

УДК 551.46(265.51)

Е.О. Басюк, Ю.И. Зуенко*Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4**БЕРИНГОВО МОРЕ 2018 — ЭКСТРЕМАЛЬНО
МАЛОЛЕДОВИТЫЙ И ТЕПЛЫЙ ГОД**

Рассмотрен феномен формирования в 2018 г. аномально теплых океанологических условий в Беринговом море. Экстремальные условия сложились на фоне тенденции к потеплению, наблюдаемой в Беринговом море в последние годы, однако даже на этом фоне 2018 г. выделялся по многим гидрометеорологическим показателям, причем аномалии некоторых из них превышали стандартные отклонения многолетней изменчивости более чем вдвое ($> 2\sigma$). Отмечены последствия потепления для структуры и циркуляции вод, а также некоторых гидрохимических параметров. Основной причиной формирования экстремальных условий стало преобладание зимой южных ветров над всей акваторией Берингова моря, что привело к усиленной адвекции океанических вод, еще сохранявших тепло после аномального потепления в СВТО в 2014–2016 гг. В результате ледовитость моря зимой и весной была более чем вдвое меньше среднеемноголетней, температуры воздуха над морем и воды в поверхностном слое моря в течение всего года превышали нормы соответственно до $+15$ и $+5$ °C. В таких условиях зимняя конвекция была сильно ослаблена, что не позволило сформироваться обычным для берингоморского шельфа холодным придонным водным массам с температурой ниже 0 °C. Летом на западе моря значительные положительные аномалии температуры охватили всю толщу вод. Столь значительные изменения в распределении плотности вкупе с необычным ветровым режимом обусловили изменения циркуляции вод, особенно в северной части моря, где Наваринское течение было ослаблено либо вообще отсутствовало, а перенос вод на север с выходом в Берингов пролив осуществлялся в основном через восточноберингоморский шельф. Усиленный приток океанических вод через Алеутские проливы способствовал росту концентраций биогенных веществ и снижению содержания кислорода в промежуточном слое Берингова моря. Океанологические условия, сложившиеся в Беринговом море в 2018 г., являются статистическим выбросом, нехарактерным даже для современного периода потепления, однако можно ожидать, что при дальнейшем потеплении в недалеком будущем такие условия станут нормой, поэтому по характеру изменений, произошедших в этом году, можно судить о будущем океанологическом режиме моря.

Ключевые слова: потепление климата, ледовитость, температура воды, циркуляция вод, Берингово море.

DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142.

* Басюк Евгений Олегович, ведущий инженер, e-mail: evgeniy.basyuk@tinro-center.ru; Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: zuenko_yury@hotmail.com.

Basyuk Eugene O., leading engineer, Pacific branch of VNIRO (TINRO), Shevchenko Alley, 4, Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: evgeniy.basyuk@tinro-center.ru; Zuenko Yury I., D.Geogr., head of laboratory, Pacific branch of VNIRO (TINRO), Shevchenko Alley, 4, Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: zuenko_yury@hotmail.com.

Basyuk E.O., Zuenko Yu.I. Bering Sea: 2018 as the extreme low-ice and warm year // *Izv. TINRO*. — 2019. — Vol. 198. — P. 119–142.

Phenomenon of anomalous oceanographic conditions in the Bering Sea in 2018 is considered, with heightened air and water temperature and very low ice cover, as well as its consequences for the water structure, circulation, and chemical properties. These extreme conditions were formed on the background of warming tendency observed in the Bering Sea since 2014, but they were exceptional even relative to this background: deflections of some parameters from their normal values exceeded the standard deviations more than twice ($> 2\sigma$). The main reason for such conditions was the southern winds prevalence over the entire Sea in winter, in opposite to usual regime when the southern winds blew over its southeastern part only; another factor was strengthened advection of the oceanic waters, still abnormally warm after the period of extreme warming in the North-East Pacific in 2014–2016. As the result, the ice cover in winter and spring was more than twice lower the normal values, the air and water temperatures through the year were above their normal values in 15 and 5 degrees Celsius, respectively. The winter convection was weakened that caused deepening of the cold subsurface layer core and prevented forming of the cold near-bottom water masses on the shelf that was usual for the Bering Sea. Under this considerable redistribution of the water density coupled with unusual wind regime, the water circulation changed, in particular in the northern Bering Sea where the Navarin Current were weakened or even absent and the northward water transport was realized through the eastern shelf delivering to the northern shelf and Bering Strait the coastal waters from Alaska instead of the deep-water basins waters, as usually. Strong advection of the oceanic waters through the Aleutian Straits promoted growth of nutrients concentrations and lowering of oxygen content in the intermediate layer of the Bering Sea. These extreme oceanographic conditions in the Bering Sea in 2018 were statistical outliers, atypical even for recent period of warming, but such conditions would be expected frequently if the warming will continue. Thus, phenomenon of the year 2018 could be useful for understanding and prediction of the oceanographic regime reconstruction in the nearest future.

Key words: climate warming, ice cover, water temperature, water circulation, Bering Sea.

Введение

В современную эпоху быстрых изменений климата уже не вызывает большого удивления, что каждый новый год становится рекордно теплым за всю историю инструментальных наблюдений. Однако ситуация, сложившаяся в Беринговом море с самого начала 2018 г., была необычна слишком большими величинами температурных аномалий, которые для температуры воздуха зимой стабильно выражались двузначными цифрами. Сверхтеплая зима имела множество серьезных последствий для океанологических условий моря, да и для всей его экосистемы, которые прослеживались до конца года и продолжают сказываться и в следующем году. Сочетание необычных условий, наблюдавшееся в Беринговом море в 2018 г., возможно, станет в недалеком будущем нормой. Таким образом, феномен 2018 г. дает возможность предвидеть, как может повести себя экосистема Берингова моря в дальнейшем при условии сохранения современной тенденции к потеплению.

Цель данной работы — выявить основные особенности гидрометеорологических условий, приведших к возникновению феномена экстремально малоледовитого и теплого 2018 г. в Беринговом море, и определить основные последствия этого феномена для структуры и циркуляции его вод.

Материалы и методы

В 2018 г. ТИНРО было организовано три экспедиции в Берингово море с океанографическими работами. В начале мая на НИС «Дмитрий Песков» выполнялась съемка прибрежных вод юго-западной части моря (53 станции). В первой половине августа на НИС «Профессор Леванидов» проводилась съемка северо-западной части моря (80 станций). В период с 26 августа по 11 октября двумя судами — НИС «Профессор Леванидов» и «ТИНРО» — была выполнена съемка юго-западной части моря (149 станций, из них 29 — с отбором проб воды на гидрохимический анализ). Определения содержания растворенного кислорода, концентраций фосфатов и кремния выполнялись

на борту судна по соответствующим методикам [Руководство..., 2003]. В основу этой работы положены данные двух последних съемок, суммарно освещающих почти всю российскую акваторию Берингова моря (рис. 1).

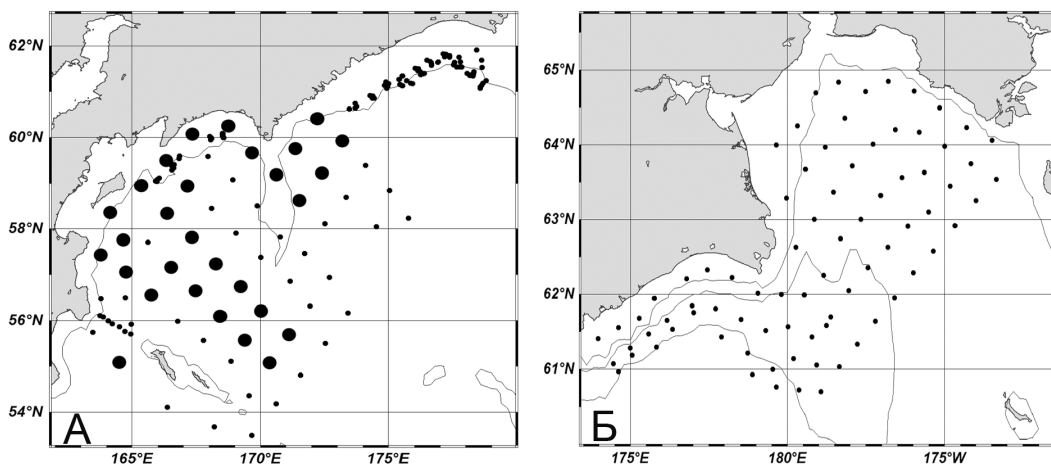


Рис. 1. Схемы океанографических съемок в Беринговом море летом-осенью в 2018 г.: А — в юго-западной части моря НИС «ТИНРО» и «Профессор Леванидов»; Б — в северо-западной части моря НИС «Профессор Леванидов». Линиями показано положение изобат 50, 100, 1000 м, крупные точки — станции отбора проб на гидрохимический анализ

Fig. 1. Schemes of oceanographic surveys in the Bering Sea in summer-fall of 2018: А — RV TINRO and RV Professor Levanidov in the southwestern Bering Sea; Б — RV Professor Levanidov in the northwestern Bering Sea. Lines — isobaths 50, 100, and 1000 m; points — stations; large points — stations with water sampling for chemical analysis

Океанологические условия за пределами зоны России и вне сроков выполнения съемок, а также метеорологические условия рассмотрены с использованием следующей доступной через Интернет информации мировых центров данных:

— данные о метеорологических характеристиках (приземное атмосферное давление, приземный ветер, приземная температура воздуха) в виде средних месячных значений по сетке $2,5 \times 2,5^\circ$, рассчитанных по модели NCEP/NCAR, с сайта NOAA (США) <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.surface.html>;

— средние недельные значения температуры поверхности моря (ТПМ) по сетке $1 \times 1^\circ$ с сайта NOAA <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>, которые в ходе обработки были интерполированы в ежедневные поля и затем осреднены (с учетом индивидуальных весов для каждой сеточной ячейки шарообразной Земли) ежемесячно, а также по годам (отметим, что месячные аномалии ТПМ по данным NOAA хорошо соответствовали аномалиям температуры по судовым измерениям, но абсолютные величины аномалий по данным ТИНРО были немного выше);

— ежедневные данные о концентрации льда по спутниковым наблюдениям с сайта NASA (США) ftp://sidacs.colorado.edu/DATASETS/nsidc0081_nrt_nasateam_seaice/north/;

— результаты расчета циркуляции вод в верхнем 30-метровом слое моря по модели OSCAR (Ocean Surface Current Analysis) с пространственным разрешением $1/3^\circ$ и временным 5 сут с сайта NASA https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_third-deg (модель совмещает результаты расчета бароклинных и баротропных течений по данным спутниковых альтиметрических измерений и оценок скорости приводного ветра, а также учитывает данные наблюдений за перемещениями термических неоднородностей на поверхности моря; в ходе обработки результаты расчетов осреднены ежемесячно, выделены треки водных потоков).

Для отдельных районов Берингова моря созданы ряды межгодовых изменений аномалий температуры воды по стандартным горизонтам с использованием ретроспективных данных морских экспедиций ТИНРО (рис. 2). Для этого аномалии температуры на всех станциях в пределах района, рассчитанные относительно среднемноголетних

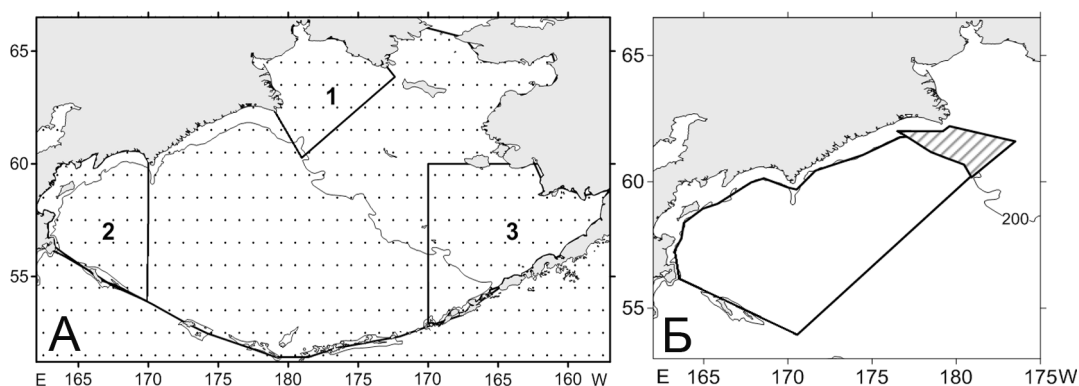


Рис. 2. Схемы областей осреднения температуры воды и ее аномалий. А: 1 — северо-западная часть моря, 2 — Командорская котловина, 3 — юго-восточная часть моря; Б: биостатистический район № 5 (заштрихован). Показана изобата 200 м

Fig. 2. Schemes of the areas for averaging of water temperature and its anomalies. А: 1 — north-western Bering Sea, 2 — Commander Basin, 3 — southeastern Bering Sea; Б: biostatistical area № 5 (shaded). Lines — isobaths 200 m

месячных значений из океанологических атласов В.А. Лучина [Luchin et al., 2009] и Левитуса [Locarnini et al., 2013], осредняли помесечно, с учетом дат наблюдений. Принятый критерий статистической экстремальности — более 2 стандартных отклонений ($> 2\sigma$) для многолетнего ряда наблюдений. Для солёности и гидрохимических параметров, определенных в ходе съемок 2018 г., также рассчитаны отклонения от среднемноголетних значений из атласа Левитуса [Garcia et al., 2013a, b; Zweng et al., 2013].

В северо-западной части моря с использованием равноплощадной проекции (Albers Equal Area Conic) в пределах экономзоны РФ была рассчитана межгодовая изменчивость площади распространения вод Лаврентьевского холодного пятна (ЛХП) с температурой ниже 0°C на глубине 50 м и у дна.

При анализе циркуляции вод особое внимание уделено определению источников адвекции вод в северную часть Берингова моря. Для этого с помощью модели OSCAR восстанавливали траектории движения частиц воды за 100 сут, предшествующих их попаданию в район севернее 60° с.ш. Для каждого узла $1/3$ -градусной сетки к северу от 60° с.ш. вначале по зональным и меридиональным компонентам скоростей течений, представленным моделью, был рассчитан путь, пройденный частицами воды за сутки, предшествующие 7 сентября, затем с учетом этого пути рассчитаны координаты частиц на 6 сентября, и далее подобные вычисления повторены 100 раз вплоть до 31 мая. Для удобства визуализации большого количества индивидуальных траекторий выделены отдельные характерные треки.

Результаты и их обсуждение

Гидрометеорологические условия 2018 г.

Еще с предзимья, с ноября 2017 г. на северо-западе Берингова моря отмечена повышенная повторяемость ветров юго-западного направления при относительно слабых ветрах северных румбов. В результате относительно теплые океанические воздушные массы распространялись не только на южную часть Берингова моря, но и севернее 60° с.ш., на прибрежные районы Чукотки, где средние месячные аномалии температуры приземного воздуха составили в ноябре до $+10^{\circ}\text{C}$, в декабре до $+15^{\circ}\text{C}$. Зимой 2018 г. эта особенность циркуляции атмосферы приобрела устойчивый характер, поскольку центр Алеутского минимума расположился у восточного побережья Камчатки, заметно северо-западнее своего среднемноголетнего положения (рис. 3). Напротив, на востоке Берингова моря и над СВТО приземное атмосферное давление было значительно выше среднемноголетних значений. Несмотря на смену сезона, пре-

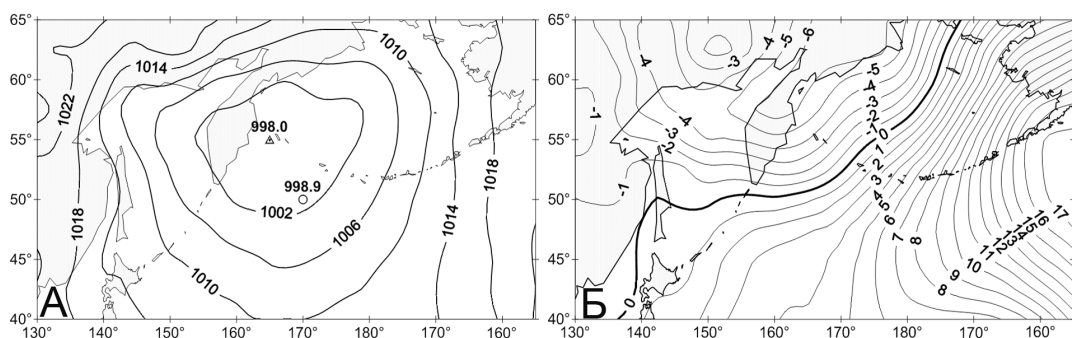


Рис. 3. Среднее за февраль 2018 г. приземное атмосферное давление (А) и его аномалии (Б), гПа. Треугольником отмечен центр Алеутского минимума, кружком — его среднемноголетнее положение, цифры у треугольника и кружка означают давление в центре

Fig. 3. Atmospheric pressure at the sea surface in February, 2018 (А) and its anomalies (Б), hPa. Triangle — center of Aleutian Low in February, 2018; circle — its usual position; the minimal pressure values are shown at the triangle and circle

обладание юго-восточных ветров над Беринговым морем сохранилось, что обусловило постоянную адвекцию теплого воздуха на акваторию моря. Подобный феномен теплой зимы наблюдался в Беринговом море и раньше, например, в 2000–2005 гг. [Overland et al., 2012]. Однако зима 2018 г. отличалась очень высокими аномалиями температуры воздуха — $+10...+15^{\circ}\text{C}$ для средних месячных значений (рис. 4). Рост зимних температур воздуха наблюдается в Беринговом море с 2014 г. со все более возрастающими величинами аномалий, которые в феврале 2018 г. достигли максимума (рис. 5).

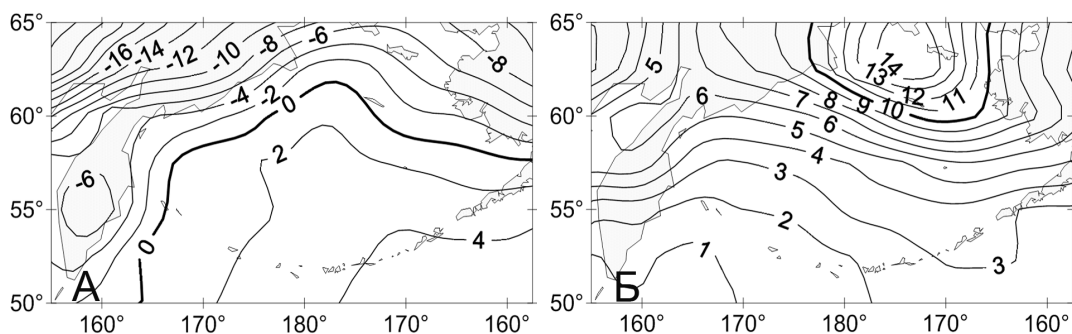


Рис. 4. Средняя за февраль 2018 г. температура приземного воздуха (А) и ее аномалии (Б), $^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Air temperature at the ground/sea surface in February, 2018 (А) and its anomalies (Б), $^{\circ}\text{C}$

Неудивительно, что в течение всей зимы 2018 г. на всей акватории моря температура поверхности моря (ТПМ) также была выше среднемноголетних значений, в среднем примерно на 1°C . Наибольшие аномалии отмечены на севере моря, на среднем и внешнем восточноберинговоморском шельфе (над изобатами 50–200 м) — до $+2,0...+2,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 6).

Из-за аномально высоких температур воды и воздуха льдообразование зимой 2017/18 г. было в Беринговом море слабым, поэтому с ноября 2017 г. по апрель 2018 г. разность между фактическими и среднемноголетними значениями ледовитости последовательно возрастала, достигнув максимума в апреле (см. таблицу, рис. 7). Примечательно, что в течение всей зимы аномалии ледовитости превышали фактическую ледовитость, т.е. льда было постоянно более чем вдвое меньше нормы.

В 2018 г. кромка льдов на всем своем протяжении была расположена севернее и ближе к побережью относительно своего среднемноголетнего положения, причем такая аномальная ситуация сохранялась в течение всей зимы. Как и в 2017 г., весь зимний период лед отсутствовал на внешней периферии Анадырского залива.

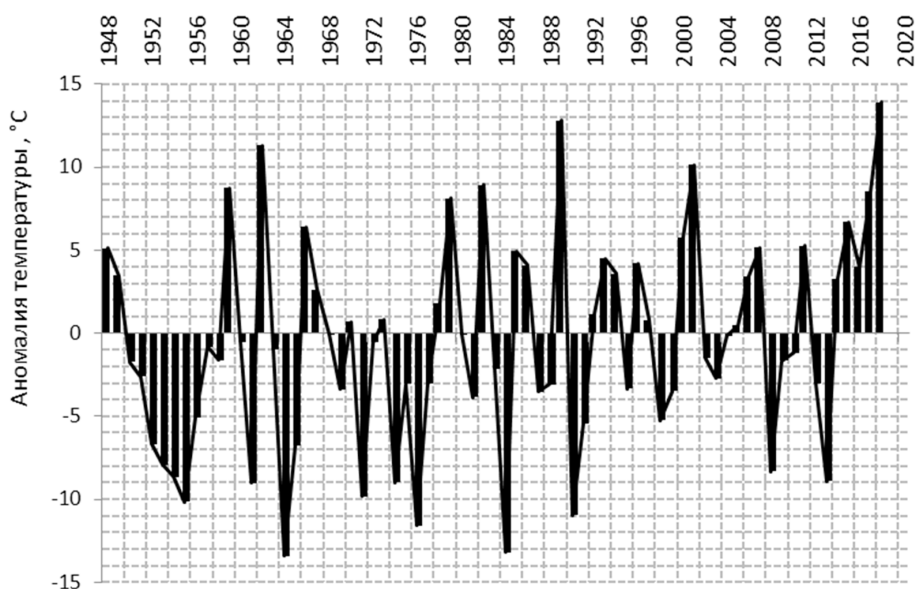


Рис. 5. Межгодовые изменения средних за февраль аномалий температуры приземного воздуха на северо-западе Берингова моря (62°30' с.ш. 175° з.д.)

Fig. 5. Year-to-year fluctuations of air temperature at the sea surface in 62°30' N 175° W (north-western Bering Sea) averaged for February

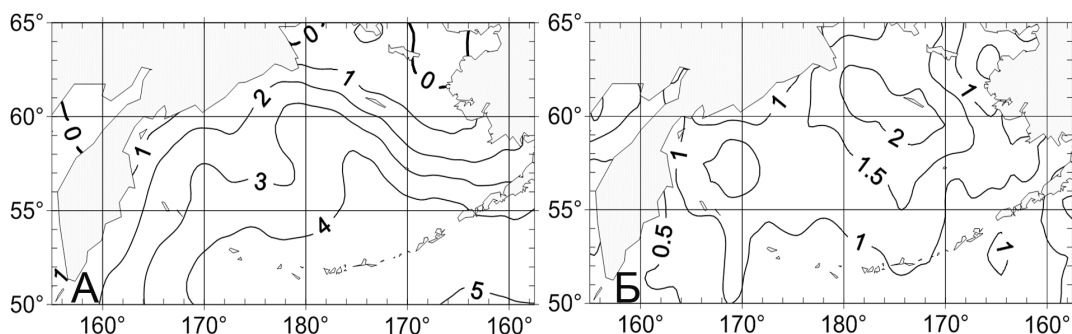


Рис. 6. Средняя за февраль 2018 г. температура поверхности Берингова моря (А) и ее аномалии (Б), °С

Fig. 6. Sea surface temperature in the Bering Sea in February, 2018 (А) and its anomalies (Б), °С

Ледовитость Берингова моря зимой 2017/18 г. в сравнении со среднемноголетними значениями за период 1981–2010 гг. по месяцам, % от общей площади моря

The Bering Sea ice cover in the winter 2017/18, by months, in compare with the mean climatic values for 1981–2010, % of the total area of the sea

Период	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Средняя за I–IV
2017–2018	0,4	3,8	12,4	13,6	14,4	6,3	11,7
1981–2010	4,1	16,1	26,8	32,2	34,0	30,8	31,3
Разность	–3,7	–12,3	–14,4	–18,6	–19,6	–24,5	–19,6

В начале календарной весны (март) на акватории моря сохранялся перенос теплого воздуха с юга и лишь в апреле отмечены случаи выноса воздуха с Северного Ледовитого океана на северо-запад Берингова моря. Но к тому времени воздух на севере уже прогрелся, и это не привело к изменению знака аномалий температуры приземного воздуха — в апреле-мае температура воздуха также была повсеместно выше средних климатических значений (рис. 8). Величины и распределение аномалий ТПМ не изменились существенно по сравнению с зимним периодом (рис. 9).

Летом 2018 г. над акваторией Берингова моря преобладали слабые ветры, что типично для этого сезона. Поэтому температуры воздуха приблизились к норме, превышая

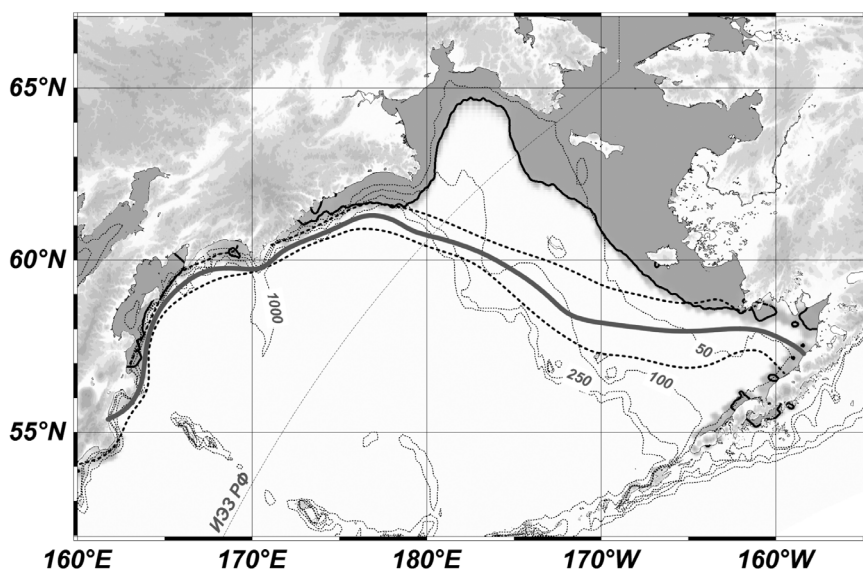


Рис. 7. Положение кромки льда в момент максимального развития ледового покрова (15 марта 2018 г.) в сравнении со среднемноголетним ее положением на середину марта (*жирная линия, пунктирами обозначены 25-й и 75-й проценти*)

Fig. 7. The maximal ice cover on March 15, 2018 (shaded) in compare with its mean climatic position in the middle March (*thick line, the isolines of 25 % and 75 % occurrence are shown by dotted lines*)

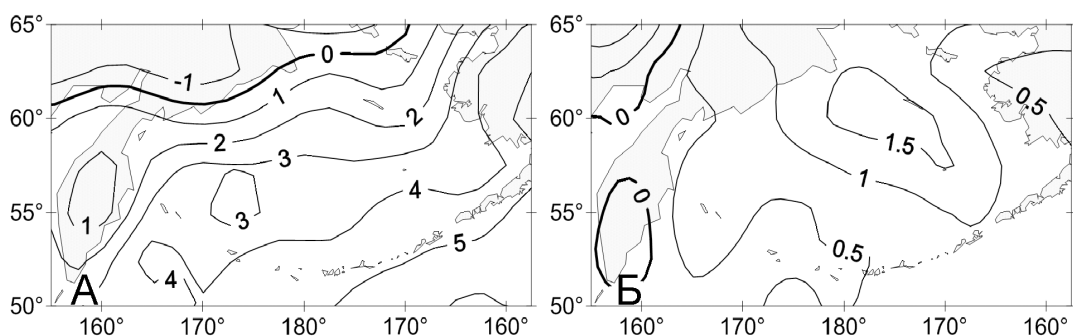


Рис. 8. Средняя за май 2018 г. температура воздуха (А) и ее аномалии (Б), °С

Fig. 8. Air temperature at the ground/sea surface in May 2018 (А) and its anomalies (Б), °С

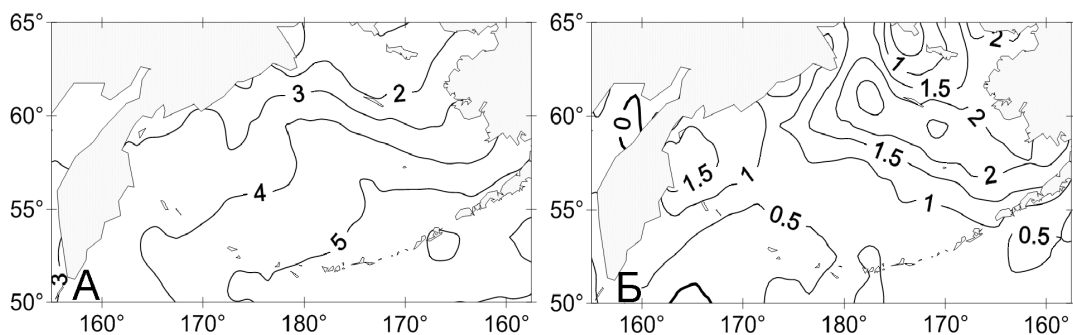


Рис. 9. Средняя за май 2018 г. температура поверхности Берингова моря (А) и ее аномалии (Б), °С

Fig. 9. Sea surface temperature in the Bering Sea in May 2018 (А) and its anomalies (Б), °С

ее лишь на 1–2 °С (рис. 10). Несмотря на это, положительные аномалии ТПМ не только не уменьшились, но в западной части моря возросли до +2 °С (рис. 11). К августу 2018 г. даже на крайнем северо-западе моря поверхностный слой прогрелся до 10–11 °С.

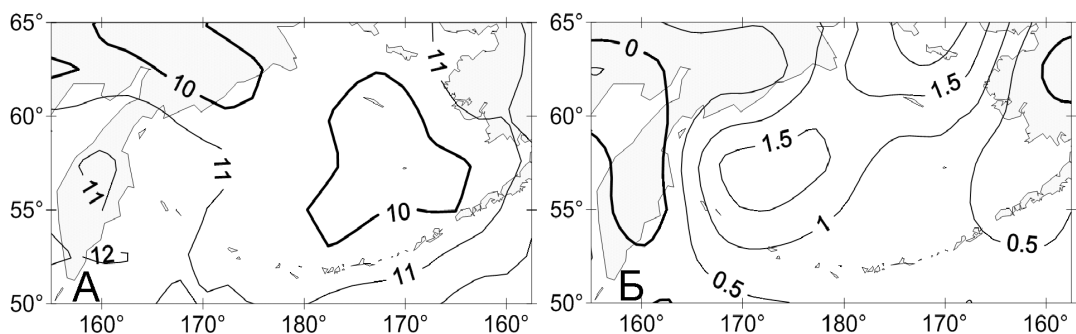


Рис. 10. Средняя за август 2018 г. температура воздуха (А) и ее аномалии (Б), °С

Fig. 10. Air temperature at the ground/sea surface in August 2018 (А) and its anomalies (Б), °С

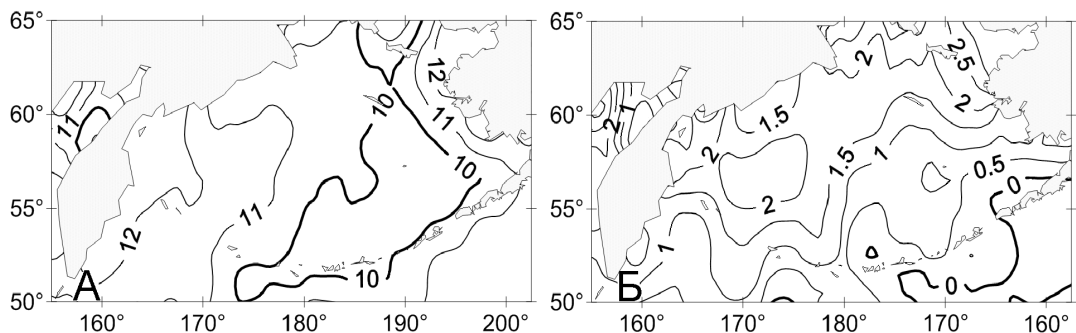


Рис. 11. Средняя за август 2018 г. температура поверхности Берингова моря (А) и ее аномалии (Б), °С

Fig. 11. Sea surface temperature in the Bering Sea in August, 2018 (А) and its anomalies (Б), °С

В результате осенне-зимней конвекции на обширном шельфе Берингова моря толща вод вентилируется до придонных горизонтов. Летом в северо-западной части моря ниже сезонного термоклина формируется пояс вод с очень низкими, часто отрицательными, значениями температуры. Экспедиционные наблюдения в августе 2018 г. показали, что на северо-западном шельфе моря во всей толще вод, от поверхности до дна, фактически отсутствовали воды с температурой ниже 0 °С, в придонном слое вода с температурой ниже 2 °С наблюдалась лишь у самой границы ИЭЗ России. На глубине 50 м, где воды зимнего охлаждения сохраняются продолжительное время с почти неизменными свойствами, типичные температурные аномалии на большей части акватории Анадырского залива превышали +2 °С (рис. 12).

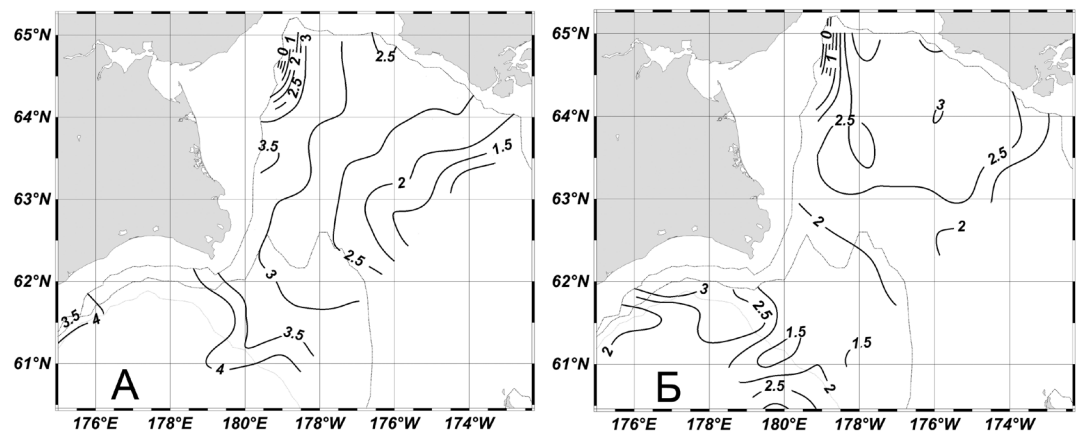


Рис. 12. Распределение температуры (А) и ее аномалий (Б) на горизонте 50 м в северо-западной части моря летом 2018 г., °С

Fig. 12. Water temperature at the 50 m depth in the northwestern Bering Sea (А) and its anomalies (Б), °С

В плоскости разреза поперек шельфа Анадырского залива четко прослеживалось, что практически весь объем воды на шельфе имел повышенный температурный фон. Слабые отрицательные аномалии у дна были отмечены только вблизи чукотского побережья (у мыса Чукотского). Наибольшие аномалии ($> 3^{\circ}\text{C}$) наблюдались на глубинах около 30 м, на нижней границе слоя температурного скачка (рис. 13). В ядре вод остаточного зимнего охлаждения величина аномалий составляла $+0,5 \dots +1,0^{\circ}\text{C}$.

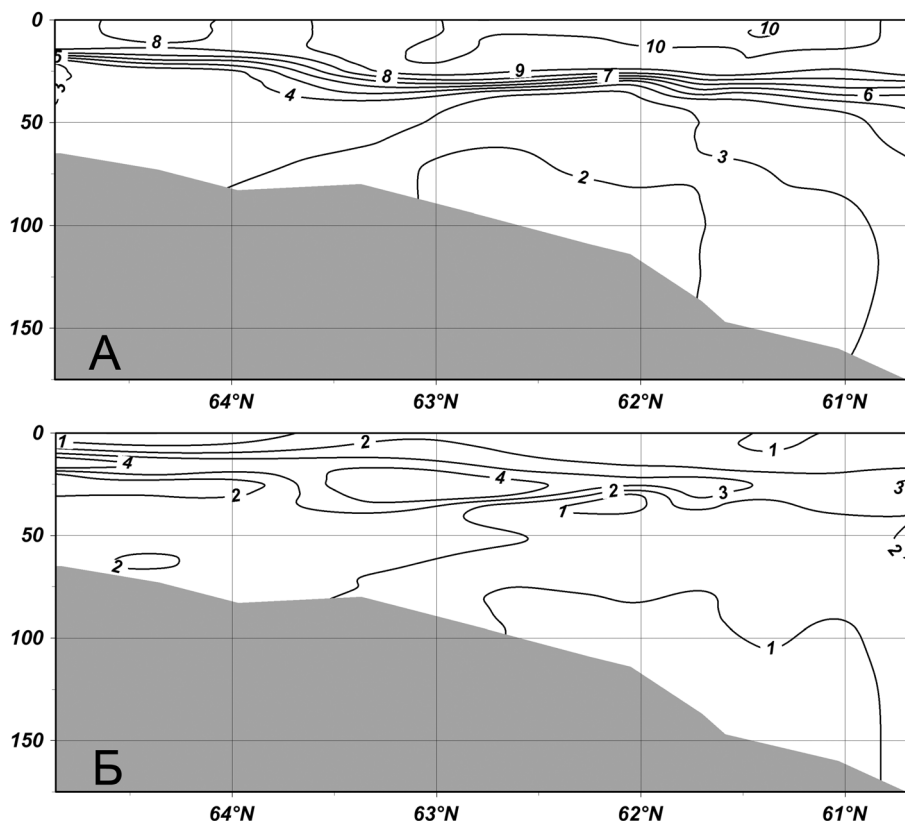


Рис. 13. Распределение температуры, $^{\circ}\text{C}$ (А) и ее аномалий (Б) на разрезе в Анадырском заливе вдоль $178^{\circ}30'$ з.д. в августе 2018 г. (НИС «Профессор Леванидов»)

Fig. 13. Water temperature at the section along $178^{\circ}30'$ W in the Anadyr Bay (А) and its anomalies (Б), $^{\circ}\text{C}$ (RV Professor Levaniidov)

В юго-западной части Берингова моря ранней осенью 2018 г. на поверхности сохранялись черты летней структуры вод, когда поступающие в море тихоокеанские воды более холодные по сравнению с водами собственно Берингова моря. Наиболее высокая температура на поверхности была отмечена на свале глубин в вершине Алеутской котловины — свыше $11,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 14). Пятна повышенных температур были отмечены также в полосе распространения вихревых структур Камчатского течения. Наиболее холодные воды располагались в области поступления тихоокеанских вод через прол. Ближний — менее 10°C — и в области подъема вод у склона вдоль корякского побережья. Распределение солёности на поверхности в общем плане было типичным для акватории моря. Минимальные величины (менее 32,5 епс) наблюдались вдоль побережья материка, и чем ближе к побережью, тем распресненнее вода. Это связано в первую очередь со стоком пресных вод реками и многочисленными ручьями. На большей части глубоководной акватории моря солёность менялась в незначительных пределах, от 32,6 до 32,8 епс.

Толщина верхнего изотермического слоя на большей части обследованной акватории составляла 20–40 м, углубляясь у прол. Ближнего до 45 м, при средней величине 33 м (среднее многолетнее значение в сентябре за 1988–2010 гг. — около 32 м). Слой сезонного термоклина находился в диапазоне глубин 30–60 м.

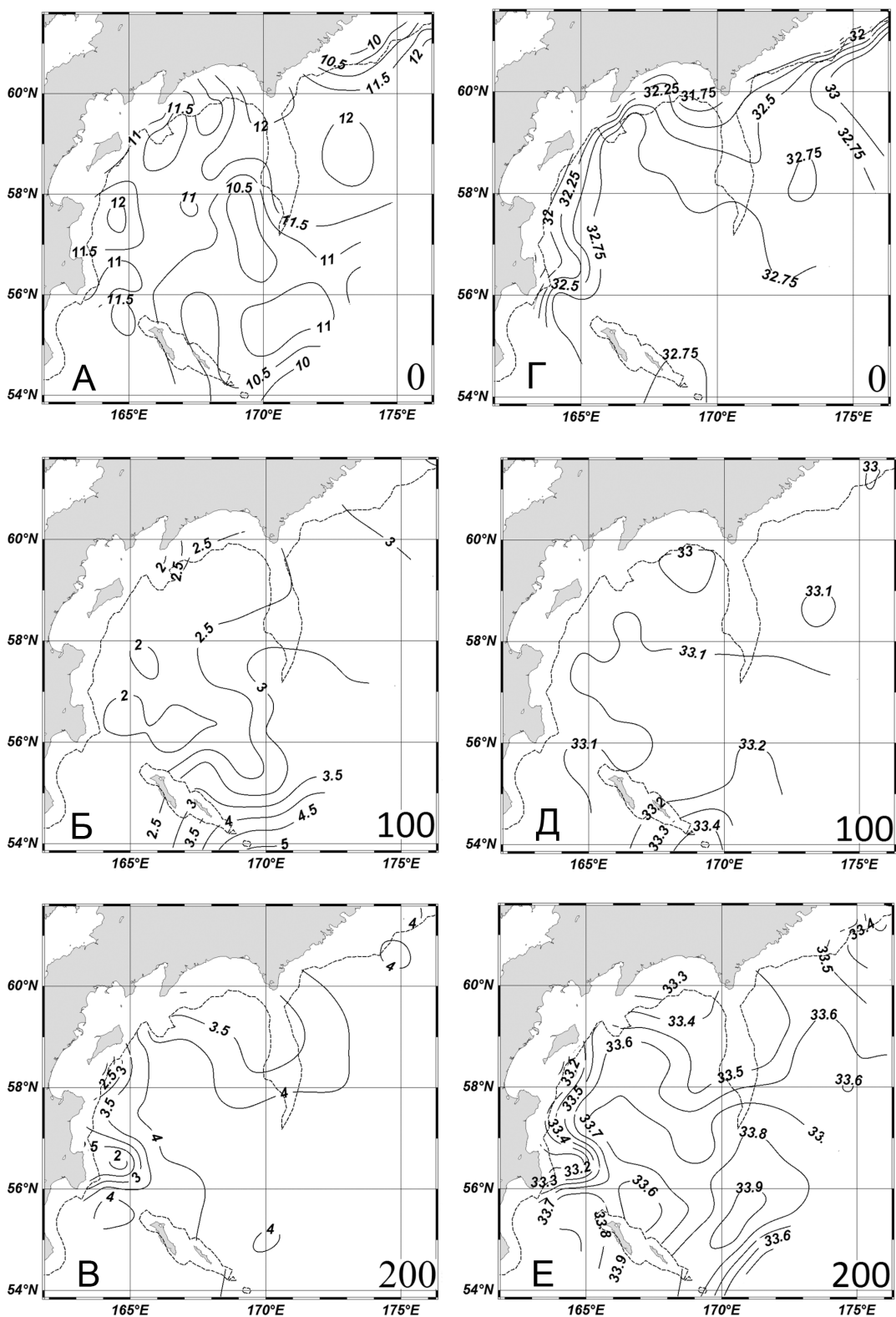


Рис. 14. Распределение температуры (А–В) и солёности (Г–Е) на горизонтах 0, 100 и 200 м в юго-западной части Берингова моря осенью 2018 г. по данным съёмки НИС «ТИНРО» и «Профессор Леванидов». Пунктиром показана изобата 1000 м

Fig. 14. Water temperature (А–В) and salinity (Г–Е) at the depth of 0, 100, and 200 m in the southwestern Bering Sea in fall of 2018 (RV TINRO and RV Professor Levanidov). Dotted line — the 1000 m isobath

Ядро холодного промежуточного слоя, характеризующее глубину проникновения и степень зимнего охлаждения, располагалось в Командорской котловине на глубине 80–140 м, в Алеутской котловине — на 120–220 м. Типичное положение ядра ХПС в сентябре-октябре — от 50 до 125 м [Лучин и др., 1999]. Углубление ядра ХПС по сравнению с его типичным летним положением было связано не только с поздним временем работ (начало осени), но и со слабым зимним охлаждением вод, поскольку при интенсивном зимнем выхолаживании температура в верхней части ХПС понижается и его ядро перемещается ближе к поверхности моря.

Температура и соленость на глубине 100 м (в пределах ХПС) в пределах Алеутской котловины были выше, чем в Командорской — до 3,0 °C, 33,0–33,2 епс, а вблизи прол. Ближнего — еще выше, против < 2,5 °C, < 33,0 епс в Командорской котловине, что, по-видимому, стало следствием интенсивного залива тихоокеанских вод в Алеутскую котловину через прол. Ближний.

Глубже 100–150 м происходило закономерное увеличение температуры и солености, поскольку ниже 300 м обычно залегает ядро теплого промежуточного слоя (ТПС). На горизонте 200 м вблизи о. Карагинского и в Камчатском проливе были отмечены наиболее низкие значения температуры и солености, что свидетельствовало о погружении вод на этих локальных участках. Еще один участок пониженной температуры и солености был расположен южнее Олюторского залива. На остальной акватории температура превышала 4 °C, соленость на большей части акватории была в диапазоне 33,6–33,9 епс, что свидетельствовало об интенсивном заливе тихоокеанских вод в предшествующее съемке время и о более близком к поверхности положении ядра ТПС. Такой заток наблюдается далеко не всегда, например, в сентябре-октябре 2009 г. на горизонте 200 м на этом же участке температура была 2,0–3,5 °C, соленость 33,4–33,7 епс, и в целом по всей юго-западной части моря температура и соленость были заметно ниже. То есть аномальные термохалинные условия в юго-западной части моря стали результатом не только слабого зимнего выхолаживания, но и интенсивной адвекции тихоокеанских вод летом.

В поверхностном и промежуточном слоях (глубже ядра ХПС) наибольшие положительные термические аномалии наблюдались на северной периферии этой части моря, а в подповерхностном слое на глубине 100 м — у прол. Ближнего, где аномалии достигали +2,2 °C (рис. 15). Ниже 500 м температура воды была примерно на 0,2 °C выше нормы, с максимальной аномалией +0,4 °C в Камчатском проливе, а на глубине 1000 м — в среднем на 0,1 °C выше нормы. Соленость в поверхностном и промежуточном слоях была выше среднегодовой, с наибольшими аномалиями у прол. Ближнего, а в подповерхностном слое преобладали отрицательные аномалии солености, особенно в северной части района.

В ходе гидрохимических работ в октябре 2018 г. на поверхности юго-западной части Берингова моря концентрация растворенного кислорода составила 6,2–6,8 мл/л при степени насыщения 96–106 % (отклонения от среднегодовых значений от –1,25 до –0,25 мл/л). Для сравнения, в аналогичный период более «холодного» 2010 г. концентрация растворенного кислорода колебалась от 6,92 до 8,15 мл/л при степени насыщения от 108 до 118 %. Содержание растворенного кислорода и концентрации биогенных веществ, наблюдаемые в поверхностном слое моря, соответствовали фазе затухания осеннего «цветения» фитопланктоном, за исключением материкового склона Камчатки, где «цветение» еще продолжалось. Такая ситуация расценивается как относительно раннее протекание осенних процессов, что, скорее всего, обусловлено аномальным прогревом поверхностного слоя моря.

Наиболее значительные отличия от среднегодовой картины в распределении кислорода были отмечены в области постоянного галоклина, отделяющего ХПС (формируемый осенне-зимней конвекцией) от теплого промежуточного слоя (тихоокеанской водной массы). На вертикальных профилях этот слой обычно расположен между 150–200 и 300–600 м, характеризуется максимальными градиентами в распределении биогенных веществ и резким падением содержания кислорода, которое связывают либо

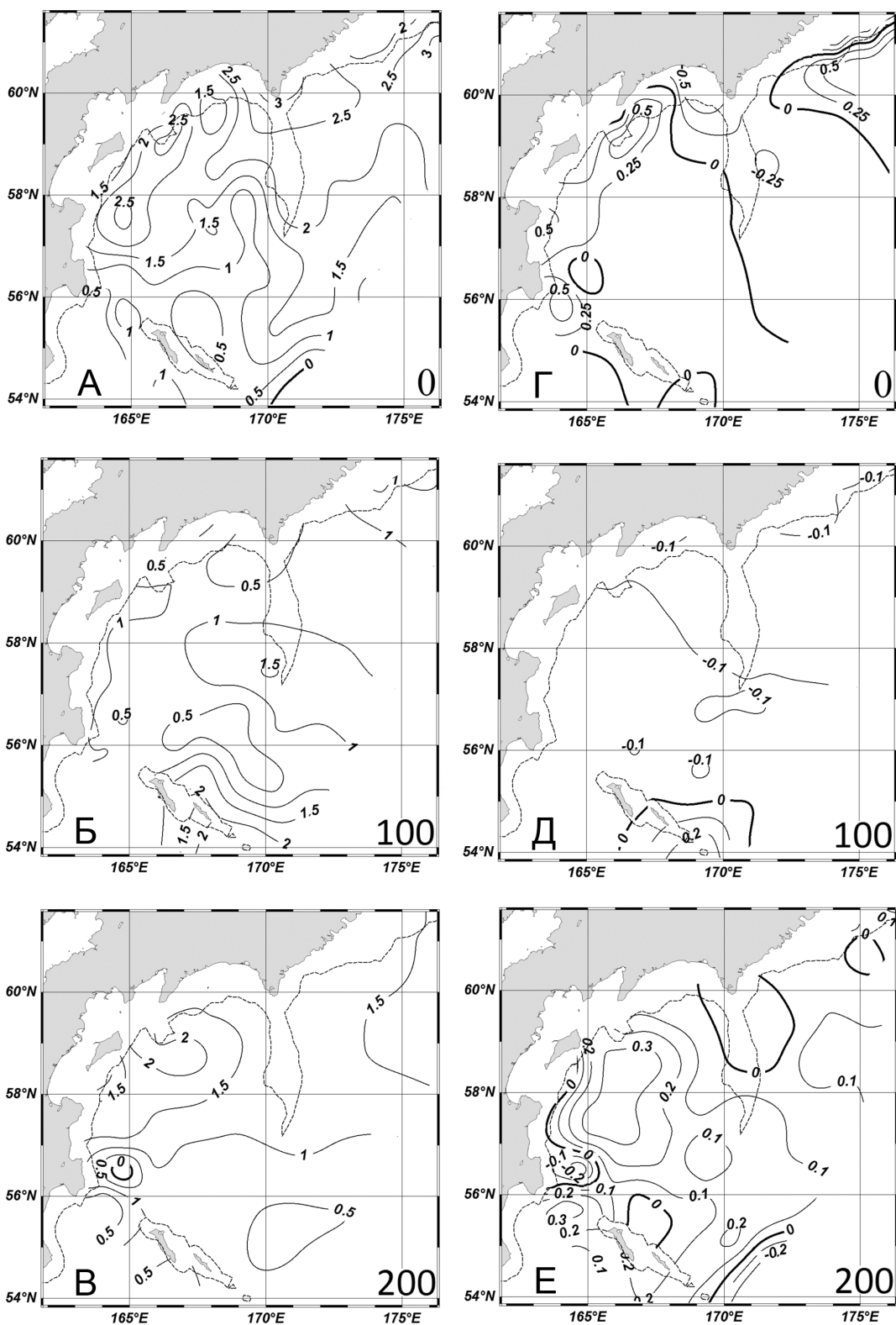


Рис. 15. Аномалии температуры (А–В) и солёности (Г–Е) на горизонтах 0, 100 и 200 м осенью 2018 г. по данным съёмки НИС «ТИНРО» и «Профессор Леванидов», приведенным к дате 15 сентября. Пунктиром показана изобата 1000 м

Fig. 15. Anomalies of water temperature (А–В) and salinity (Г–Е) at the depth of 0, 100, and 200 m in the southwestern Bering Sea in fall of 2018 re-calculated on September 15 (RV TINRO and RV Professor Levaniidov). Dotted line — the 1000 m isobath

с его биохимическим потреблением при разложении органического вещества, либо с разными возрастными характеристиками водных масс (вентилируемыми поверхностными и «старыми» промежуточными водами тихоокеанского происхождения). Самый низкий уровень аккумуляции растворенного кислорода в этом слое наблюдается в местах вторжения и дальнейшего распространения тихоокеанских вод [Лучин и др., 2001].

На горизонте 200 м пространственное распределение содержания кислорода во все сезоны следующее — минимум в прол. Ближнем, который является областью проникновения подповерхностных тихоокеанских вод, и увеличение содержания по мере приближения к материковому склону. Отмечалось [Ванин, Хен, 2009], что в Беринговом море в конце летнего сезона соотношения между биогенными веществами (силикатами и фосфатами) в слое основного галоклина близки к линейным. Осенью 2018 г. на глубине 200 м соотношения между содержанием растворенного кислорода, силикатами и фосфатами хорошо описывались линейными зависимостями (число наблюдений 29):

$$[P] = 0,025 \cdot [Si] + 0,621 (R^2 = 0,94),$$

$$[P] = -0,186 \cdot [O_2] + 3,381 (R^2 = 0,90),$$

$$[Si] = -7,457 \cdot [O_2] + 111,220 (R^2 = 0,95).$$

Отрицательные аномалии концентрации O_2 в Командорской котловине достигали 1,5–3,0 мл/л, т.е. содержание кислорода было местами почти наполовину ниже нормы (рис. 16). Соответственно, концентрация фосфатов и силикатов, напротив, почти повсеместно была повышенной, их аномалии (не показано) были противоположны аномалиям содержания растворенного кислорода. Подобные отклонения, вероятно, напрямую связаны с усиленной адвекцией тихоокеанских вод и недостаточно мощной зимней вентиляцией вод вблизи материкового склона.

В конце осени 2018 г. центр Алеутского минимума сместился на восток, расположившись с тихоокеанской стороны п-ова Аляска, и на акватории Берингова моря стали преобладать ветра северных румбов, причем они были сильнее обычных, аномалии скорости ветра в центральной части моря достигали 2–3 м/с. Однако, несмотря на усиление северных ветров, из-за накопленного теплозапаса вод положительные аномалии температуры воды и приземного воздуха сохранялись: в ноябре температура воздуха на Чукотке превышала норму в среднем на 5,0 °C, температуры поверхности моря были также выше нормы — на западе моря на 0,5–1,5 °C, на восточноберинговоморском шельфе местами до 3,0 °C (рис. 17, 18). Поэтому начало льдообразования на всей акватории моря вновь существенно отстало от среднесноголетних сроков: в декабре 2018 г. ледовитость моря была почти вдвое ниже среднесноголетней нормы.

Межгодовая изменчивость температуры воды и ледовитости

Межгодовые изменения средней годовой ТПМ для Берингова моря в целом и его отдельных областей представлены на рис. 19. Отчетливо прослеживаются тренд на рост температуры (наибольший на северо-западе моря), вариации температуры с периодом 5–6 лет и тенденция к росту амплитуды этих вариаций. Современный подъем ТПМ начался в 2014 г., хотя на юго-западе моря температуры выше среднесноголетних значений преобладали и до этого, по меньшей мере с 2003 г. В юго-восточной части моря максимум ТПМ был достигнут в 2016 г. (5,5 °C), а в северо-западной части моря рост продолжился и в 2017–2018 гг. В 2018 г. отклонение средней годовой ТПМ моря в целом от среднесноголетнего значения превысило 2σ , т.е. ситуация 2018 г. является статистически экстремальной. Тренды на увеличение температуры в западной части моря выше, чем в восточной, а наиболее значительны они в летние месяцы. Так, в августе тренд для всего моря оценивается в 0,06 °C/год ($r^2 = 0,44$), а для Анадырского залива и Командорской котловины — в 0,08 °C/год (r^2 соответственно 0,46 и 0,51), при том что для юго-восточной части моря — лишь в 0,04 °C/год ($r^2 = 0,14$). На севере моря значительный тренд на потепление характерен и для осенних месяцев (рис. 20). В 2018 г. ТПМ в этом районе превышала среднесноголетние значения во все месяцы, причем в мае и сентябре-ноябре отклонения от среднесноголетних значений превышали 2σ .

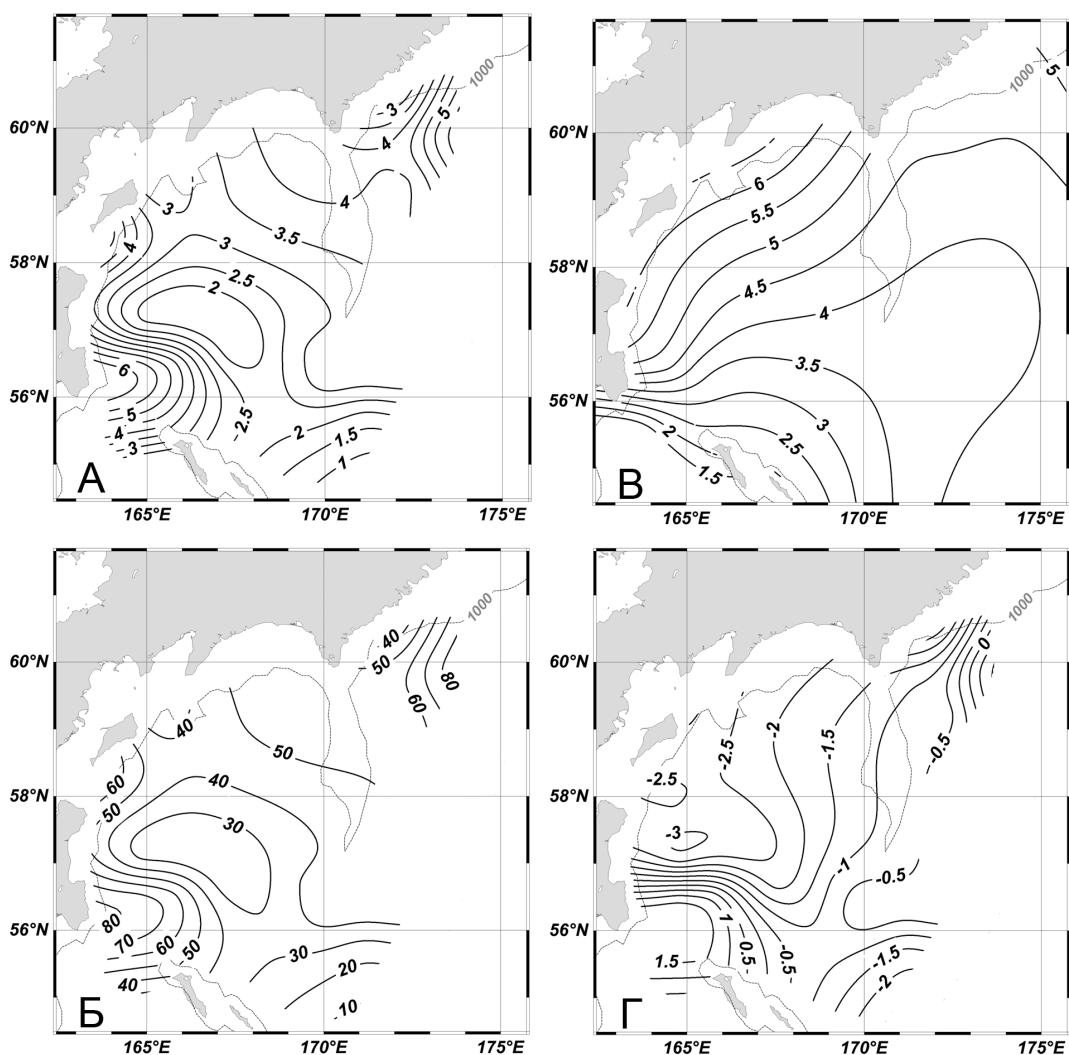


Рис. 16. Содержание растворенного кислорода на глубине 200 м в октябре 2018 г (А — мл/л, Б — %, его среднегодовое значения (Б) и аномалии в октябре 2018 г., мл/л (Г)
 Fig. 16. Dissolved oxygen content at the 200 m depth in October, 2018 (А — mL/L, Б — % of saturation) and its mean climatic values, mL/L (Б) and anomalies, mL/L (Г)

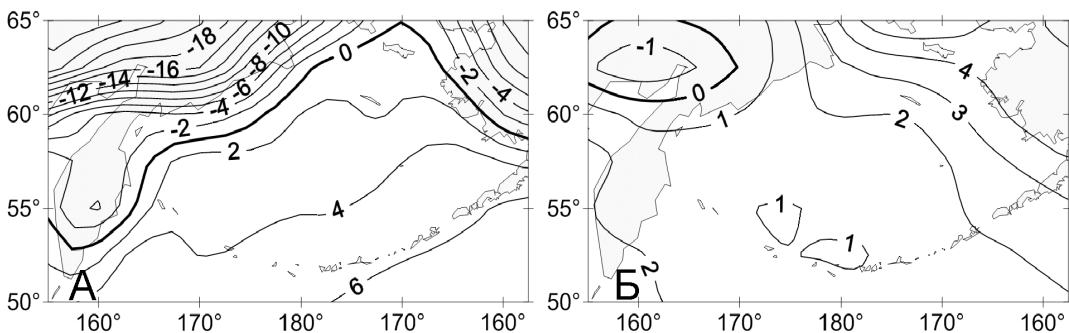


Рис. 17. Средняя за ноябрь 2018 г. температура воздуха (А) и ее аномалии (Б), °С
 Fig. 17. Air temperature at the ground/sea surface in November, 2018 (А) and its anomalies (Б), °С

С глубиной тенденция к потеплению ослабевает. На северо-западе моря межгодовые изменения средних по площади аномалий температуры воды в биостатистическом районе № 5 на глубине 50 м показали чередование теплых и холодных периодов с постепенно увеличивающейся продолжительностью циклов (рис. 21). Например, теплые

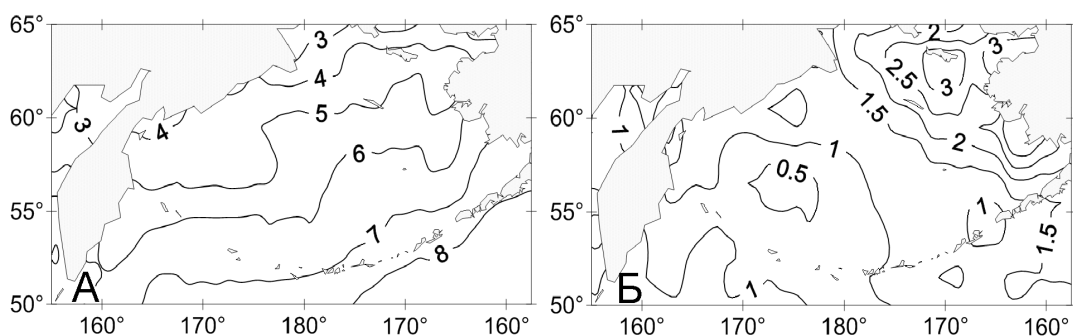


Рис. 18. Средняя за ноябрь 2018 г. температура поверхности Берингова моря (А) и ее аномалии (Б), °С

Fig. 18. Sea surface temperature in the Bering Sea in November, 2018 (А) and its anomalies (Б), °С

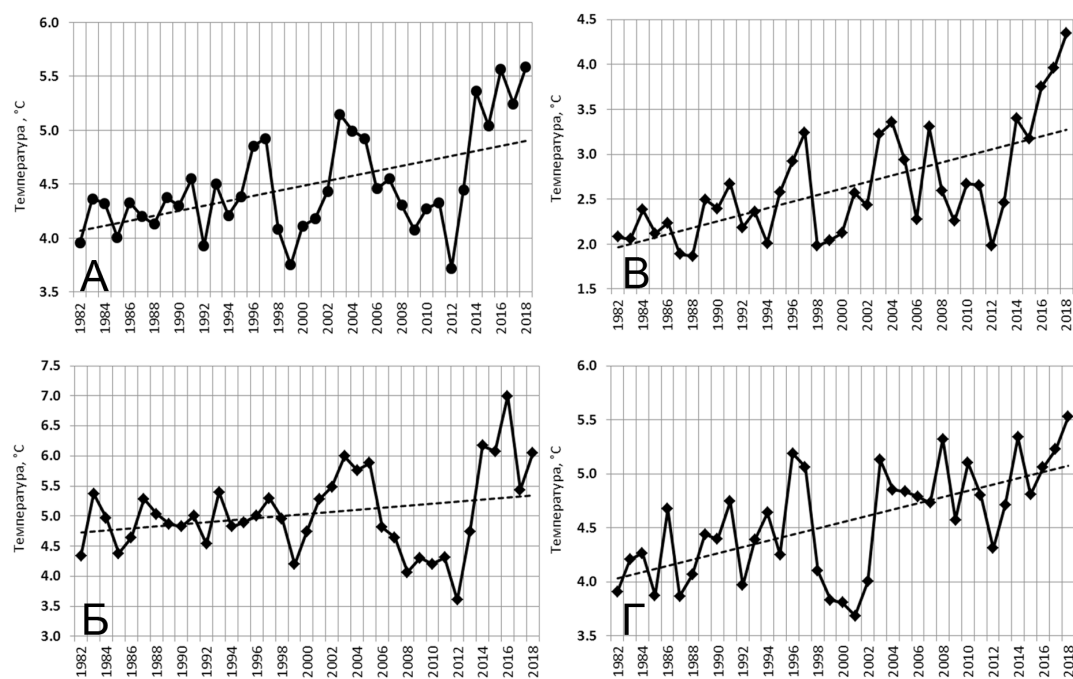
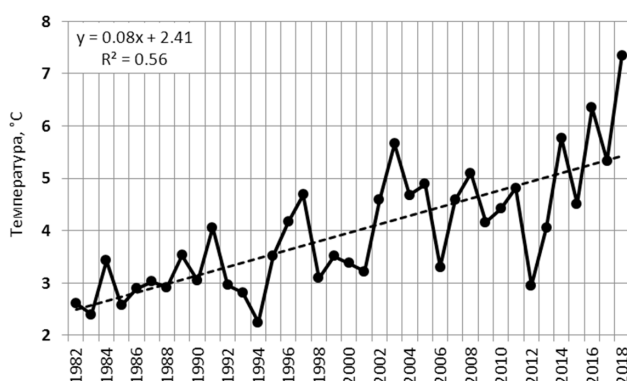


Рис. 19. Межгодовые изменения средней годовой температуры поверхности моря в Беринговом море в целом (А), в его юго-восточной части (Б), в северо-западном районе (В) и в районе Командорской котловины (Г). Пунктиром показаны линейные тренды для периода 1982–2018 гг. Расположение районов осреднения см. на рис. 2

Fig. 19. Year-to-year changes of mean annual sea surface temperature in the entire Bering Sea (А), its southeastern area (Б), its northwestern area (В), and in the Commander Basin (Г). Linear trends for the 1982–2018 are shown by dotted lines. See the areas location at Fig. 2

Рис. 20. Межгодовые изменения средней за октябрь температуры поверхности северо-западного района Берингова моря. Пунктиром показан линейный тренд для периода 1982–2018 гг. Расположение района см. на рис. 2

Fig. 20. Year-to-year changes of the sea surface temperature in the northwestern area of the Bering Sea averaged for October. Linear trend for 1982–2018 is shown by dotted line. See the area location at Fig. 2



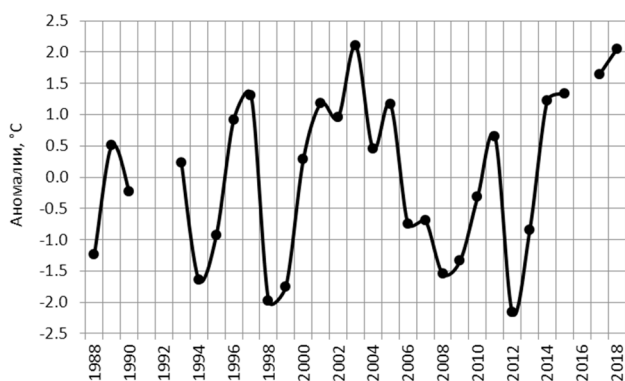


Рис. 21. Межгодовые изменения средних за июнь–ноябрь аномалий температуры воды на горизонте 50 м, осредненных по биостатистическому району № 5 в северо-западной части Берингова моря (положение района см. на рис. 2)

Fig. 21. Year-to-year changes of anomalies for the water temperature at 50 m depth in June–November averaged within the biostatistical area № 5. See the area location at Fig. 2

годы (1996–1997) сменились двумя холодными годами (1998–1999), затем в 2000–2005 гг. постоянно отмечались положительные аномалии, в 2006–2013 гг. (за исключением 2011 г.) снова было отмечено похолодание. Наконец, с 2014 по 2018 г. наблюдался новый цикл потепления. Средние по выделенной области аномалии достигли $+2^{\circ}\text{C}$ ($1,7\sigma$).

На юго-западе моря в новом цикле потепления положительные аномалии постепенно охватывали всю толщу вод: именно это наблюдалось в 2017 г. и особенно в 2018 г., который был экстремально теплым ($> 2\sigma$) от поверхности до нижних горизонтов измерений (рис. 22). Следует отметить очевидную связь потепления берингоморских вод с процессами, происходящими на северо-востоке Тихого океана, где с 2014 г. сформировалась область повышенных температур, вначале ограниченная глубиной 100 м, позже распространившаяся до 300 м, причем отклонения температуры от среднемноголетних значений в промежуточном слое также превысили 2 стандартных отклонения. Распространение этих аномально теплых тихоокеанских вод через южные проливы моря, вероятно, и привело к увеличению температурного фона в глубоких слоях Берингова моря.

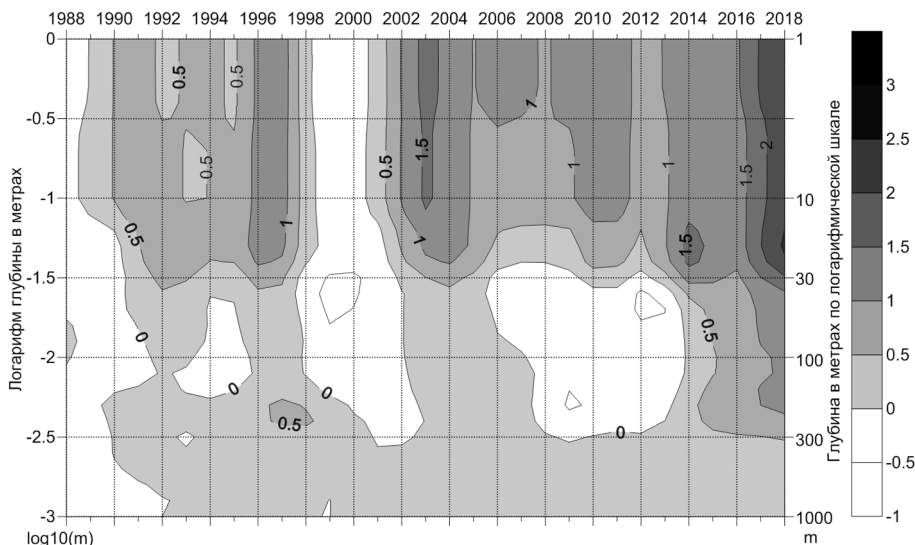


Рис. 22. Межгодовые изменения средних по юго-западной части Берингова моря аномалий температуры воды, $^{\circ}\text{C}$

Fig. 22. Year-to-year changes of water temperature anomalies averaged within the southwestern area of the Bering Sea, $^{\circ}\text{C}$. See the area location at Fig. 2

Ледовитость Берингова моря в любом из месяцев зимы 2017/18 г. была самой низкой за всю историю наблюдений начиная с 1979 г. (рис. 23). Однако в отличие от ТПМ межгодовые изменения ледовитости до последнего времени не обнаруживали значимого тренда, а уникальные условия 2018 г. представляются скорее случайным выбросом, чем результатом длительной тенденции. Это означает, что значимые тренды

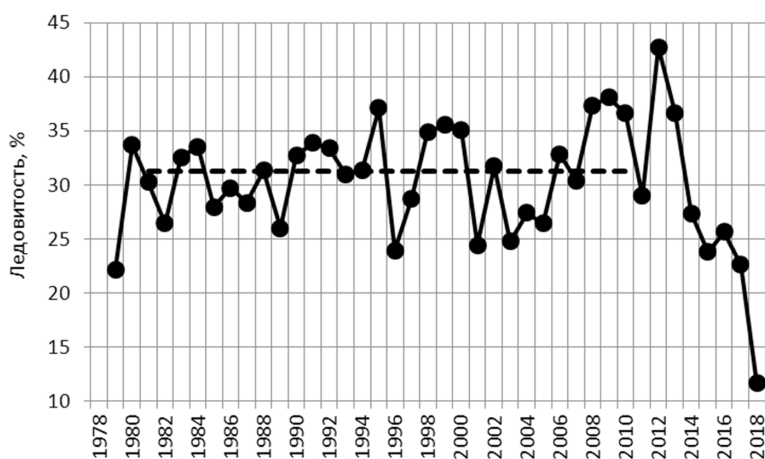


Рис. 23. Межгодовые изменения средней за январь–апрель ледовитости Берингова моря (пунктиром показано среднее значение ледовитости моря за 1981–2010 гг.)

Fig. 23. Year-to-year changes of the ice cover in the Bering Sea averaged for January–April. Dotted line — its mean climatic value for the 1981–2010

на повышение среднегодовой ТПМ отражают скорее изменения летних термических условий, чем зимних. Напротив, связь ледовитости и летних температур подповерхностного слоя легко объяснима, потому что этот слой формируется именно зимой и в условиях резкой летней плотностной стратификации сохраняет особенности условий в период своего формирования.

Теплосодержание всей толщи вод на шельфе в течение 6–7 мес. после разрушения льда имеет значимую статистическую связь с ледовитостью [Лучин, Соколов, 2007; Stabeno et al., 2012], размер Лаврентьевского холодного пятна донных шельфовых вод и его термохалинные характеристики также напрямую связаны с объемом льда [Overland et al., 2012]. На рис. 24 показана зависимость между средней за январь–апрель ледовитостью моря и площадью вод, занимаемых ЛХП (с температурой ниже 0°C) в пределах экономзоны России. От весны к лету ЛХП постепенно уменьшается в размерах [Басюк, 2009], что делает сложным сравнение данных съемок, выполненных в разное время года (например, в 2017 г. измерения проводились в июне-июле). Тем не менее связь между ледовитостью моря и размерами пятна прослеживается довольно отчетливо, коэффициент корреляции для горизонта 50 м составляет 0,76, у дна площадь ЛХП примерно вдвое меньше. Площадь, занимаемая водами с отрицательной температурой, является важным показателем суровости условий северной части Берингова моря. В «холодные» годы площадь низкотемпературных вод на глубине 50 м > 60 тыс. км², у дна — > 30 тыс. км², в «теплые» годы она сокращается до величин соответственно < 25 тыс. км² и < 12 тыс. км². По этому показателю 2018 г. можно отнести к одному из наиболее «теплых» (наряду с 2016 г.) за весь ряд наблюдений.

Согласно нормальному распределению, вероятность средней за январь–апрель ледовитости 11,7 %, отмеченной в 2018 г., оценивается приблизительно в 1/100, т.е. наблюдение такого явления в 40-летнем ряду наблюдений статистически маловероятно (что особенно наглядно на линеаризованном графике частот ледовитости). До последнего времени распределение частот среднезимней ледовитости в течение 40-летнего периода 1979–2018 гг. хорошо описывалось функцией нормального распределения, отклонение значений в конкретные годы от среднего значения (30,2 %) никогда не превышало 3σ (рис. 25). Предыдущий экстремальный случай — аномально высокая ледовитость зимой 2012 г. — характеризовался отклонением от среднего значения $< 2,5\sigma$. По-видимому, появление настолько малоледовитого года, как 2018 г., все же свидетельствует о нарушении стохастичности изменчивости ледовитости и отражает скрытую тенденцию к ее уменьшению, которая до последнего времени была незаметна из-за более мощных межгодовых флюктуаций.

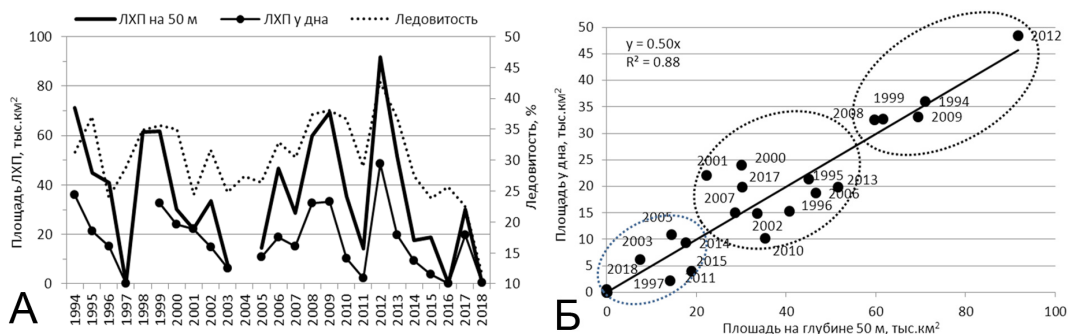


Рис. 24. Межгодовые изменения средней за январь-апрель ледовитости Берингова моря и площади распространения вод с температурой ниже 0 °С на глубине 50 м и у дна в пределах ИЭЗ России в августе-сентябре, принятой в качестве показателя развития Лаврентьевского холодного пятна (А), соотношение площадей низкотемпературных вод на глубине 50 м и у дна в разные годы (выделены группы «холодных», «нормальных» и «теплых» лет) (Б)

Fig. 24. Year-to-year changes of the ice cover in the Bering Sea averaged for January-April and the water area with temperature below 0 °C at the 50 m depth and at the sea bottom within the EEZ of Russia in August-September (A); correspondence between the cold water areas at the 50 m depth and at the sea bottom, by years (groups of cold, normal and warm years are shown) (B)

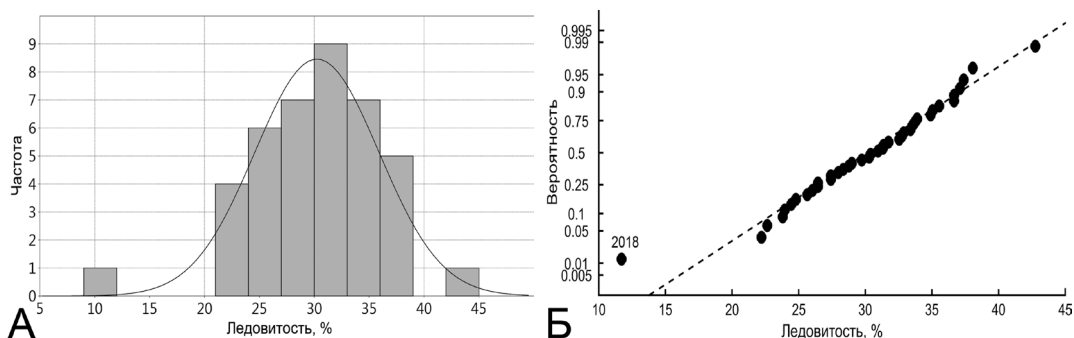


Рис. 25. Гистограмма частот значений средней за январь-апрель ледовитости Берингова моря (с шагом 3 %), аппроксимированная функцией нормального распределения (А) и линеаризованная функция распределения вероятности среднезимних значений (Б)

Fig. 25. Histogram of frequency for the Bering Sea ice cover averaged for January-April (by 3 % intervals) and its approximation by Gaussian curve (A); linearized function of probability for the mean winter ice cover (B)

Особенности циркуляции вод в 2018 г.

Хотя наиболее общие черты циклонической циркуляции вод Берингова моря с антициклоническим круговоротом на северном шельфе сохранялись в течение большей части 2018 г., все потоки отличались усиленными северными компонентами (рис. 26–29). Это способствовало проникновению относительно теплых вод из Тихого океана и южной части моря в его северную часть, где зимой они разрушали ледяной покров, а летом размывали холодные пятна донных вод на восточноберингоморском шельфе. Осенью 2018 г. циркуляция на северном шельфе принципиально изменилась: вместо Наваринского течения, обычно направляющегося на север по периферии Анадырского залива, наблюдался расположенный восточнее поток на север вдоль восточноберингоморского шельфа со скоростями 1–3 см/с, у о. Св. Лаврентия — до 5 см/с. Наваринское течение почти отсутствовало, заток вод в Анадырский залив происходил с востока, а не с юга из глубоководной части моря, как обычно. Наблюдался вынос вод из залива на юг вдоль 50-метровой изобаты со скоростью 5–10 см/с, который способствовал усилению течения юго-западного направления вдоль корякского побережья и далее в Камчатский пролив. В бассейне Чирикова к северу от о. Св. Лаврентия также сформировалась циклоническая циркуляция, перетока вод из Анадырского залива через прол. Чирикова практически не

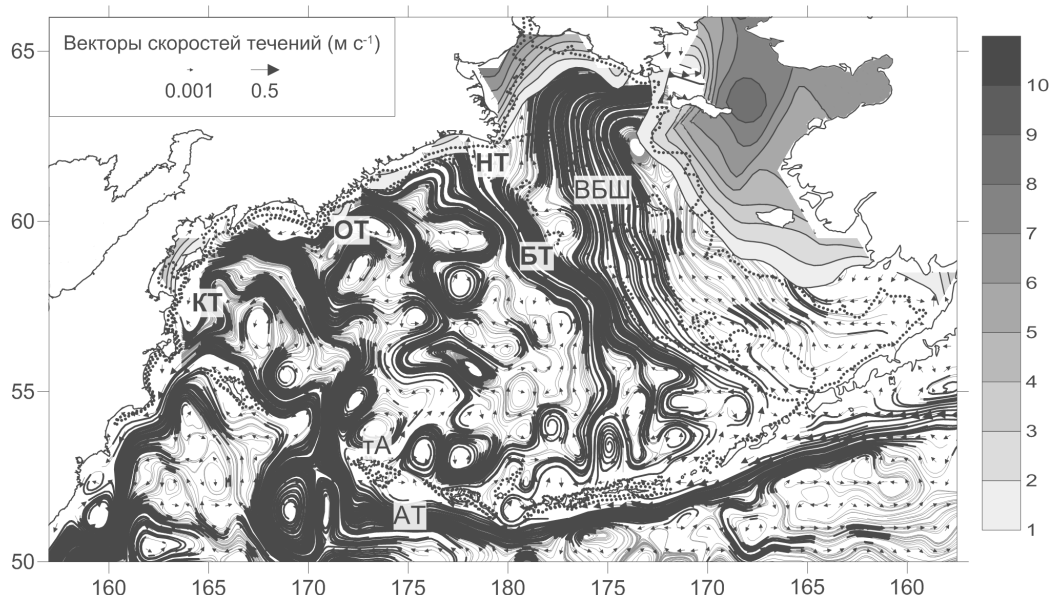


Рис. 26. Циркуляция вод (в виде векторов и линий тока вод) поверхностного слоя Берингова моря в феврале 2018 г. по модели OSCAR. Низкие скорости течений показаны более светлыми линиями тока, высокие ($> 0,05 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) — темными. В районах ледяного покрова изолиниями обозначена средняя месячная сплоченность льдов (в баллах, по шкале справа). Основные течения: *БТ* — Берингоморское, *КТ* — Камчатское, *АТ* — Алеутское, *тА* — Атту, *ВБШ* — поток вдоль восточнберингоморского шельфа, *НТ* — Наваринское (в данном примере не развито)

Fig. 26. Water circulation at the Bering Sea surface (beyond ice covered areas) in February, 2018, by OSCAR modeling. Streamlines are shown, those with the current velocity $> 0.05 \text{ m/s}$ are shown by black lines. Right scale — the ice cover density, points. Labels — the shortened names of the main currents: *БТ* — Bering Sea Slope Current, *КТ* — Kamchatka Current, *АТ* — Aleutian Current, *тА* — Attu Current, *ВБШ* — the current along the eastern Bering Sea shelf, *НТ* — Navarin Current (undeveloped in this case)

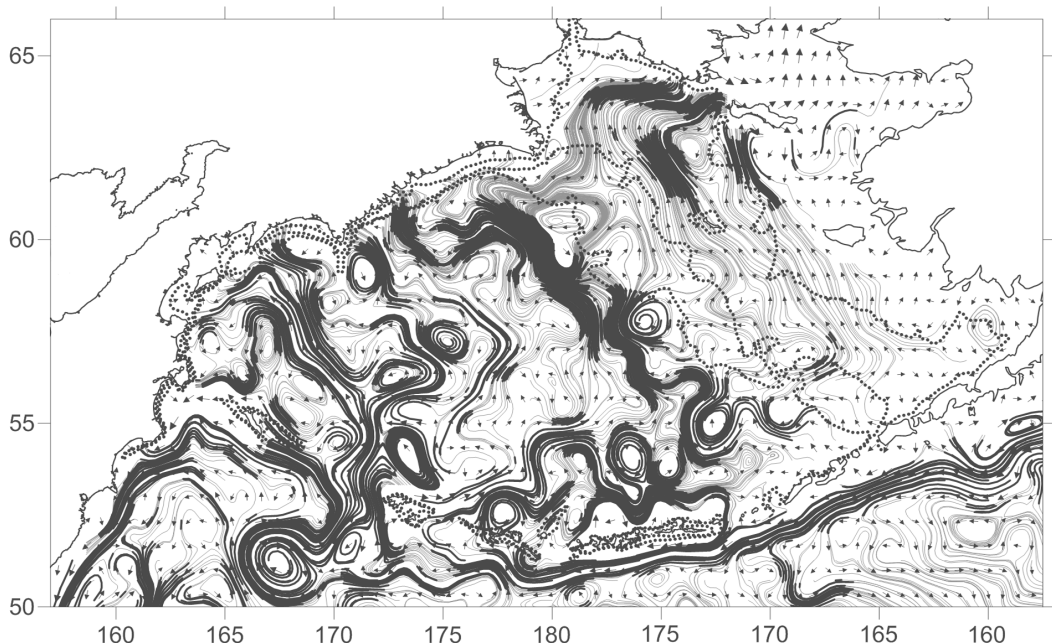


Рис. 27. Циркуляция вод в поверхностном слое Берингова моря в мае 2018 г. по модели OSCAR. Условные обозначения как на рис. 26

Fig. 27. Water circulation at the Bering Sea surface in May, 2018, by OSCAR modeling. Streamlines are shown, those with the current velocity $> 0.05 \text{ m/s}$ are shown by black lines

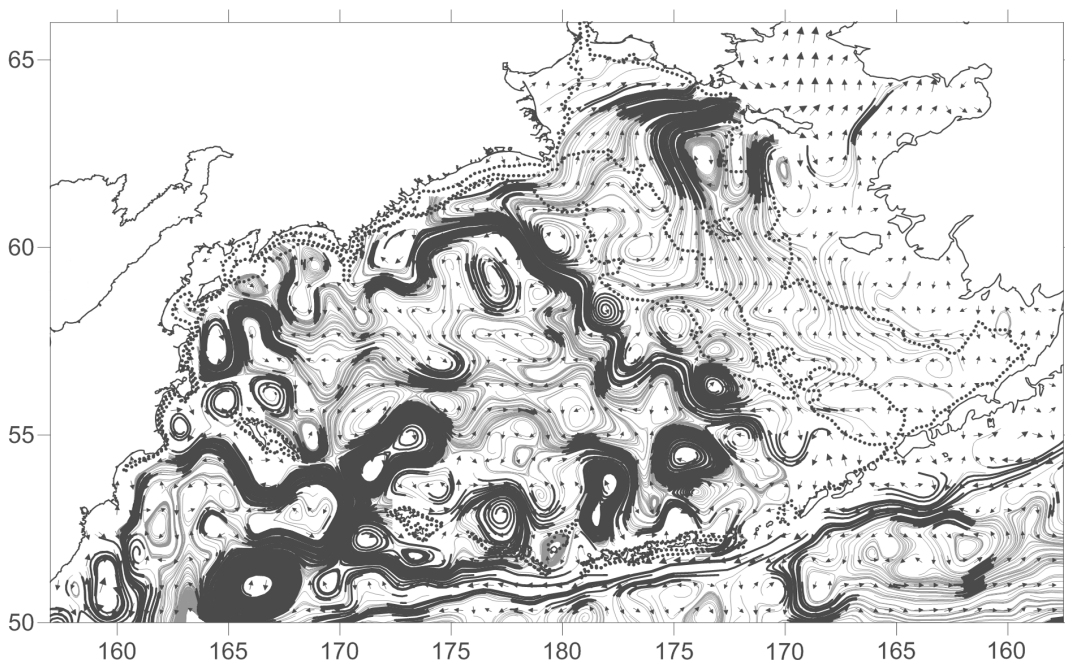


Рис. 28. Циркуляция вод в поверхностном слое Берингова моря в августе 2018 г. по модели OSCAR. Условные обозначения как на рис. 26

Fig. 28. Water circulation at the Bering Sea surface in August, 2018, by OSCAR modeling. Streamlines are shown, those with the current velocity > 0.05 m/s are shown by black lines

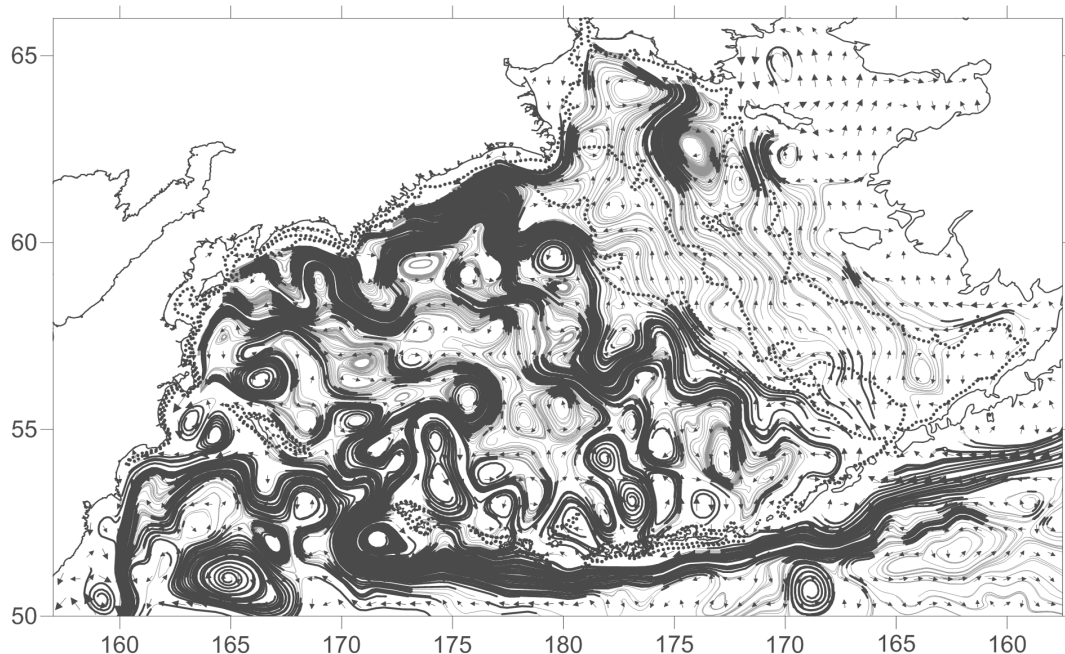


Рис. 29. Циркуляция вод в поверхностном слое Берингова моря в ноябре 2018 г. по модели OSCAR. Условные обозначения как на рис. 26

Fig. 29. Water circulation at the Bering Sea surface in November, 2018, by OSCAR modeling. Streamlines are shown, those with the current velocity > 0.05 m/s are shown by black lines

было. По-видимому, циклонические круговороты в бассейне Чирикова и Анадырском заливе сформировались под действием особого ветрового режима, другим следствием которого является развитие апвеллинга у берегов Чукотского полуострова, что ранее отмечалось Барнесом и Томпсоном [цит. по: Коучмен и др., 1979].

Характер циркуляции вод определяет источники, откуда вода поступает в северную часть Берингова моря. При обычной схеме поток вдоль восточноберингоморского шельфа, переносящий низкосоленные воды, формирующиеся у аляскинского побережья, к северу от 60° с.ш. поворачивает к западу, соединяется с северной ветвью Берингоморского течения, и далее поток Наваринского течения направляется к Берингову проливу [Лучин и др., 1989; Stabeno et al., 1999, 2016; Danielson et al., 2006]. Летом повороту вдольшельфового потока на запад способствует антициклонический круговорот, возникающий над холодным пятном на внешнем восточноберингоморском шельфе между о. Св. Лаврентия и о. Св. Матвея, поэтому лишь часть вод восточноберингоморского шельфа попадает в северную часть моря напрямую вдоль шельфа, в основном вдоль изобат 50 и 100 м (рис. 30). «Теплые» 2014–2018 гг. характеризовались разделением антициклонической системы на два отдельных центра, и в целом на северо-восточном шельфе наблюдалось ослабление антициклонической циркуляции вод, ось шельфового течения была сдвинута от 100-метровой изобаты на меньшие глубины. Адвекция в

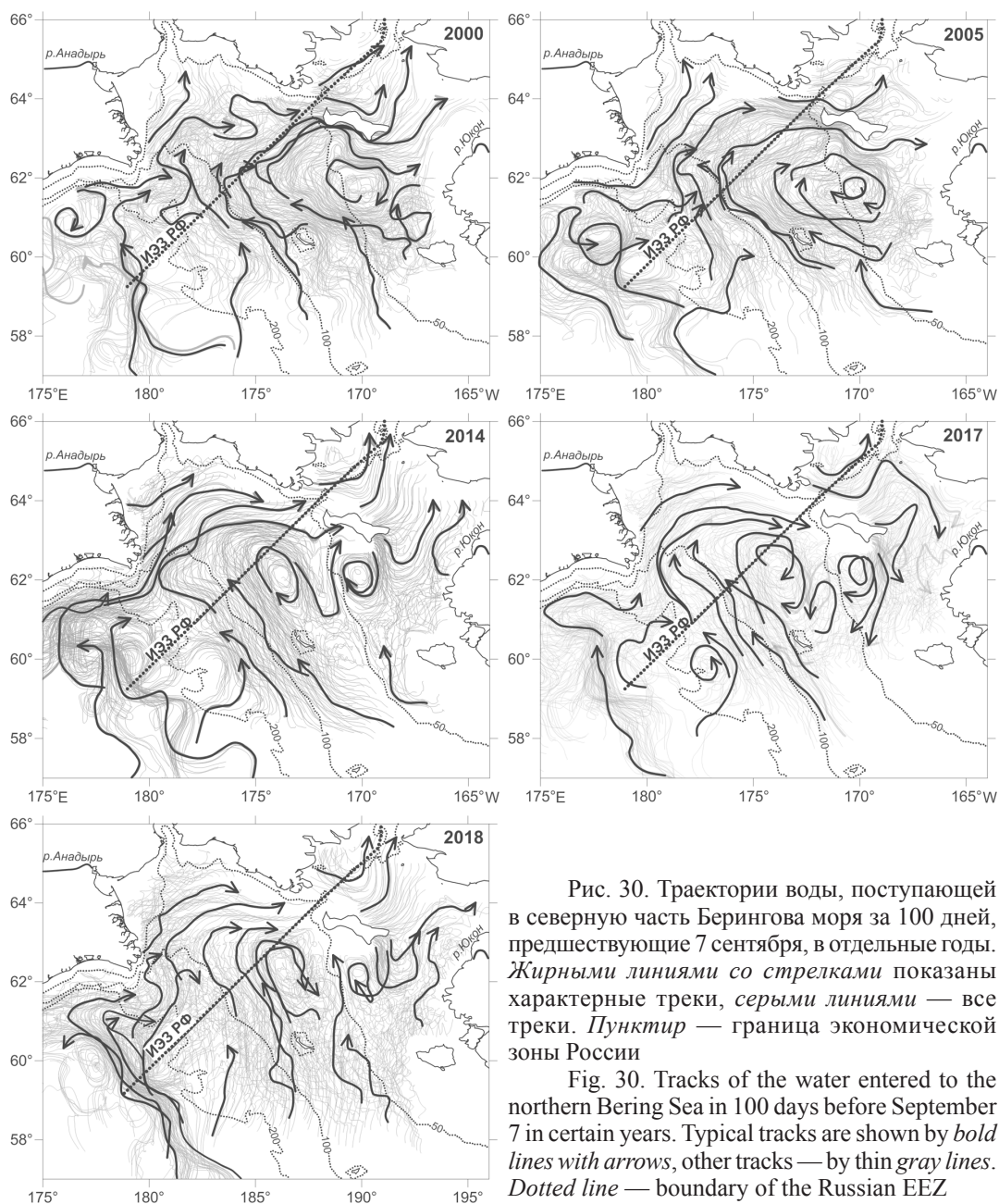


Рис. 30. Траектории воды, поступающей в северную часть Берингова моря за 100 дней, предшествующие 7 сентября, в отдельные годы. Жирными линиями со стрелками показаны характерные треки, серыми линиями — все треки. Пунктир — граница экономической зоны России

Fig. 30. Tracks of the water entered to the northern Bering Sea in 100 days before September 7 in certain years. Typical tracks are shown by bold lines with arrows, other tracks — by thin gray lines. Dotted line — boundary of the Russian EEZ

Анадырский залив и прилегающие воды экономической зоны России осуществлялась не столько с юга, сколько непосредственно с восточноберинговоморского шельфа.

Заключение

Анализ развития процессов в океане и атмосфере в 2018 г. показывает, что в основном под влиянием особенностей атмосферной циркуляции в Северной Пацифике, главными из которых являются усиление Гавайского антициклона и смещение Алеутского минимума на запад, в Беринговом море сложились условия экстремального потепления: аномально низкая ледовитость, повышенные температуры воды во всех слоях моря, повышенные температуры приземного воздуха, усиление затоков теплых тихоокеанских вод через Алеутские проливы, усиление относительно теплых течений и смещение на север их потоков, полное разрушение Лаврентьевского холодного пятна с отрицательными температурами. Заметим, что 2018 г. — не первый год с аномально теплыми условиями. В Беринговом море это уже пятый подряд аномально теплый год. В климатическом масштабе отмечается устойчивая тенденция на повышение температуры воды, причем во всех слоях, во все сезоны. Однако условия, наблюдавшиеся в 2018 г., выходят за рамки даже этой тенденции. Явным признаком экстраординарности ситуации стало принципиальное изменение характера циркуляции вод в северной части моря осенью 2018 г., когда направление циркуляции изменилось на противоположное. По-видимому, условия 2018 г. являются ориентиром для происходящих изменений, и на примере этого года можно представить, в какую сторону может происходить перестройка режима вод при сохранении тенденции к потеплению.

Ослабление антициклонического круговорота в северной части Берингова моря представляется наиболее важной особенностью условий, сложившихся в 2018 г. По-видимому, причиной такой аномалии явилось отсутствие придонного массива холодных шельфовых вод после мягкой зимы. Можно предположить, что в результате наблюдаемой перестройки циркуляции ослаб вынос беринговоморских вод через Берингов пролив, во всяком случае уменьшился вынос относительно теплых и соленых вод из глубоководной части моря, а вместо этого в пролив стала поступать вода из прибрежной зоны Аляски.

Следует ожидать, что дальнейшее развитие перестройки режима вод Берингова моря в направлении ситуации 2018 г. будет сопровождаться масштабной экологической перестройкой. Некоторые последствия такой перестройки также можно видеть на примере 2018 г., когда, к примеру, нагульные миграции восточноберинговоморского минтая проходили севернее, чем обычно. Однако вопросы влияния аномальных океанологических условий 2018 г. на биоту, в частности на миграции минтая и трески, требуют отдельного подробного рассмотрения и здесь не затрагиваются.

Финансирование работы

Работа не имела специального финансирования.

Соблюдение этических стандартов

У авторов нет конфликта интересов.

Информация о вкладе авторов

Текст статьи, включая формулирование результатов исследования, подготовлен авторами совместно; сбор и обработка информации, все расчёты, а также большинство иллюстраций выполнены Е.О. Басюком, постановка проблемы и концепция исследования — Ю.И. Зуенко.

Список литературы

Басюк Е.О. Динамика вод и особенности сезонной и межгодовой трансформации низкотемпературных вод северо-западной части Берингова моря // *Вопр. промысл. океанол.* — 2009. — Вып. 6, № 1. — С. 222–238.

Ванин Н.С., Хен Г.В. Вертикальная структура водных масс и кремний-фосфорные соотношения в западной части Берингова моря и в Охотском море // *Океанол.* — 2009. — Т. 49, № 3. — С. 381–392.

Коучмен Л.К., Огорд К., Трипп Р.Б. Берингов пролив : моногр. : пер. с англ. — Л. : Гидрометеиздат, 1979. — 198 с.

Лучин В.А., Меновщиков В.А., Лаврентьев В.М., Хен Г.В. Гидрология вод // *Гидрометеорология и гидрохимия морей*. Т. 10: Берингово море, вып. 1: Гидрометеорологические условия. — СПб. : Гидрометеиздат, 1999. — С. 77–153.

Лучин В.А., Меновщиков В.А., Хен Г.В. Циркуляция вод Берингова моря // *Тр. ДВНИГМИ*. — 1989. — Вып. 39. — С. 97–103.

Лучин В.А., Моторыкина Т.С., Матвеев В.И. Режим биогенных веществ // *Гидрометеорология и гидрохимия морей*. Т. 10: Берингово море, вып. 2: Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. — СПб. : Гидрометеиздат, 2001. — С. 82–121.

Лучин В.А., Соколов О.В. Межгодовая изменчивость и возможность прогноза термического состояния деятельного слоя вод Берингова моря // *Изв. ТИНРО*. — 2007. — Т. 151. — С. 312–337.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / под ред. В.В. Сапожникова. — М. : ВНИРО, 2003. — 202 с.

Danielson S., Aagaard K., Weingartner T. et al. The St. Lawrence polynya and the Bering shelf circulation: New observations and a model comparison models // *J. Geophys. Res.* — 2006. — Vol. 111, C09023. DOI: 10.1029/2005JC003268.

Garcia H.E., Locarnini R.A., Boyer T.P. et al. World Ocean Atlas 2013. Vol. 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation / ed. S. Levitus : NOAA Atlas NESDIS 75. — 2013a. — 27 p.

Garcia H.E., Locarnini R.A., Boyer T.P. et al. World Ocean Atlas 2013. Vol. 4: Dissolved Inorganic Nutrients (phosphate, nitrate, silicate) / ed. S. Levitus : NOAA Atlas NESDIS 76. — 2013b. — 25 p.

Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I. et al. World Ocean Atlas 2013. Vol. 1: Temperature / ed. S. Levitus : NOAA Atlas NESDIS 73. — 2013. — 40 p.

Luchin V., Kruts A., Sokolov O. et al. Climatic Atlas of the North Pacific Seas 2009: Bering Sea, Sea of Okhotsk, and Sea of Japan / V. Akulichev, Yu. Volkov, V. Sapozhnikov, S. Levitus (eds) : NOAA Atlas NESDIS 67, U.S. Gov. Printing Office, Wash., D.C., 2009. — 329 p. (DVD Disc).

Overland J.E., Wang M., Wood K.R. et al. Recent Bering Sea warm and cold events in a 95-year context // *Deep-Sea Res. II*. — 2012. — Vol. 65–70. — P. 6–13. DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.02.013.

Stabeno P.J., Danielson S.L., Kachel D.G. et al. Currents and transport on the Eastern Bering Sea shelf: An integration of over 20 years of data // *Deep-Sea Res. II*. — 2016. — Vol. 134. — P. 13–29. DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.05.010.

Stabeno P.J., Kachel N.B., Moore S.E. et al. Comparison of warm and cold years on the south-eastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem // *Deep-Sea Res. II*. — 2012. — Vol. 65–70. — P. 31–45. DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.02.020.

Stabeno P.J., Schumacher J.D., Ohtani K. The physical oceanography of the Bering Sea // *Dynamics of the Bering Sea*. — Fairbanks : Alaska Sea Grant College Program, 1999. — P. 1–28.

Zweng M.M., Reagan J.R., Antonov J.I. et al. World Ocean Atlas 2013. Vol. 2: Salinity / ed. S. Levitus : NOAA Atlas NESDIS 74. — 2013. — 39 p.

References

Basyuk, E.O., *Dinamika vod i osobennosti sezonnoy i mezhgodovoy transformatsii nizkotemperaturnykh vod severo-zapadnoy chasti Beringova morya* (Water dynamics and features of seasonal and inter-annual transformation of low-temperature waters of the north-western part of the Bering Sea), *Vopr. fishing oceanol.*, 2009, vol. 6, no. 1, pp. 222–238.

Vanin, N.S. and Khen, G.V., Vertical structure of water masses and silicon-phosphorus ratios in the west Bering Sea and in the Sea of Okhotsk, *Oceanology*, 2009, vol. 49, no 3, pp. 350–360.

Coachman, L.K., Aagaard, K., Tripp, R.B., *Bering strait*, London, 1975.

Luchin, V.A., Menovshchikov, V.A., Lavrentiev, V.M., and Khen, G.V., Hydrology of waters, *Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas*, vol. 10: Bering Sea, no 1: Hydrometeorological conditions, St. Petersburg, 1999, pp. 77–153.

Luchin, V.A., Menovshchikov, V.A., and Khen G.V., Water Circulation of the Bering Sea, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1989, vol. 39, pp. 97–103.

Luchin, V.A., Motorykina, T.S., and Matveev, V.I., The mode of nutrients, *Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas*, vol. 10: Bering Sea, no. 2: Hydrochemical conditions and oceanological basis for the formation of biological productivity, St. Petersburg, 2001, pp. 82–121.

Luchin, V.A. and Sokolov, O.V., Interannual variability and predictability of the active water layer thermal conditions in the Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2007, vol. 151, pp. 312–337.

Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybokhozyaystvennykh vodoyemov i perspektivnykh dlya promysla rayonov Mirovogo okeana (Guidelines for chemical analysis of marine and freshwater in the environmental monitoring of fishing reservoirs and promising areas for fishing of the oceans), Sapozhnikova, V.V., ed., Moscow: VNIRO, 2003.

Danielson, S., Aagaard, K., Weingartner, T., Martin, S., Winsor, P., Gawarkiewicz, G., and Quadfasel, D., The St. Lawrence polynya and the Bering shelf circulation: New observations and a model comparison models, *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, C09023. doi 10.1029/2005JC003268

Garcia, H.E., Locarnini, R.A., Boyer, T.P., Antonov, J.I., Mishonov, A.V., Baranova, O.K., Zweng, M.M., Reagan, J.R., and Johnson, D.R., *World Ocean Atlas 2013. Vol. 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*, NOAA Atlas NESDIS 75, Levitus, S., Ed., Mishonov, A., Technical Ed., Silver Spring, MD: NOAA, 2013a.

Garcia, H.E., Locarnini, R.A., Boyer, T.P., Antonov, J.I., Baranova, O.K., Zweng, M.M., Reagan, J.R., and Johnson, D.R., *World Ocean Atlas 2013. Vol. 4: Dissolved Inorganic Nutrients (phosphate, nitrate, silicate)*, NOAA Atlas NESDIS 76, Levitus, S., Ed., Mishonov, A., Technical Ed., Silver Spring, MD: NOAA, 2013b.

Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Garcia, H.E., Baranova, O.K., Zweng, M.M., Paver, C.R., Reagan, J.R., Johnson, D.R., Hamilton, M., and Seidov, D., *World Ocean Atlas 2013. Vol. 1: Temperature*, NOAA Atlas NESDIS 73, Levitus, S., Ed., Mishonov, A., Technical Ed., Silver Spring, MD: NOAA, 2013.

Luchin, V., Kruts, A., Sokolov, O., Rostov, V., Rudykh, N., Perunova, T., Zolotukhin, E., Pischalnik, V., Romeiko, L., Hramushin, V., Shustin, V., Udens, Y., Baranova, O., Smolyar, I., and Yarosh, E., *Climatic Atlas of the North Pacific Seas 2009: Bering Sea, Sea of Okhotsk, and Sea of Japan*, NOAA Atlas NESDIS 67, Akulichev, V., Volkov, Yu., Sapozhnikov, V., and Levitus, S., Eds., U.S. Gov. Printing Office, Wash., D.C., 2009. DVD.

Overland, J.E., Wang, M., Wood, K.R., Percival, D.B., and Bond, N.A., Recent Bering Sea warm and cold events in a 95-year context, *Deep-Sea Res. Part II*, 2012, vol. 65–70, pp. 6–13. doi 10.1016/j.dsr2.2012.02.013

Stabeno, P.J., Danielson, S.L., Kachel, D.G., Kachel, N.B., and Mordy, C.W., Currents and transport on the Eastern Bering Sea shelf: An integration of over 20 years of data, *Deep-Sea Res. Part II*, 2016, vol. 134, pp. 13–29. doi 10.1016/j.dsr2.2016.05.010

Stabeno, P.J., Kachel, N.B., Moore, S.E., Napp, J.M., Sigler, M., Yamaguchi, A., and Zerbini, A.N., Comparison of warm and cold years on the southeastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem, *Deep-Sea Res. Part II*, 2012, vol. 65–70, pp. 31–45. doi 10.1016/j.dsr2.2012.02.020

Stabeno, P.J., Schumacher, J.D., and Ohtani, K., The physical oceanography of the Bering Sea, *Dynamics of the Bering Sea*, Loughlin, T.R., and Ohtani, K., Eds., Fairbanks: Alaska Sea Grant College Program, 1999, pp. 1–28.

Zweng, M.M., Reagan, J.R., Antonov, J.I., Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., Boyer, T.P., Garcia, H.E., Baranova, O.K., Johnson, D.R., Seidov, D., and Biddle, M.M., *World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity*, NOAA Atlas NESDIS 74, Levitus, S., Ed., Mishonov, A., Technical Ed., Silver Spring, MD: NOAA, 2013.

Поступила в редакцию 29.05.2019 г.

После доработки 16.07.2019 г.

Принята к публикации 26.07.2019 г.