до 33 м, мигрируя на расстоянии 380 – 650 км от начала разреза на глубины от 22 до 13 м, а также на мелководье на расстоянии 840 – 1000 км между глубинами 3 и 14 м (рис 4а). С января по февраль минимальные величины были отмечены в зоне между 650 – 840 км от начала разреза. В «теплые» годы наблюдается несколько отличное распределение зон наибольших величин квадрата частоты Брента-Вяйсяля. От года к году происходит постепенное ослабевание N^2 в глубоководной части разреза – 0 – 400 км от его начала.

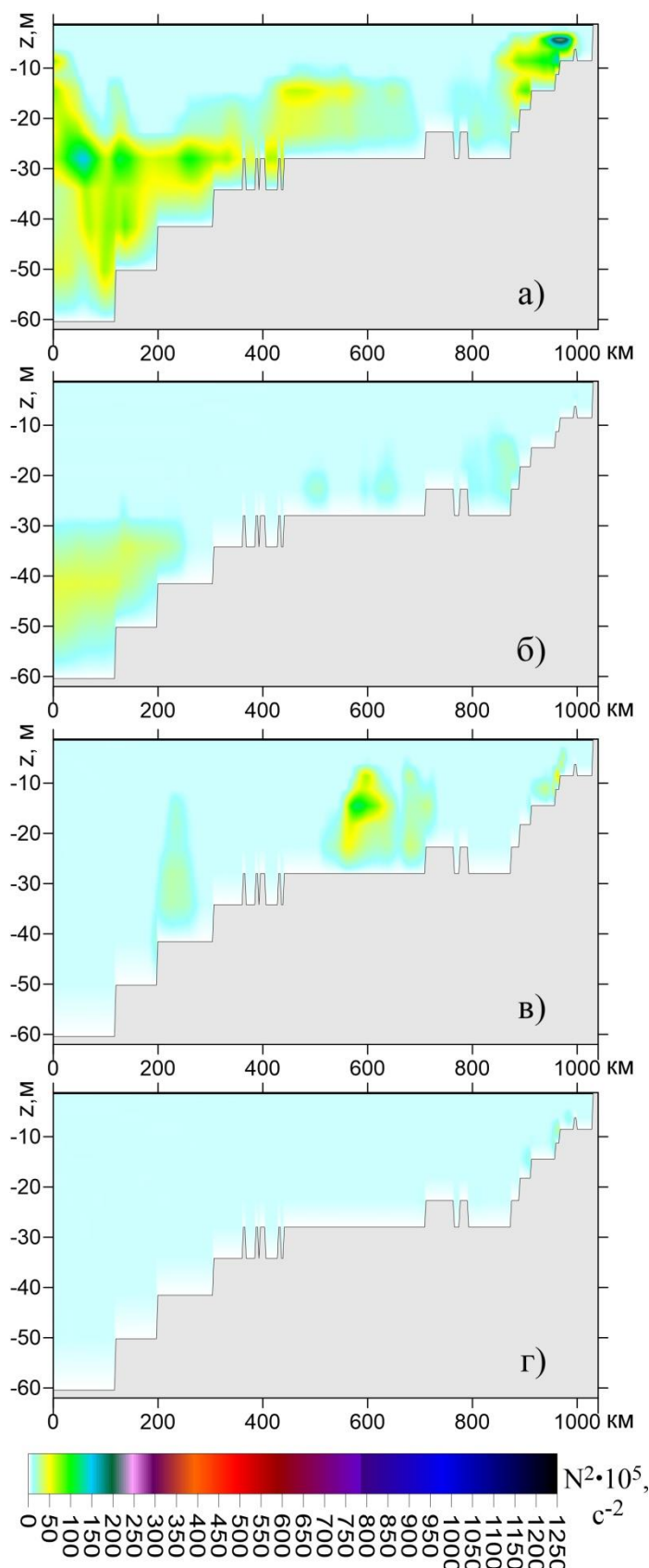


Рисунок 4. Распределение N^2 на разрезе 15 января в контрастные по режиму годы: а) 2004 г., б) 2007 г., в) 2012, г) 2016 г.

Если в 2007 г. там проявляется достаточно мощный слой максимальных величин N^2 , то уже в 2016 г. на этом участке очаг повышенных величин полностью отсутствует (рис. 4б, 4в, 4г). В 2007 и 2012 гг. области повышенных значений N^2 прослеживаются в средней

части разреза и на его окончании ближе к берегу. В 2016 г. только на расстоянии от 800 до 100 км выделяется зона с максимальными величинами N^2 (рис. 4г).

Весной в целом начинает возникать расслоенность в вертикальной структуре распределения N^2 на разрезе, особенно к концу сезона. Слои повышенных величин квадрата частоты Брента-Вяйсяля мигрируют по глубине. К окончанию весеннего сезона верхний слой повышенных величин поднимается ближе к поверхности моря, меняя на всем протяжении разреза свою интенсивность и мощность. Причем наибольшая расслоенность на всем протяжении этого календарного сезона характерна для «холодного» года. В «теплые» годы на фоне низких фоновых величин N^2 возникают локальные очаги повышенных величин вплоть до середины мая (рис. 5б - 5г), и только к окончанию весеннего сезона начинает проявляться расслоенность в структуре с постепенным увеличением самих величин N^2 . Среди «теплых» лет по наибольшим величинам значения N^2 в этот календарный сезон выделяется 2007 г.

С началом лета продолжает усиливаться расслоенность в структуре распределения N^2 . Количество слоев с ярко выраженными повышенными величинами квадрата частоты Брента-Вяйсяля колеблется от 3 до 4. Толщина этих слоев уменьшается (рис.6). Градиенты величин в них обостряются к концу июня. Причем в «холодный» год это происходит несколько позднее. В 2004 г. максимальные величины проявляются в верхнем слое среди слоев с повышенными значениями N^2 . В «теплые» годы до начала июля максимальные значения в целом присущи второму от поверхности слою повышенных значений N^2 .

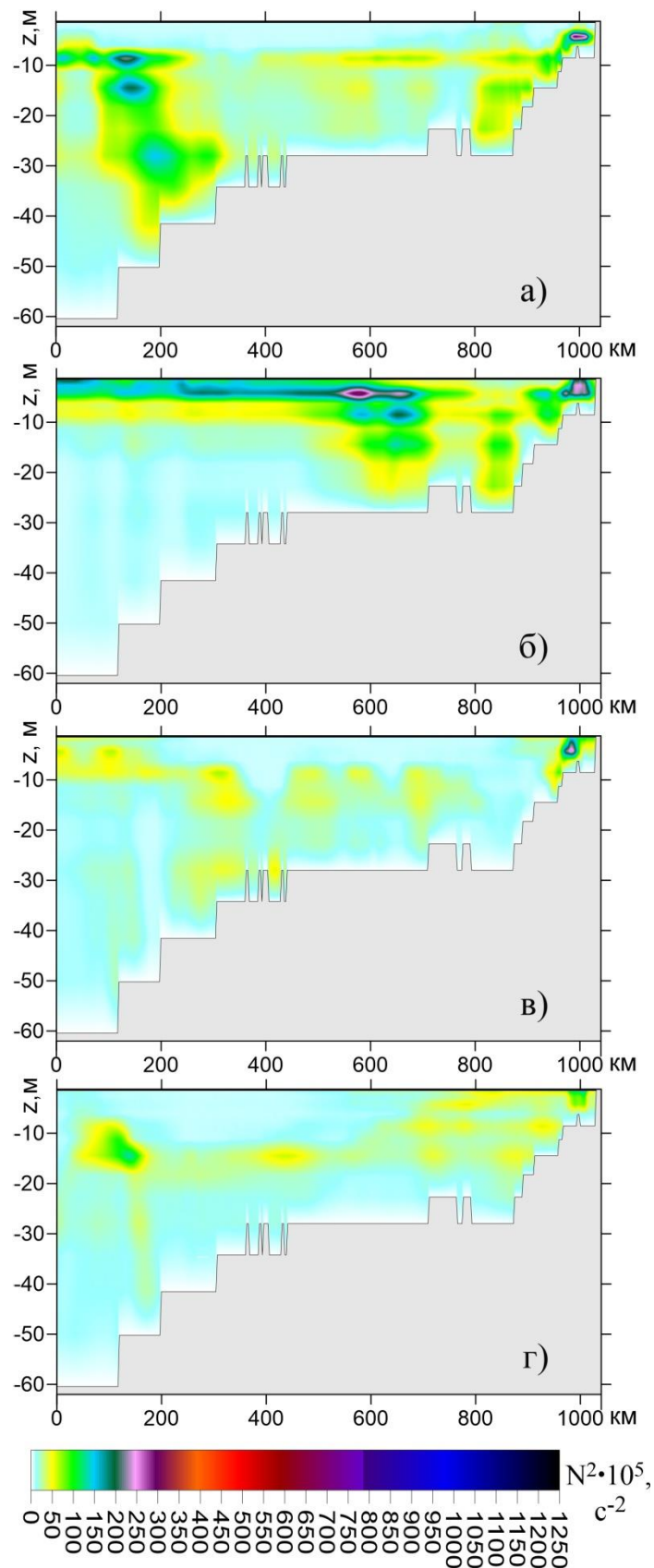


Рисунок 5. Распределение N^2 на разрезе 25 мая в контрастные по режиму годы: а) 2004 г., б) 2007 г., в) 2012, г) 2016 г.

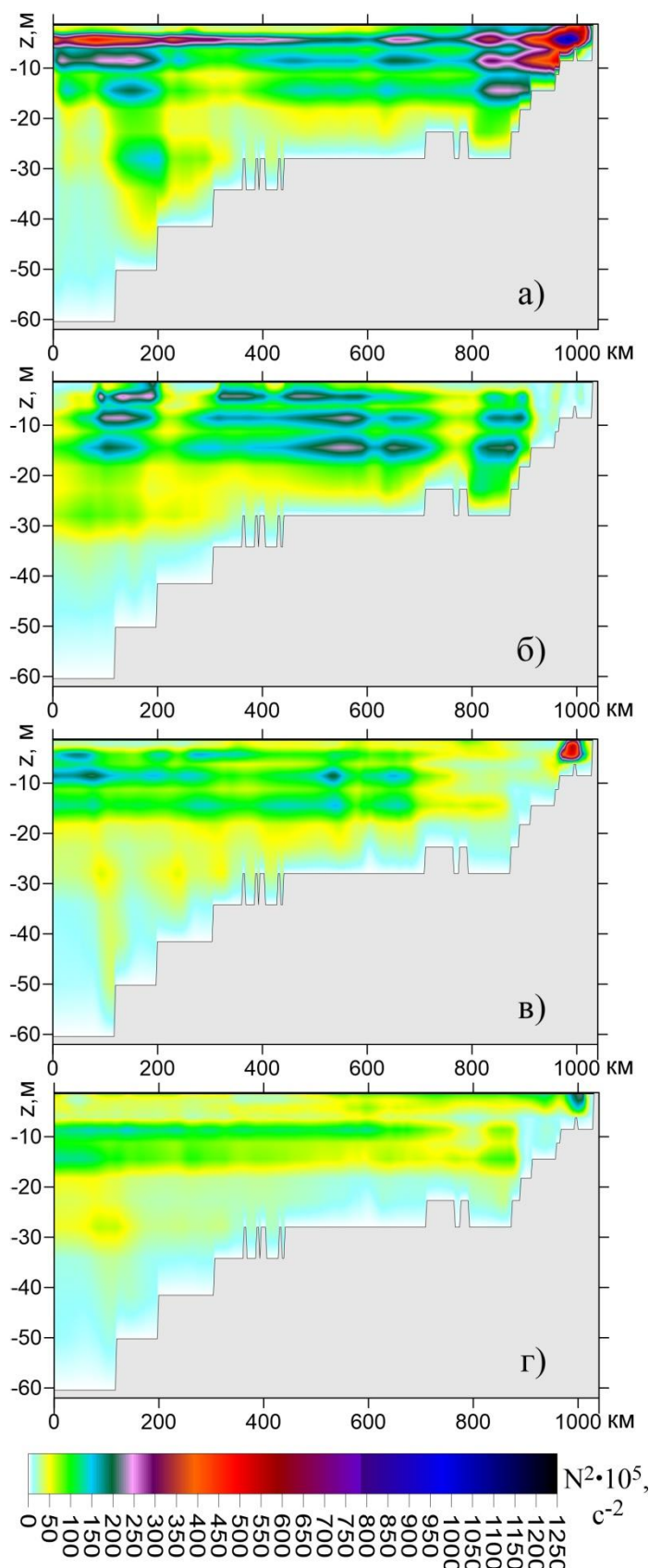


Рисунок 6. Распределение N^2 на разрезе 5 июля в контрастные по режиму годы: а) 2004 г., б) 2007 г., в) 2012, г) 2016 г.

К тому же в пространственном распределении прослеживаются участки на разрезе, где в этот период времени наблюдаются постоянно повышенные по сравнению с другими участками разреза величины исследуемого параметра. Это – мелководная зона вблизи берега на окончании разреза и зона в начале разреза на расстоянии 0 – 200 км.

В 2007 г. выделялась еще одна область на участке разреза между его 550 – 750 км. С середины июля расслоенность вертикальной структуры начинает ослабевать. Причем в «теплые» годы расслоенность по вертикали ослабевает быстрее (рис. 7). К концу августа на участке разреза на расстоянии между 450 – 600 км (рис. 7б - 7г) в эти годы по сравнению с «холодным» значительно уменьшается по величине значение N^2 , а его распределение по вертикали становится почти однородным.

К началу осеннего календарного сезона слои максимальных величин мигрируют с поверхности на глубину. Верхний слой повышенных значений N^2 смещается на глубину ниже 10 м в глубоководной части разреза. С сентября вблизи берега на мелководье зона повышенных величин периодически то увеличивается, то вырождается, особенно в «теплые» годы. В годы с таким ледовым режимом ослабевает область повышенных величин квадрата частоты Брента-Вяйсяля в глубоководной части разреза на расстоянии 0 – 600 км от начала разреза (рис. 8), особенно в 2007 и 2016 гг. На протяжении всего периода выхолаживания центральная часть разреза между 500 и 800 км характеризуется минимальными величинами N^2 . С октября по декабрь максимальные величины квадрата частоты Брента-Вяйсяля прослеживаются на мелководном участке бассейна. Слоистая структура вертикального распределения N^2 трансформируется в структуру с локальными областями ее повышенных величин.

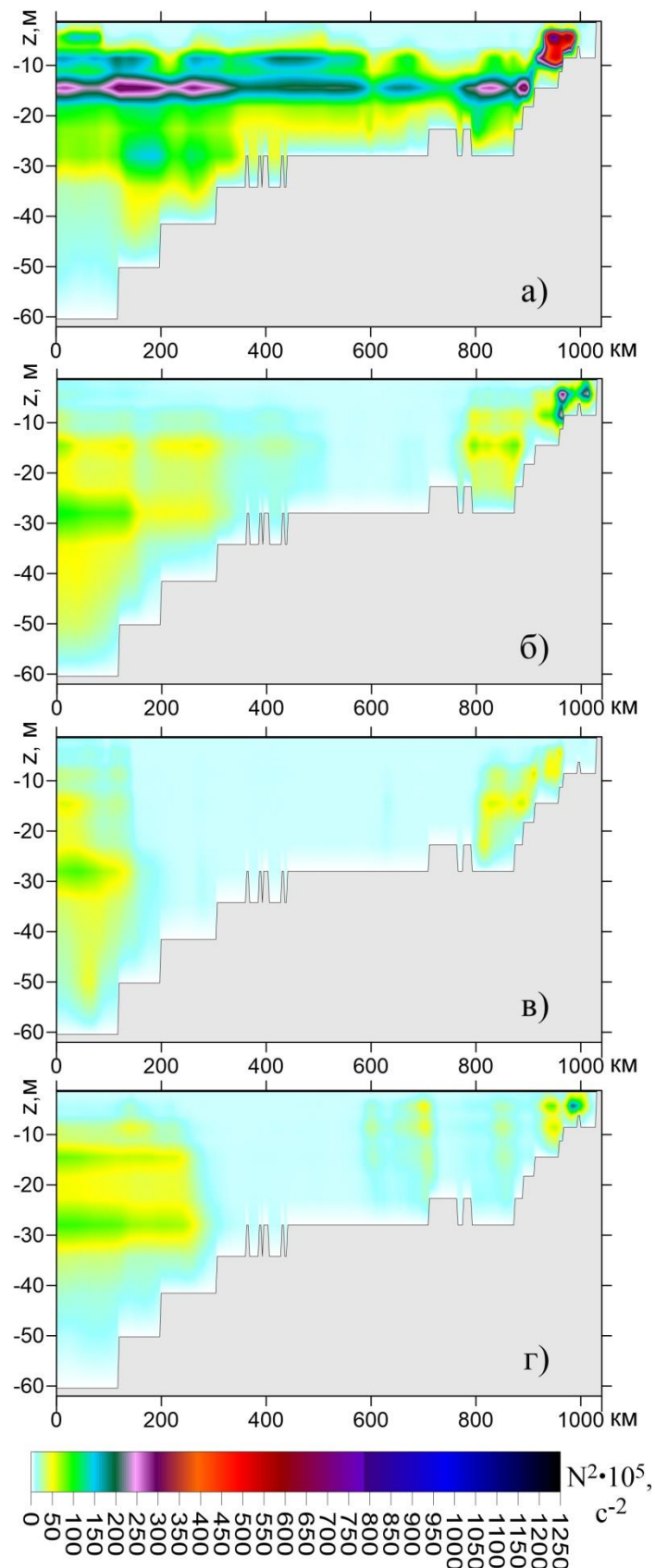


Рисунок 7. Распределение N^2 на разрезе 24 августа в контрастные по режиму годы: а) 2004 г., б) 2007 г., в) 2012, г) 2016 г.

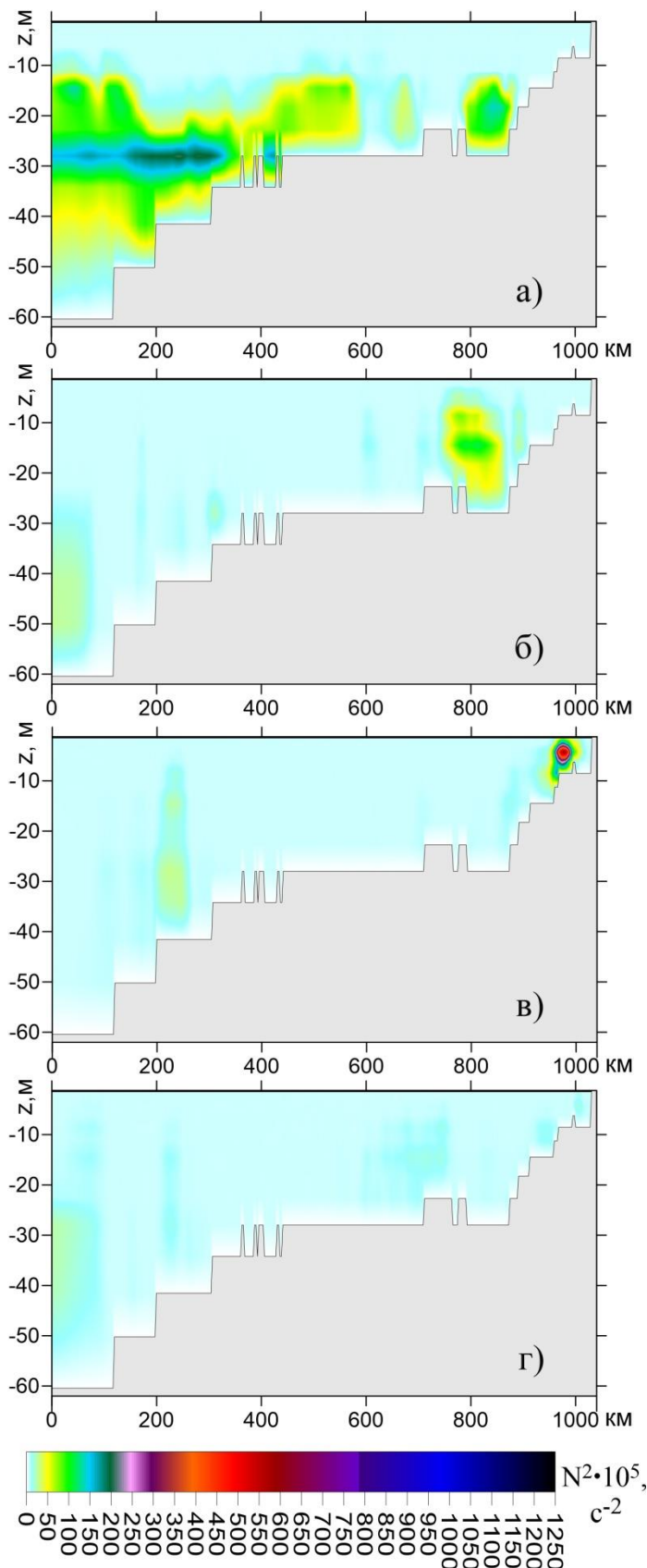


Рисунок 8. Распределение N^2 на разрезе 28 сентября в контрастные по режиму годы: а) 2004 г., б) 2007 г., в) 2012, г) 2016 г.

Заключение

Сравнительный анализ распределения квадрата частоты Брента-Вяйсяля, рассчитанной по реконструированным термохалинным полям, показал, что современное

потепление климата вызывает изменение его распределения на акватории Восточно-Сибирского моря, в частности:

- в «теплые» годы в целом стала намечаться тенденция по снижению величин частоты Брента-Вяйсяля как по площади Восточно-Сибирского моря в верхнем слое толщиной 10м, так и по всей глубине разреза, проходящего через акваторию моря с северо-востока на юго-запад,
- в верхнем слое центральной части моря при потеплении климата стала исчезать область повышенных величин частоты Брента-Вяйсяля севернее островов Анжу,
- на разрезе в «теплые» годы в целом прослеживается менее ярко выраженная расслоенность вертикальной структуры распределения N^2 , чем в «холодные».

Благодарности. Работа выполнена в рамках ЦНТП Росгидромета по теме 1.5.3.5.

Список литературы

1. Overland J.E., Wang M., Salo S. The recent Arctic warm period // *Tellus*. 2008. P. 1–9.
2. Kattsov V., Ryabinin V., Overland J., Serreze M., Visbeck M., Walsh J., Meier W., Zhang X. 2010: Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science // *Journal of Glaciology*. 2010. V. 56, № 200. P. 1115–1121.
3. Callaghan T. V., Johansson M., Key J. et al. Feedbacks and interactions: From the Arctic cryosphere to the climate system // *Ambio*. 2011. V. 40. P. 75–86.
4. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 2. С. 5–19.
5. Океанография и морской лёд / Под ред. И.Е. Фролова. М.: Паулсен, 2011. – 432 с.
6. Davis P.E., Lique C., Johnson H.L., Guthrie J.D. Competing Effects of Elevated Vertical Mixing and Increased Freshwater Input on the Stratification and Sea Ice Cover in a Changing Arctic Ocean // *American Meteorological Society*. 2016. V 46. P. 1531 – 1553.
7. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Carmack E.C. Stability of the arctic halocline: a new indicator of arctic climate change // *Environmental Research Letters*. 2018. V 13. P 1–8.
8. Даньшина А.В. Влияние теплозапаса деятельного слоя Восточно-Сибирского моря на эволюцию ледяного покрова // *Оригинальные исследования*. 2018. Т.8, № 5. С. 4–15.
9. Дианский Н.А., Фомин В.В., Чумаков М.М., Степанов Д.В. Ретроспективные расчеты циркуляции и ледяного покрова Охотского моря на основе современных технологий численного моделирования // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки»*. 2017. № 4 (32). С. 82–93.
10. Чанцев В. Ю., Гудошников Ю. П., Плешанов Д.А., Скутин А. А., Даньшина А. В. Многофункциональная комплексная модель водной системы Обской губы // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки»*. 2018. №4 (36). С.139 –148.
11. Madec G. NEMO ocean engine, Version 3.6 stable // *Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France*. 2016. № 27. 396 pp.
12. Fofonoff N.P., Millard R.C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater // *UNESCO Technical papers in marine science*. 1983. V. 44. p.53.
13. Шутова М.М. Общая океанология. Гидрофизика океана. Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2012. 151 с.
14. Океанографические таблицы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 477 с.

References

1. Overland J.E., Wang M., Salo S. The recent Arctic warm period // *Tellus*. 2008. P. 1–9.

2. Kattsov V., Ryabinin V., Overland J., Serreze M., Visbeck M., Walsh J., Meier W., Zhang X., 2010: Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science // *Journal of Glaciology*. 2010. V. 56, № 200. P. 1115–1121.
3. Callaghan T. V., Johansson M., Key J. et al. Feedbacks and interactions: From the Arctic cryosphere to the climate system // *Ambio*. 2011. V. 40. P. 75–86.
4. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V. Jevoljucija ploshhadi morskogo ledovogo pokrova Arktiki v uslovijah sovremennyh izmenenij klimata // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2015. № 2. pp. 5–19 (In Russian).
5. Okeanografija i morskoy ljod / Pod red. I.Ye. Frolova. M.: Paulsen, 2011. 432 p. (In Russian).
6. Davis P.E, Lique C., Johanson H.L., Guthrie J.D. Competing Effects of Elevated Vertical Mixing and Increased Freshwater Input on the Stratification and Sea Ice Cover in a Changing Arctic Ocean // *American Meteorological Society*. 2016. V 46. P. 1531 – 1553.
7. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Carmack E.C. Stability of the arctic halocline: a new indicator of arctic climate change // *Environmental Research Letters*. 2018. V 13. P 1-8.
8. Danshina A.V. Vlijanie teplozapasa dejatel'nogo sloja Vostochno-Sibirskogo morja na jevoljuciju ledjanogo pokrova // *Original'nye issledovanija*, 2018. T 8, № 5. S. 4–15. (In Russian).
9. Dianskij N.A., Fomin V.V., Chumakov M.M., Stepanov D.V. Retrospektivnye raschety cirkulyacii i ledyanogo pokrova Oxotskogo morya na osnove sovremennyx tehnologij chislennogo modelirovaniya // *Nauchno-texnicheskij sbornik «Vesti gazovoj nauki»*. 2017. № 4 (32). S. 82–93. (In Russian).
10. Chancev V. Yu., Gudoshnikov Yu. P., Pleshanov D.A., Skutin A. A., Dan`shina A. V. Mnogofunkcional'naya kompleksnaya model' vodnoj sistemy Obskoj guby // *Nauchno-texnicheskij sbornik «Vesti gazovoj nauki»*. 2018. №4 (36). S.139 –148 (In Russian).
11. Madec G. NEMO ocean engine, Version 3.6 stable // *Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France*. 2016. № 27. 396 pp.
12. Fofonoff N.P., Millard R.C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater // *UNESCO Technical papers in marine science*. 1983. V. 44. p.53.
13. Shutova M.M. Obshhaja okeanologija. Gidrofizika okeana. Vladivostok: Izdatel'skij dom Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta, 2012. 151 s. (In Russian).
14. Okeanograficheskie tablicy. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 477 s. (In Russian).