

УДК 551.465.41

А.В. Даньшина¹, В.В. Иванов², В.Ю. Чанцев³

ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ НА ФОНЕ СОКРАЩЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Рассчитаны основные критерии вертикальной устойчивости вод верхнего 100-метрового слоя моря Лаптевых по реконструированной пространственно-временной изменчивости трехмерной структуры температуры и солёности, полученной на основании численных экспериментов на адаптированной для условий Северного Ледовитого океана региональной конфигурации математической модели NEMO. Результаты моделирования представлены на вертикальном разрезе, пересекающем как мелководную, так и глубоководную части моря. Проведенное исследование выявило структурные изменения в распределении вертикальной устойчивости вод в море Лаптевых в отдельные периоды потепления и сокращения ледяного покрова в начале XXI века. В эти периоды чаще стали возникать условия, благоприятствующие развитию полной вертикальной устойчивости вод. В рассматриваемые «теплые» годы диапазон изменения величины частоты Брента-Вайсяля уменьшился по сравнению с «холодным» 2004 годом. Мощность слоя максимальных значений частоты Брента-Вайсяля становится больше в периоды таяния льда. В то же время отрицательная термохалинная устойчивость более интенсивно проявилась в весенний период в мелководных районах моря, охватывая более мощный поверхностный слой. В зимний период «теплых» лет площадь разреза с положительным критерием термохалинной устойчивости сократилась как в глубоководной, так и в мелководной части разреза. Толщина слоя с отрицательными значениями плотностного соотношения достигла максимальных значений летом в «теплые» годы.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, поверхностный слой, устойчивость, стратификация, частота Брента-Вайсяля

Введение. Климатические особенности Северного Ледовитого океана (СЛО) в значительной степени обусловлены его географическим расположением в приполюсном районе Северного полушария в окружении материков. Отличительной чертой СЛО, определяющей его особое место в климатической системе Земли, является наличие постоянного ледяного покрова, контролирующего характер вертикального распределения гидрологических характеристик. Резкое сокращение площади ледяного покрова в летний сезон в 1990–2000-е гг. с рекордной за всю историю спутниковых наблюдений минимальной площадью льда в сентябре 2012 г. (3,37 млн км²) позволяет предполагать соответствующий «отклик» в гидрологической структуре вод вследствие значимых изменений баланса тепла на границе океана и атмосферы. Эти изменения в первую очередь можно ожидать в окраинных морях, где амплитуда внутригодовых колебаний ледовитости максимальна. Именно в этих географических районах предполагается возрастание экономической активности, связанной с разработкой шельфовых месторождений полезных ископаемых и активизацией мореплавания. Значимость эффекта от происходящих в различных районах Арктики многофакторных изменений [Overland et al., 2008; Alekseev et al., 2009; Kattsov et al., 2010; Callaghan et al., 2011; Алексеев

и др., 2015] может быть оценена через изменения вертикальной структуры окраинных морей СЛО как компактных географических объектов, наиболее быстро реагирующих на внешние воздействия [Волков, Лукин, 1985; Вертикальная ..., 1987; Rudels et al., 1991; Poloukhin et al., 2003; Тимохов, Чернявская, 2009; Океанография ..., 2011; Davis et al., 2016; Polyakov et al., 2018]. Поскольку большую часть года многие из арктических морей покрыты ледяным покровом, затрудняющим проведение натуральных измерений, а имеющаяся спутниковая информация и данные с дрейфующих станций и буев не восполняют в полной мере данные по гидрологическому режиму СЛО, то наиболее изученным остается распределение гидрофизических параметров водной толщи в летний период. Для пополнения знаний о структуре вод и о физических процессах прибегают к численному моделированию на разработанных моделях океана.

В данной работе по реконструированным полям температуры и солёности выделены структурные изменения в распределении вертикальной устойчивости (как интегрального показателя изменений вертикальной структуры, количественно выраженного через плотностную стратификацию) вод в море Лаптевых в современный период потепления и сокращения ледяного покрова. Выбор для задач ис-

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, отдел океанологии, науч. с., канд. физ.-матем. н.; e-mail: dandshina@aari.ru

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, вед. науч. с., докт. физ.-матем. наук; e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежной зоной, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: val@rshu.ru

следования именно моря Лаптевых продиктован следующими соображениями. Во-первых, в географическом аспекте море Лаптевых можно рассматривать как своеобразный «центр» сибирской морской Арктики, поскольку это море в зависимости от конкретных синоптических условий может испытывать влияние обоих сопредельных океанов. Во-вторых, значительное число натуральных исследований, выполнившихся в море Лаптевых с 1970-х гг., например, [Система ..., 2009; Океанография ..., 2011] дают подробное представление о пространственном распределении гидрологических характеристик до начала современных климатических изменений, что позволяет рассматривать выбранный для анализа разрез в центральной части моря как репрезентативный, позволяющий оценить генеральные временные изменения. Оценка этих изменений рассматривалась в верхнем слое толщиной 100 м, являющимся самым изменчивым слоем Северного Ледовитого океана [Гарманов и др., 2008]. Для выявления структурных изменений проводился анализ критериев вертикальной устойчивости вод за временной период 2002–2018 гг. Для наглядности, изменения, происходящие в плотностной стратификации вод моря Лаптевых, в данной статье демонстрируются в контрастные по ледовому режиму годы. В качестве года с ледовым режимом, соответствующим «холодному», был выбран 2004 г. К «теплым» периодам с легкими ледовыми условиями были отнесены 2007, 2012 и 2016 гг. на основании обзорных ледовых карт [Обзорные ..., 2019] и информации из ежеквартальных информационных бюллетеней [Обзор гидрометеорологических ..., 2019]. Приведенная ледовитость моря Лаптевых [AARI WDC ..., 2019] для выбранных лет с июня по ноябрь представлена в таблице.

Материалы и методы исследований. Основу исследования составили данные, полученные в ходе численных экспериментов на адаптированной для условий Северного Ледовитого океана и валидированной региональной конфигурации модели NEMO [NEMO, 2019] с высоким пространственным разрешением [Даньшина, 2018]. По реконструированному модельным полям температуры и солености была рассчитана плотность воды на акватории моря по уравнению EOS-80 [Fofonoff et al., 1983]. Для анализа вертикальной стратификации моря Лаптевых были получены величины ряда традиционных критериев устойчивости. Их расчет производился в слоях расчетной сетки модели по вертикали. Оценка термохалинной устойчивости слоев производилась согласно формуле [Океанографические ..., 1975; Шутова, 2012]:

$$E = \alpha \left(\frac{dT}{dz} - \frac{dT_a}{dz} \right) + \frac{\beta dS}{dz} = E_T + E_S, \quad (1)$$

где E – термохалинная устойчивость (кг/м^4), T – температура воды *in situ* ($^{\circ}\text{C}$), S – соленость воды *in situ* (‰), $\alpha = d\rho / dT$ – коэффициент термического расширения ($\text{кг/м}^3\text{C}$), $\beta = d\rho / dS$ – коэффициент соленостного сжатия ($\text{кг/м}^3\text{‰}$), dT_a / dz – адиабатический градиент температуры, а E_T и E_S – тем-

Таблица

Приведенная ледовитость моря Лаптевых, тыс. км²

Год	Месяц					
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь
2004	594,5	498,5	342	293,5	559,9	646,8
2007	414,4	239,4	145,4	112	312,5	645,4
2012	415,6	165,8	38,7	6,7	202,6	589,7
2016	511,6	399,5	201,3	95,1	214,8	570,8

пературная и соленостная компоненты устойчивости (кг/м^4), соответственно.

Для определения вклада температуры и солености в устойчивость рассчитывалась величина плотностного соотношения R_p :

$$R_p = - \frac{E_T}{E_S}. \quad (2)$$

Также для выявления изменений распределения устойчивости вод моря Лаптевых был привлечен еще один параметр плотностной стратификации – квадрат частоты Брента-Вяйсяля:

$$N^2 = \frac{g}{\rho} E, \quad (3)$$

где N^2 – квадрат частоты Брента-Вяйсяля (с^{-2}), g – ускорение свободного падения (м/с^2), ρ – плотность морской воды (кг/м^3).

По приведенным выше критериям были выделены четыре основных типа стратификации, согласно классификации К.Н. Федорова [1991]:

- полная или абсолютная устойчивость (ПУ): $\Delta T < 0, \Delta S > 0, E_T > 0, E_S > 0, R_p < 0$;
- стратификация по типу солевых пальцев (СП): $\Delta T < 0, \Delta S < 0, E_T > 0, E_S < 0, R_p > 0$;
- стратификация по типу послонной конвекции (ПК): $\Delta T > 0, \Delta S > 0, E_T < 0, E_S > 0, R_p > 0$;
- абсолютная неустойчивость (АН): $\Delta T > 0, \Delta S < 0, E_T < 0, E_S < 0, R_p < 0$.

Результаты исследований и их обсуждение.

Визуализация тенденций изменений, происходящих в вертикальной стратификации вод моря Лаптевых, была произведена на разрезе общей протяженностью 747 км. Данный разрез расположен в центральной части моря и ориентирован с северо-востока на юго-запад (врезка на рис. 1А). Он начинается в точке с координатами 78.61008° с. ш. и 132.27700° в. д. в глубоководной части моря, а завершается в точке с координатами 74.14841° с. ш. и 110.52970° в. д. на шельфе. На представленных в работе рисунках продемонстрировано распределение квадрата частоты Брента-Вяйсяля, устойчивости, плотностного соотношения и типов стратификации вод на 15 января, 24 июня, 13 августа и 22 октября 2004, 2007 и 2016 гг.

При рассмотрении распределения рассчитанных критериев устойчивости на данном разрезе можно выделить явные структурные изменения стратификации между «холодными» и «теплыми» периодами, что проявляется и в их сезонном ходе.

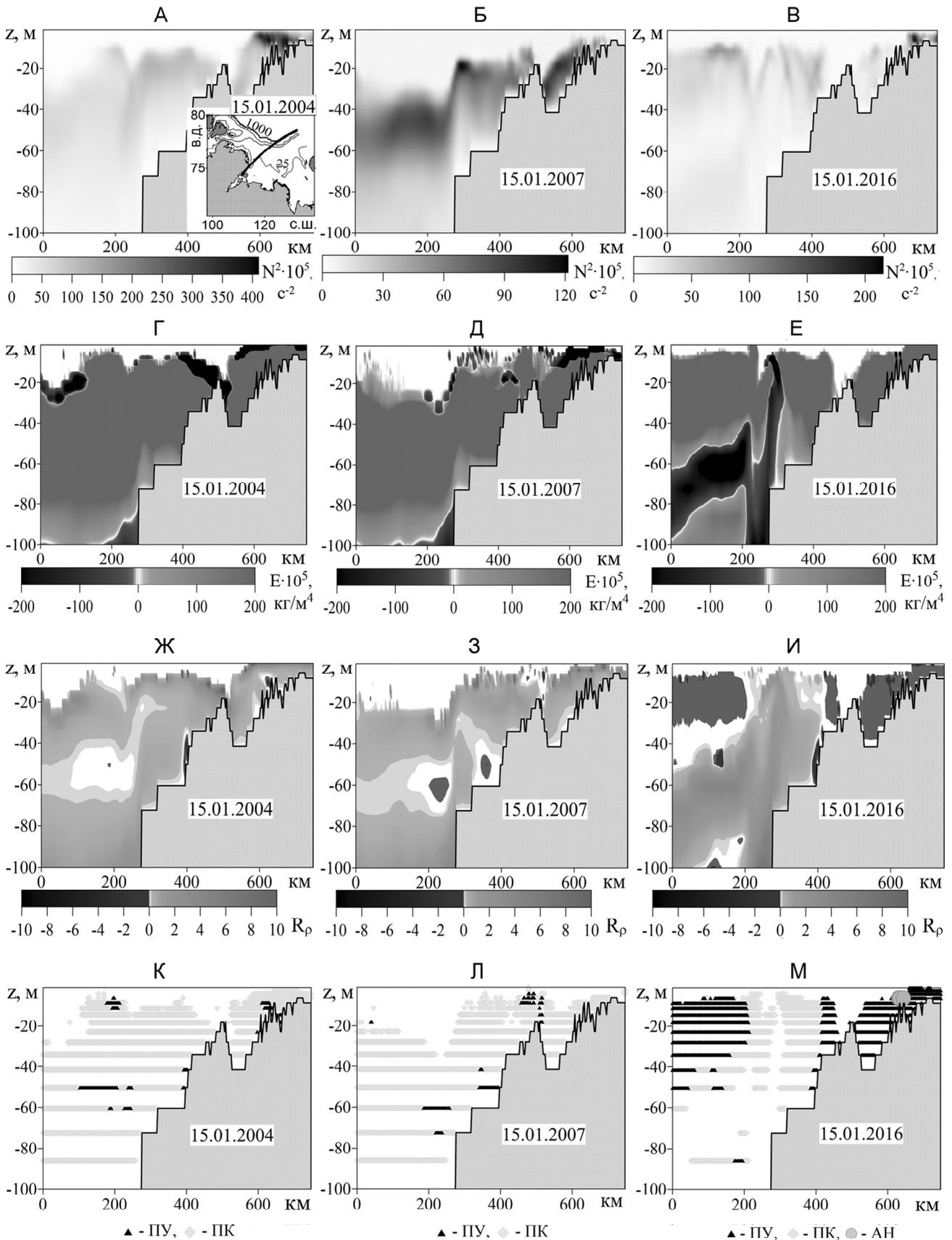


Рис. 1. Распределение критериев устойчивости на разрезе 15 января 2004, 2007 и 2016 гг.: N^2 (А, Б, В), E (Г, Д, Е), R_ρ (Ж, З, И) и типа стратификации по Фёдорову (К, Л, М), в соответствии с годами

Fig. 1. Distribution of stability criteria along the cross section on January 15, 2004, 2007 and 2016: N^2 (A, B, C), E (D, E, F), R_ρ (G, H, I); and Fedorov's type of stratification (J, K, L), in accordance with the years

Изменения в вертикальном распределении квадрата частоты Брента-Вяйсяля. В 2004 г. распределение квадрата частоты Брента-Вяйсяля в целом характеризуется более широким диапазоном изменчивости ее величин, чем в «теплые» годы. Максимальные значения N^2 постоянно проявляются на шельфе, в то время как в «теплые» годы такого не наблюдается.

В зимний период 2004 г. на расстоянии от 0 до 510 км зона максимальных величин N^2 колебалась между горизонтами от 10 до 70 м без заметных изменений по вертикали, но с яркими контрастами величин между глубоководной и мелководной частью (см. рис. 1А). В 2007 г. слой максимальных значений на всем протяжении разреза был более однороден, и его верхняя граница залегала на глубинах от 7 м на мелководье, постепенно заглубляясь, следуя за рельефом дна, до 35 м в глубоководной его части (см. рис. 1Б). На северо-восточной окраине моря в левой части разреза толщина слоя максимальных величин варьировалась от 15 до 30 м. В 2016 г. слой наибольших значений N^2 был более локализован: выделялись отдельные области в глубоководной зоне на расстоянии от 10 до 400 км и на шельфе (см. рис. 1В). В 2012 г. распределение N^2 было ближе к типу распределения в 2016 г.

В весенний период в «теплые» годы в целом наблюдалось более разнообразное пространственное распределение областей повышенных величин N^2 . Слои повышенных значений квадрата частоты Брента-Вяйсяля мигрировали по глубине и пространству, создавая обособленные области различной толщины в среднем от 10 до 20 м.

В сезон таяния льда зоны повышенных значений N^2 во все годы смещались по вертикали к поверхности моря, причем мощность слоя максимальных величин в «теплые» годы была незначительно больше, чем в 2004 г., и колебалась в диапазоне 10–15 м (рис. 2А, Б, В).

С августа во все рассматриваемые годы слой наибольших величин N^2 начинает заглубляться, причем в «теплые» годы сильнее, а толщина этих слоев становится мощнее (рис. 3А, Б, В).

Осенью при ледообразовании диапазон изменчивости N^2 возрастал во все рассматриваемые годы, но как уже упоминалось, по сравнению с «холодным» годом в «теплые» годы размах колебаний стал меньше. Однако области повышенных величин в «теплые» годы в целом охватывали более мощный слой. Вдоль разреза в 2004 г. зоны наибольших величин квадрата частоты Брента-Вяйсяля были распределены, как и в другие сезоны, с максимумом на мелководном участке разреза (рис. 4А).

В «теплые» годы возникали ситуации, когда на расстоянии 530–600 км образовывались области пониженных величин N^2 , а на расстоянии 300–450 км – как области с пониженными величинами в 2007 г., так и с повышенными значениями в 2012 г. и 2016 г. (см. рис. 4Б, В).

Для оценки величины частоты Брента-Вяйсяля, полученной на основе модельных данных, с величинами, рассчитанными на основе натурных дан-

ных [Тимохов, Чернявская, 2009], была определена средняя величина критерия устойчивости по разрезу в поверхностном слое толщиной 40 м в августе–сентябре 2007 г. В работе [Тимохов, Чернявская, 2009] приведены значения средней величины частоты Брента-Вяйсяля для этого периода времени в западной и восточной частях моря Лаптевых, которые составили $0,05 \text{ с}^{-1}$ и $0,075 \text{ с}^{-1}$, соответственно. По сравнению с этими величинами, полученное среднее значение частоты Брента-Вяйсяля на разрезе получилось несколько заниженным – $0,041 \text{ с}^{-1}$. Возможно, на занижение значения на разрезе сказалось и использование при расчете постоянной расчетной толщины слоя.

Изменения в вертикальном распределении критерия термохалинной устойчивости. В распределении критерия термохалинной устойчивости E прослеживаются иные тенденции. В отличие от квадрата частоты Брента-Вяйсяля критерий термохалинной устойчивости может менять свой знак. Положительный знак этого критерия говорит о том, что в слое вод отмечается положительное равновесие, когда плотность с глубиной увеличивается. Отрицательный знак соответствует случаю отрицательной или неустойчивой стратификации, когда плотность морской воды уменьшается с глубиной, и приводит к формированию свободной конвекции. В течение всех сезонов в «холодный» год в рассматриваемом верхнем слое до глубины 100 м наблюдается преобладание положительной величины критерия на мелководной части разреза, по сравнению с «холодным» годом. В зимний сезон в глубоководной части разреза на расстоянии от 0 до 180 км слой вод от поверхности до 45 м в «холодный» год, в отличие от «теплых» лет, больше подвержен проявлению отрицательной стратификации. В то же время, слой вод от 45 до 100 м характеризуется постоянно положительным по знаку критерием устойчивости в «холодный» год, а в «теплый» год на нижней границе этой области E уменьшается и приобретает отрицательный знак (см. рис. 1Г, Д, Е).

На свале глубин в весенний период в «теплые» годы E преимущественно отрицательный, причем с наибольшим распространением в глубоководной части разреза в 2007 г. На мелководном участке разреза также возникают отрицательно стратифицированные области. Здесь в «теплые» годы отрицательный критерий устойчивости проявляется интенсивнее, охватывая более мощный поверхностный слой.

Во время таяния льда в летний период преобладает положительная стратификация вод. Однако в «холодный» год положительные значения E охватывают почти всю толщу разреза. Исключение составляет глубоководный участок на расстоянии 200–270 км между глубинами 75–100 м (см. рис. 2Г, 3Г). В «теплые» годы в это время положительное значение критерия термохалинной устойчивости характерно в целом для верхнего слоя толщиной 40 м в глубоководной части разреза (см. рис. 2Д, Е; 3Д, Е). Ниже этой глубины в зависимости от рассматриваемого «теплого» года слои воды могут обладать как поло-

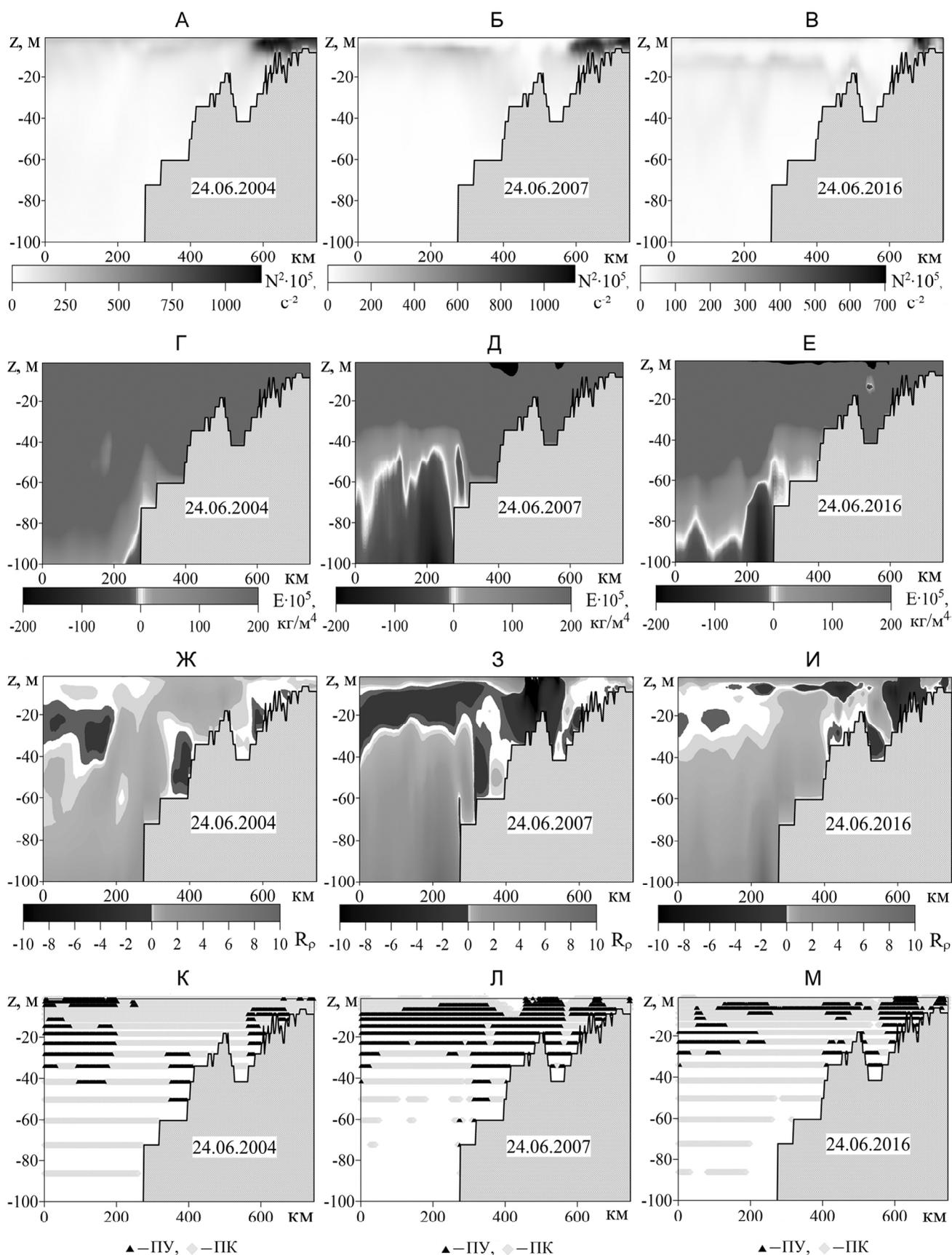


Рис. 2. Распределение критериев устойчивости на разрезе 24 июня 2004, 2007 и 2016 гг.: N^2 (А, Б, В), E (Г, Д, Е), R_ρ (Ж, З, И) и типа стратификации по Фёдорову (К, Л, М), в соответствии с годами

Fig. 2. Distribution of stability criteria along the cross section on June 24, 2004, 2007 and 2016: N^2 (A, B, C), E (D, E, F), R_ρ (G, H, I); and Fedorov's type of stratification (J, K, L), in accordance with the years

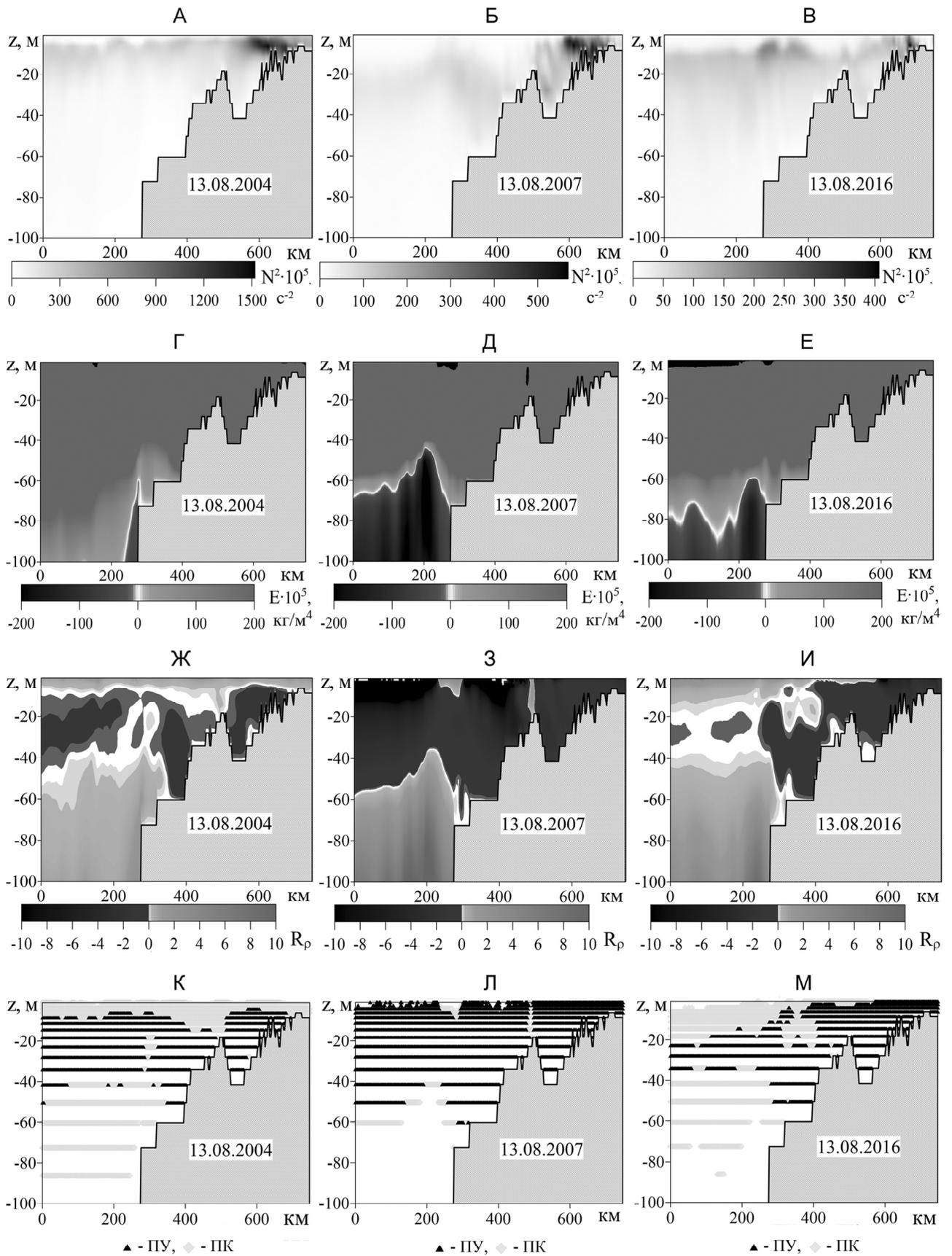


Рис. 3. Распределение критериев устойчивости на разрезе 13 августа 2004, 2007 и 2016 гг.: N^2 (А, Б, В), E (Г, Д, Е), R_ρ (Ж, З, И) и типа стратификации по Фёдорову (К, Л, М), в соответствии с годами

Fig. 3. Distribution of stability criteria along the cross section on August 13, 2004, 2007 and 2016: N^2 (A, B, C), E (D, E, F), R_ρ (G, H, I); and Fedorov's type of stratification (J, K, L), in accordance with the years

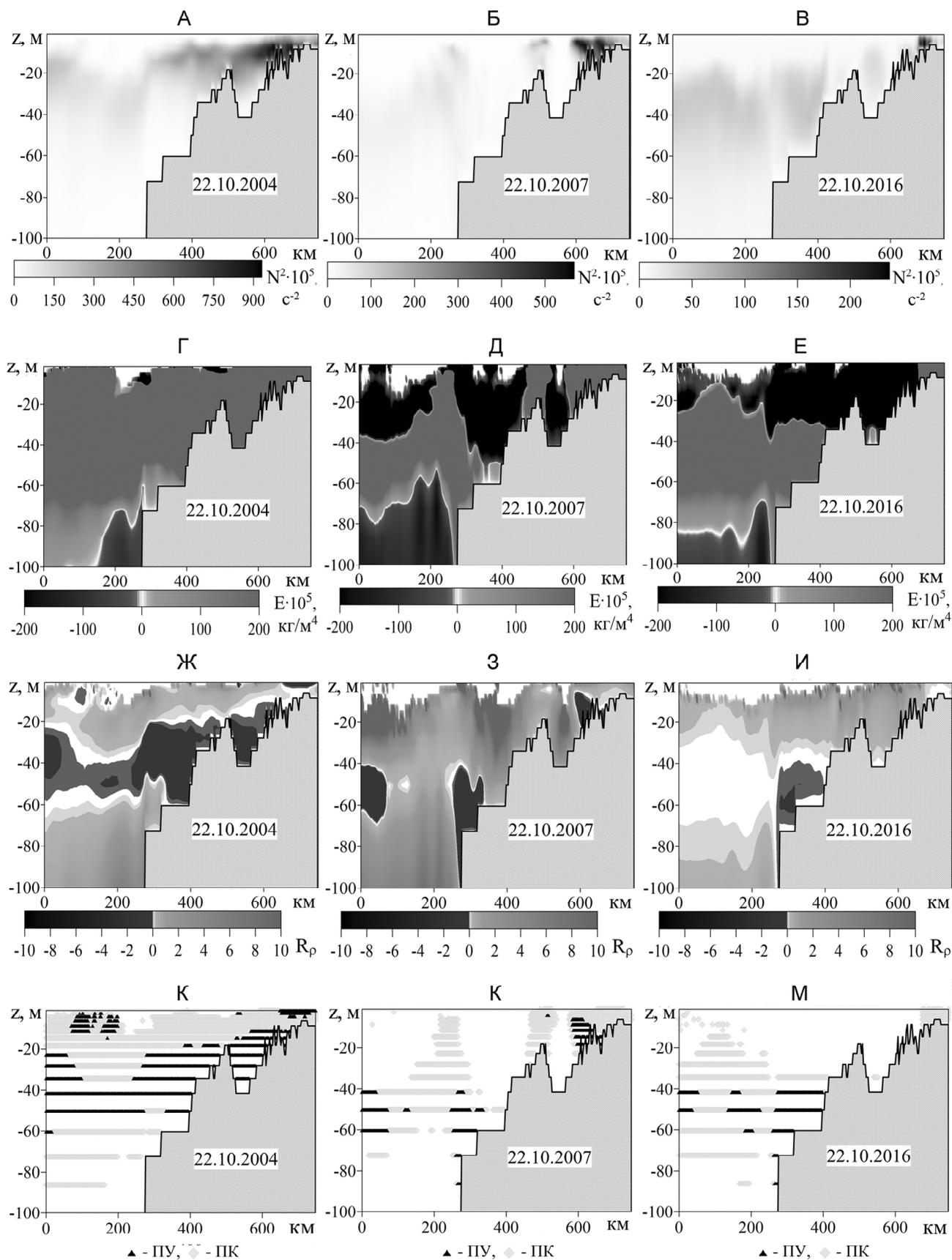


Рис. 4. Распределение критериев устойчивости на разрезе 22 октября 2004, 2007 и 2016 гг.: N^2 (А, Б, В), E (Г, Д, Е), R_ρ (Ж, З, И) и типа стратификации по Фёдорову (К, Л, М), в соответствии с годами

Fig. 4. Distribution of stability criteria along the cross section on October 22, 2004, 2007 and 2016: N^2 (A, B, C), E (D, E, F), R_ρ (G, H, I); and Fedorov's type of stratification (J, K, L), in accordance with the years

жительной, так и отрицательной величиной E разной интенсивности. В летний период у поверхности моря до глубины 14 м локально могут формироваться области с отрицательным критерием устойчивости, причем мощность таких областей и их количество больше в «теплые» годы (см. рис. 2Д, Е; 3Д, Е).

С началом процесса ледообразования в отличие от «холодного» года области с отрицательным E в «теплые» годы охватывают более мощный поверхностный слой 30–40 м в глубоководной части разреза (см. рис. 4Г, Д, Е). На шельфе на расстоянии 650–800 км в этот сезон во все анализируемые годы сохраняются положительные значения критерия устойчивости.

Изменения в вертикальном распределении плотностного соотношения. В зимний период в «теплые» годы по сравнению с «холодным» роль отрицательного по знаку плотностного соотношения усилилась на всем разрезе, особенно в 2016 г. (см. рис. 1Ж, 3, И).

В 2004 г. в весенний период на большей площади разреза также сохранялось положительное плотностное соотношение. Только две зоны характеризовались отрицательными значениями: участок на расстоянии до 100 км от начала разреза между изобатами 5–25 м и участок на свале глубин на расстоянии от 300 до 400 км между глубинами 35–60 м. Весной до начала мая в «теплые» годы на большей площади разреза также преобладало положительное плотностное соотношение. Однако областей с отрицательным плотностным отношением в глубоководной зоне становилось больше и они, как правило, оказывались мощнее. При этом, области с отрицательным R_p формировались на шельфе на расстоянии от 550 до 660 км.

С началом таяния льдов в летний период в «холодный» год на глубинах от 5 до 60 м возрастает роль отрицательного плотностного соотношения. В «теплые» годы, по сравнению с 2004 г., площадь $R_p < 0$, как и сам диапазон колебаний абсолютной величины R_p , увеличиваются между глубинами от 1 до 75 м (см. рис. 2Ж, 3, И; 3Ж, 3, И). В августе «холодного» года поверхностный слой на всем протяжении разреза характеризуется положительным R_p (см. рис. 3Ж), к сентябрю этот слой увеличивается по толщине до 17 м.

С сентября в слое от 17 до 50 м в среднем наблюдается отрицательное плотностное соотношение. В отличие от 2004 г., в 2007 г. и на поверхности образуются локальные области с $R_p < 0$, охватывающие слой воды толщиной до 20 м. В отличие от сентября 2004, 2007, 2012 гг., в сентябре 2016 г. на участке разреза от 200 до 740 км до глубины 65 м плотностное соотношение постоянно имеет отрицательный знак.

С началом октября независимо от рассматриваемого года наблюдается заглужение слоя с отрицательными значениями R_p (см. рис. 4Ж, 3, И). Однако на фоне «холодного» года в «теплые» мощность областей с отрицательным плотностным соотношением ослабевает.

С ноября структура вертикального распределения плотностного соотношения трансформируется. В «теплые» годы на общем фоне положительных R_p выделяются локальные области его отрицательных величин, тогда как в «холодный» год площади, занимаемые отрицательными и положительными величинами R_p примерно одинаковы.

Изменения в вертикальном распределении типов стратификации. Независимо от рассматриваемого года в сезонном ходе при рассмотрении типов стратификации по классификации К.Н. Федорова в целом преобладают условия, способствующие развитию послойной конвекции (см. рис. 2К, М; 3К; 4К, Л, М). Тем не менее, в «теплые» годы наблюдается тенденция к увеличению влияния условий, благоприятствующих развитию полной устойчивости на разрезе, особенно в августе–сентябре (рис. 3Л, М). К тому же в «теплые» годы чаще возникают локальные области с условиями, благоприятствующими развитию стратификации по типу солевых пальцев и абсолютной неустойчивости.

Выводы:

– анализ распределений основных параметров вертикальной устойчивости вод моря Лаптевых на рассматриваемом разрезе с координатами 78.61008° с. ш., 132.27700° в. д. и 74.14841° с. ш., 110.52970° в. д. даже на качественном уровне показал, что в структуре вертикальной устойчивости в период потепления и современного сокращения ледяного покрова наметились заметные изменения. Преобразования, происходящие в термохалинной структуре вод моря Лаптевых, непосредственно отражаются на распределении плотности его вод, а вклад температуры и солёности в изменение плотностной стратификации нагляднее всего демонстрирует плотностное соотношение;

– по сравнению с «холодным» 2004 г. в рассматриваемые «теплые» годы диапазон изменения величины частоты Брента-Вяйсяля уменьшился. В течение всего года на мелководье перестала прослеживаться зона ее максимальных величин. Во время таяния льда мощность слоя максимальных значений частоты Брента-Вяйсяля стала больше. Во время ледообразования области повышенных величин в «теплые» годы в целом охватывали больший слой;

– в зимний период «теплых» лет площадь разреза с положительным критерием термохалинной устойчивости сократилась как в глубоководной, так и в мелководной части разреза. В весенний период на мелководье отрицательная термохалинная устойчивость проявляется интенсивнее, охватывая более мощный поверхностный слой;

– по сравнению с «холодным» годом с января по апрель в «теплые» годы на глубоководном участке разреза более интенсивно усиливается распространение отрицательного плотностного соотношения, достигая наибольшей мощности в летний период. С началом выхолаживания в октябре мощность этих областей уменьшается по сравнению с «холодным» годом;

– чаще стали возникать условия, благоприятствующие развитию полной устойчивости вод.

Таким образом, по реконструированным термohалинным полям, полученным в ходе расчетов на модели NEMO, прослеживаются явные из-

менения в сезонном ходе распределения критериев стратификации, что вероятно является «откликом» гидрологического режима моря Лаптевых на наметившиеся современные изменения климата.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта – RFMEFI61617X0076).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Вертикальная структура и динамика подледного слоя океана / Под ред. Л.А. Тимохова. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 141 с.
- Волков В.А., Лукин В.В. Водные массы и стратификация вод Арктического бассейна // Труды ААНИИ. 1985. Т. 398. С. 30–39.
- Гарманов А.Л., Колтышев А.Е., Никифоров Е.Г., Тимохов Л.А., Морисон Дж. Верхний перемешанный слой в Арктическом бассейне // Труды ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 149–189.
- Даньшина А.В. Влияние теплозапаса деятельного слоя Восточно-Сибирского моря на эволюцию ледяного покрова // Оригинальные исследования. 2018. Т. 8. № 5. С. 4–15.
- Океанографические таблицы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 477 с.
- Океанография и морской лед / Под ред. И.Е. Фролова. М.: Паулсен, 2011. 432 с.
- Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Отв. ред. Х. Кассенс, А.П. Лисицын, Й. Тиде, Е.И. Полякова, Л.А. Тимохов, И.Е. Фролов. М.: Изд-во Московского университета, 2009. 608 с.
- Тимохов Л.А., Чернявская Е.А. Особенности состояния поверхностного слоя Арктического бассейна в аномальное лето 2007 // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 3(83). С. 19–28.
- Федоров К.Н. Избранные труды по физической океанологии. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 308 с.
- Шутова М.М. Общая океанология. Гидрофизика океана. Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2012. 151 с.
- Alekseev G.V., Danilov A.I., Kattsov V.M., Kuzmina S.I., Ivanov N.E. Changes in the climate and sea ice of the Northern Hemisphere in the 20th and 21st centuries from data of observations and modelling. *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, vol. 45, no. 6, p. 675–686.
- Callaghan T.V., Johansson M., Key J., Prose T.D., Ananicheva M., Klepikov A. Feedbacks and interactions: From the Arctic cryosphere to the climate system. *Ambio*, 2011, vol. 40, p. 75–86.
- 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, vol. 46, p. 1531–1553.
- Fofonoff N.P., Millard R.C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *UNESCO Technical papers in marine science*, 1983, vol. 44, p. 53.
- Kattsov V., Ryabinin V., Overland J., Serreze M., Visbeck M., Walsh J., Meier W., Zhang X. Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science. *Journal of Glaciology*, 2010, vol. 56, no. 200, p. 1115–1121.
- Overland J.E., Wang M., Salo S. The recent Arctic warm period. *Tellus*, 2008, p. 1–9.
- Poloukhin N.V., Talipova T.G., Pelinovsky E.N., Lavrenov I.V. Kinematic characteristics of the high-frequency internal wave field in the Arctic Ocean. *Oceanology*, 2003, vol. 43, no. 3, p. 333–343.
- 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, vol. 13, p. 1–8.
- Rudels B., Larsson A.-M., Sehlstedt P.-I. Stratification and water mass formation in the Arctic Ocean: some implications for the nutrient distribution. *Polar Research*, 1991, vol. 10, p. 19–32.
- Электронные ресурсы*
- Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области. Ежеквартальный информационный бюллетень // Трансарктика. ААНИИ. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=449> (дата обращения 20.02.2019).
- Обзорные ледовые карты. Оперативные данные // Трансарктика. ААНИИ. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=94> (дата обращения 20.02.2019).
- ААРИ WDC Sea Ice file server. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/lap/> (дата обращения 20.03.2019).
- NEMO. Community Ocean Model. URL: <https://www.nemo-ocean.eu/> (дата обращения 20.03.2019).

Поступила в редакцию 01.08.2019

После доработки 23.02.2020

Принята к публикации 06.08.2020

A.V. Danshina¹, V.V. Ivanov², V.Yu. Chantsev³

**CHANGES IN VERTICAL STABILITY
OF THE LAPTEV SEA UPPER LAYER UNDER
THE ICE COVER SHRINKAGE**

The main criteria of the vertical stability of water in the upper 100-meter layer of the Laptev Sea are calculated from the reconstructed spatial-temporal variability of the three-dimensional structure of temperature and salinity, obtained on the basis of numerical experiments using the regional configuration of the NEMO mathematical model adapted to the conditions of the Arctic Ocean. The modeling results are presented on a vertical section crossing both shallow and deep-water parts of the sea. The structural changes in the distribution of vertical water stability were revealed for warm periods in the beginning of the XXI century with the ice cover shrinkage. During these periods the situations favoring the development of a full vertical stability of waters are more frequent. The range of changes of the Brunt-Väisälä frequency in the «warm» years decreases against the «cold» year of 2004. The depth of the layer with maximum values of the Brunt-Väisälä frequency increases during the periods of ice melting. At the same time the negative thermohaline stability is more intensive in spring in shallow areas of the sea, extending into a deeper surface layer. During winter period of «warm» years the area of the section with a positive criterion of thermohaline stability decreases both for the deep-water and the shallow-water parts of the section. The depth of the layer with negative values of the density ratio reaches the highest values during summer periods of the «warm» years.

Key words: Arctic Ocean, surface layer, stability, stratification, Brunt-Vaisala frequency

Acknowledgements. The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the project no. ID RFMEFI61617X0076).

REFERENCES

- Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V.* Evoljucija ploshhadi morskogo ledovogo pokrova Arktiki v uslovijah sovremennyh izmenenij klimata [Arctic sea ice cover in connection with climate change], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 2, p. 5–19. (In Russian)
- Alekseev G.V., Danilov A.I., Kattsov V.M., Kuzmina S.I., Ivanov N.E.* Changes in the climate and sea ice of the Northern Hemisphere in the 20th and 21st centuries from data of observations and modeling, *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, vol. 45, no. 6, p. 675–686.
- Callaghan T. V., Johansson M., Key J., Prowse T.D., Ananicheva M., Klepikov A.* Feedbacks and interactions: From the Arctic cryosphere to the climate system, *Ambio*, 2011, vol. 40, p. 75–86.
- Danshina A.V.* Vlijanie teplozapasa dejatel'nogo sloja Vostochno-Sibirskogo morja na jevoljuciju ledjanogo pokrova [Heat Content Effect of the Active Layer on the Ice Cover Evolution in the East Siberian Sea], *Original'nye issledovanija*, 2018, vol. 8, no. 5, p. 4–15. (In Russian)
- 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, vol. 46, p. 1531–1553.
- Fedorov K.N.* *Izbrannye trudy po fizicheskoj okeanologii* [Selected Works on Physical Oceanology], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991. 308 p. (In Russian)
- Fofonoff N.P., Millard R.C.* *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*, UNESCO Technical papers in marine science, 1983, vol. 44, p. 53.
- Garmanov A.L., Kolytshev A.E., Nikiforov E.G., Timokhov L.A., Morison Dz.* Verhnij peremeshannyj sloj v Arkticheskom bassejne [Upper mixed layer in the Arctic basin], *Trudy AANII* [Proc. of the AANII], 2008, vol. 448, p. 149–189. (In Russian)
- 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, vol. 56, no. 200, p. 1115–1121.
- Okeanograficheskie tablicy* [Oceanographical tables], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 477 p. (In Russian)
- Okeanografija i morskoi l'jod* [Oceanography and sea ice], Frolov I.E. (Ed.), Moscow, Paulsen Publ., 2011, 432 p. (In Russian)
- Overland J.E., Wang M., Salo S.* *The recent Arctic warm period*, Tellus Publ., 2008, p. 1–9.
- Poloukhin N.V., Talipova T.G., Pelinovsky E.N., Lavrenov I.V.* Kinematic characteristics of the high-frequency internal wave field in the Arctic ocean, *Oceanology*, 2003, vol. 43, no. 3, p. 333–343.
- 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, vol. 13, p. 1–8.
- Rudels B., Larsson A.-M., Sehlstedt P.-I.* Stratification and water mass formation in the Arctic Ocean: some implications for the nutrient distribution, *Polar Research*, 1991, vol. 10, p. 19–32.
- Shutova M.M.* *Obshhaja okeanologija. Gidrofizika okeana* [General Oceanology. Hydrophysics of the Ocean], Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2012, 151 p. (In Russian)
- Sistema moray Laptevych i prilgayushchih morej Arktiki: sovremennoe sostoyanie i istoriya razvitiya* [System of the Laptev Sea and the Adjacent Arctic Seas: Modern and Past Environments], Kassens X., Lisicyn A.P., Tide J., Polyakova E.I., Timokhov L.A.,

¹ Arctic and Antarctic Research Institute, Department of Oceanology, Scientific Researcher, PhD in Physics and Mathematics; *e-mail:* danshina@aari.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; *e-mail:* vladimir.ivanov@aari.ru

³ Russian State Hydrometeorological University, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail:* val@rshu.ru

Frolov I.E. (Ed.), Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2009. 608 p. (In Russian)

Timokhov L.A., Chernyavskaya E.A. Osobennosti sostojanija poverhnostnogo sloja Arkticheskogo bassejna v anomal'noe leto 2007 [Features of the Arctic Basin surface layer at anomalous summer of 2007], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2009, no. 3(83), p. 19–28. (In Russian)

Vertikal'naja struktura i dinamika podlednogo sloja okeana [Vertical structure and dynamics of ocean under ice], Timokhov L.A. (Ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 141 p. (In Russian)

Volkov V.A., Lukin V.V. Vodnye massy i stratifikacija vod Arkticheskogo bassejna [Water masses and stratification of the Arctic basin]. *Trudy AANII* [Proc. of the AANII], 1985, vol. 398, p. 30–39. (In Russian)

Web sources

AARI WDC Sea Ice file server. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/lap/> (access date 20.03.2019).

NEMO. Community Ocean Model. URL: <https://www.nemo-ocean.eu/> (access date 20.03.2019).

Obzor gidrometeorologičeskikh processov v Severnoj poljarnoj oblasti. Ezhekvartal'nyj informacionnyj bjulleten' [Review of hydrometeorological processes in the North Polar Region. Quarterly information bulletin], *Transarktika*. AARI. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=449> (access date 20.02.2019).

Obzornye ledovye karty. Operativnye dannye [Survey ice maps. Operational data]/ *Transarktika*. AARI. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=94> (access date 20.02.2019).

Received 01.08.2019

Revised 23.02.2020

Accepted 06.08.2020