

Научная статья

УДК 551.515(265.51)

DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-183-205

EDN: XQOOOX



СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НАД БЕРИНГОВЫМ МОРЕМ В 1995–2022 ГГ.

С.Ю. Глебова*

Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. На основе использования авторских данных, рассчитанных для Берингова моря (6 типов атмосферных процессов; «локальные» меридиональные и зональные индексы циркуляции; количество и интенсивность циклонов), было составлено описание средних синоптических условий Берингова моря для зимы (январь–март), весны (апрель–июнь), лета (июль–сентябрь) и осени (октябрь–декабрь). Выявлены преобладающие для каждого сезона комбинации типовых синоптических ситуаций, направленность и интенсивность ветровой циркуляции (зимнего и летнего муссонов), особенности сезонной циклонической деятельности над западными и восточными районами Берингова моря; проведен анализ межгодовой изменчивости рассматриваемых параметров. Отмечено, что во все сезоны характер ветрового переноса в основном определяет циклоническая деятельность на западе: при ее активизации муссонный перенос зимой (северо-восточный) и летом (юго-западный) ослабевает, весной (юго-восточный) и осенью (северо-восточный) — усиливается. Выявленные в многолетнем ходе индексов циркуляции тренды позволяют заключить, что с середины 1990-х гг. зимы и осени становятся «теплее» (в конце 2010-х гг. зимой преобладающим стал юго-восточный перенос), весны — «холоднее», поскольку ветровой перенос изменился с юго-восточного (в начале 2000-х гг.) до интенсивного северо-восточного (конец 2010-х г.); летом в ходе меридионального индекса трендов не выявлено, в ходе зонального прослеживается отрицательная тенденция (западный перенос ослабевает). Показано, что во все сезоны периоды (и тенденции) похолодания и потепления гидрологического режима северо-западной части Берингова моря, как правило, совпадают с периодами преобладающего ветрового переноса.

Ключевые слова: типы атмосферных процессов, количество и интенсивность приземных циклонов, характеристики атмосферной циркуляции, климатические тренды, сезонные особенности гидрологического режима Берингова моря

Для цитирования: Глебова С.Ю. Сезонные особенности и межгодовые изменения атмосферной циркуляции над Беринговым морем в 1995–2022 гг. // Изв. ТИНРО. — 2024. — Т. 204, вып. 1. — С. 183–205. DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-183-205. EDN: XQOOOX.

* Глебова Светлана Юрьевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, svetlana.glebova@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0006-5736-5758.

© Глебова С.Ю., 2024

Seasonal patterns and interannual variations of atmospheric circulation over the Bering Sea in 1995–2022

Svetlana Yu. Glebova

Pacific branch of VNIRO (TINRO), Shevchenko Alley, 4, Vladivostok, 690091, Russia
Ph.D., leading researcher, svetlana.glebova@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0006-5736-5758

Abstract. Mean patterns of atmospheric circulation over the Bering Sea in 4 seasons: winter (January–March), spring (April–June), summer (July–September) and autumn (October–December) are described using the author’s typification of synoptic situations. Frequency of all 6 types of synoptic situations is calculated and the predominant types are determined, by season. Mean values of the meridional and zonal indices of atmospheric circulation and the number and intensity of cyclones in the Bering Sea area are calculated for each season in the period 1995–2022. Cyclonic activity and direction and intensity of general wind transfer, particularly intensity of winter and summer monsoons, are considered separately for the western and eastern parts of the Bering Sea. Interannual variations of all these parameters are traced. For all seasons, the wind transfer over the entire area is determined by cyclonic activity in the western Bering Sea: the higher activity leads to weaker monsoon in winter (northeasterly) and summer (southwesterly) but strengthening in spring (southeasterly) and autumn (northwesterly). Since the middle 1990s, autumns and winters in the Bering Sea became warmer (with the warmest period in the late 2010s when southeasterlies prevailed in winter), but springs became colder (southeastern wind transfer in early 2000s changed to the northeastern one in late 2010s), with no definite tendency for summer, when the meridional index of atmospheric circulation was rather stable and the zonal index had a negative trend (weakening of westerlies). Trends and cycles of oceanographic conditions in the northwestern Bering Sea generally coincided with the changes in wind transfer in any season.

Keywords: type of synoptic situation, cyclone, cyclone intensity, atmospheric circulation, climate trend, oceanographic regime, Bering Sea

For citation: Glebova S. Yu. Seasonal patterns and interannual variations of atmospheric circulation over the Bering Sea in 1995–2022, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2024, vol. 204, no. 1, pp. 183–205. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-183-205. EDN: XQQOOX.

Введение

Берингово море имеет уникальное местоположение, являясь самым северным из морей Тихого океана. Главными факторами, формирующими климатический фон бассейна, являются сезонные центры действия атмосферы (ЦДА): в холодный период года Берингово море испытывает воздействие Алеутского минимума и северо-восточного отрога Сибирского максимума; в теплые сезоны преобладающее влияние оказывают Северотихоокеанский антициклон и ложбина Дальневосточной депрессии; периодически может проявляться воздействие арктической области низкого давления. Положение и интенсивность этих барических образований, а также сроки их возникновения и прекращения деятельности меняются от сезона к сезону, что приводит к возникновению над Беринговым морем различных типов синоптических ситуаций, формируется неустойчивый климатический режим, относящийся к муссонному типу (с сезонной сменой господствующих ветров).

Большую роль в становлении погодных условий района играют и приходящие циклоны, «ответственные» за перемещение над морем воздушных масс и атмосферных фронтов и вызывающие штормовые ветры и сильное волнение, т.е. оказывающие непосредственное влияние на характер теплообмена между морем и атмосферой.

Исходя из того, что Берингово море является одной из наиболее продуктивных морских экосистем мира, изучение климатических особенностей, имеющих принципиально различный характер атмосферных процессов на сезонном уровне, может представлять практический интерес не только для исследовательской, но и для промысловой деятельности.

Целью настоящей работы является оценка особенностей формирующихся над Беринговым морем синоптических условий, характерных для зимы (январь-март), весны (апрель-июнь), лета (июль-сентябрь), осени (октябрь-декабрь), выявление тенденций в их межгодовом ходе, а также оценка их роли в формировании сезонных гидрологических процессов.

Материалы и методы

Оценка особенностей атмосферного режима над Беринговым морем по сезонам проводилась при помощи следующих параметров:

- типы синоптических процессов по авторской классификации [Глебова, 2001, 2003];
- индексы атмосферной циркуляции А.Л. Каца [1960] как количественный показатель интенсивности и направленности воздушного переноса над Беринговым морем;
- количество и интенсивность циклонов, проходивших над морем в течение каждого сезона.

Эти параметры определялись по ежедневным синоптическим картам приземного давления за 00 h Японского метеорологического агентства (JMA) за 1995–2022 гг.

Для выявления типовых синоптических ситуаций, а также для расчета индексов циркуляции строились декадные карты приземного давления. Для этого в районе 30–70° с.ш. 100° в.д.–160° з.д., в точках координат с шагом 10° по широте и долготе, снимались значения давления и осреднялись для каждых 10 дней, и по осредненным данным составлялись карты среднего декадного приземного давления. Всего было построено 1008 средних декадных карт, каждая из которых характеризует ситуацию в распределении региональных барических систем (фактически центров действия атмосферы).

Атмосферные процессы были классифицированы по положению ЦДА и их градиентных зон относительно Берингова моря (подробная методика описана ранее [Глебова, 2001, 2003]). Всего выделено 6 основных синоптических типов (рис. 1):

— I тип (малоградиентный) отличается разреженным барическим полем, чаще всего связан с формированием Северотихоокеанского антициклона; при этой ситуации преобладает спокойная, маловетренная погода, происходит активный прогрев деятельного слоя;

— II тип формируется при взаимодействии передней ложбины расположенного над Охотским морем циклона и тылового гребня Северотихоокеанского антициклона, в результате чего над Беринговым морем образуется меридионально ориентированная градиентная зона, преобладают южные ветры, способствующие адвекции теплого воздуха в западные и центральные районы моря. В летнее время года разновидностью данного типа может быть направленная в сторону Берингова моря ложбина Дальневосточной депрессии;

— при III типе обширный циклон располагается над Чукоткой либо северными районами Берингова моря, под воздействием его южной ложбины над морем преобладают ветры западной четверти;

— при IV типе центр депрессии располагается на востоке Берингова моря либо над зал. Аляска, и почти все море оказывается в сфере влияния ее глубокой тыловой ложбины; над морем наблюдается северо-восточный ветровой перенос, с которым поступают холодные воздушные массы, поэтому данная синоптическая ситуация характеризуется как «холодная»;

— при V типе центр Алеутской депрессии устойчиво локализуется у юго-восточного побережья Камчатки или над западной частью моря, вызывая в этих районах сильные и штормовые юго-восточные переносы и способствуя адвекции теплого воздуха в центральные и восточные районы моря; его следует отнести к разряду «умеренно-теплых»;

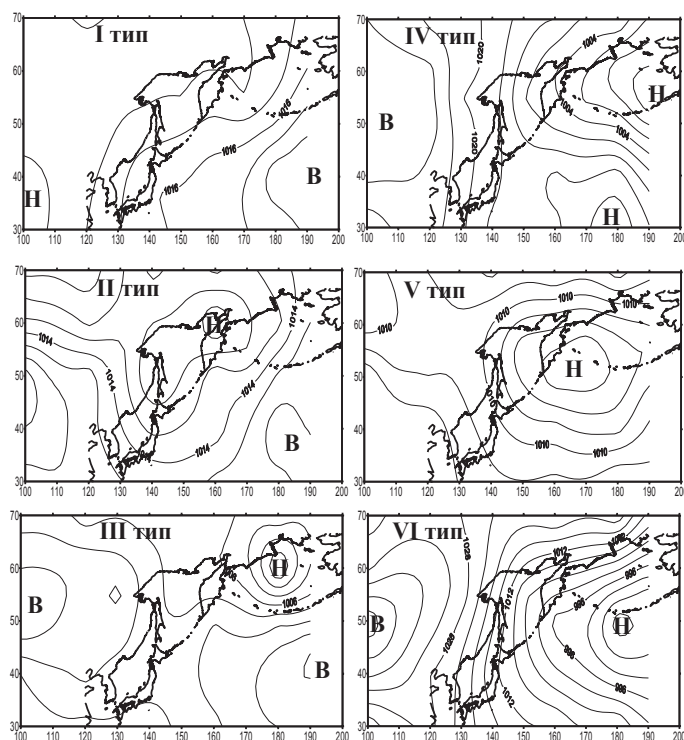


Рис. 1. Типовые синоптические ситуации, формирующиеся над Беринговым морем
Fig. 1. Typical synoptic situations forming over the Bering Sea

— расположение центра депрессии над Алеутскими островами или южнее их соответствует VI типу, подобная ситуация способствует развитию интенсивных восточных ветров на всей акватории и притоку в западные районы моря теплых океанических водных масс через систему течений; этот тип можно считать «теплым».

IV, V и VI типы связаны с положением центра Алеутской депрессии.

Индексы атмосферной циркуляции А.Л. Каца рассчитывались путем подсчета количества изобар, проведенных через 5 гПа, с учетом их направленности и пересекающих параллели и меридианы района 50–65° с.ш. 160° в.д.–160° з.д., включающего в себя Берингово море, с шагом 10° (подробное описание методики представлено ранее [Глебова, 2007]). Были определены зональный (Iз) и меридиональный (Iм) индексы: положительные значения Iм и Iз характеризуют южный и западный переносы, а их отрицательные значения соответствуют северному и восточному переносам.

Циклоническая деятельность оценивалась по двум параметрам: количество циклонов и их интенсивность, выраженная через индекс циклоничности А.В. Куницына [1956]. Для этого использовались специальные бланки, на которых район 50–65° с.ш. 160° в.д.–160° з.д. разбивался на квадраты 5×5°, и далее подсчитывалось число циклонов (N), проходивших через каждый квадрат в течение месяца. Для этих же квадратов рассчитывался индекс циклоничности (K) по числу замкнутых изобар вокруг центра циклона, возведенному в квадратную степень; данный показатель характеризует энергетические запасы циклона (фактически его глубину). Для определения средней интенсивности циклонов за месяц в каждом квадрате вычислялось отношение суммы индексов циклоничности к числу циклонов ($\Sigma K/N$). Детально эта методика была описана ранее [Глебова, 2021].

Месячные значения всех полученных индексов, а также количество типов в декадах суммировались для четырех сезонов: зима (январь–март), весна (апрель–июнь), лето (июль–сентябрь), осень (октябрь–декабрь), а затем формировались многолетние ряды данных за 1995–2022 гг.

Для лучшей сравнимости результатов и исключения короткопериодной изменчивости все ряды сглаживались скользящим осреднением по 5-летним периодам.

Количественная оценка тесноты связи между параметрами проводилась методом корреляционного анализа. Для определения значимости связи для 25-летнего ряда наблюдений было установлено пороговое значение коэффициента корреляции, соответствующее $R = 0,42$ при $p = 5\%$.

Результаты и их обсуждение

Особенности атмосферной циркуляции над Беринговым морем зимой

Количественное соотношение синоптических процессов, формирующихся над Беринговым морем во все сезоны, представлено на рис. 2. В зимний период самым активным ЦДА вблизи Берингова моря является Алеутская депрессия, поэтому вполне



Рис. 2. Диаграммы повторяемости типов атмосферных процессов и вероятность их появления над Беринговым морем в разные сезоны по месяцам

Fig. 2. Frequency of typical synoptic situations in winter, spring, summer, and autumn and probability of their occurrence by month

обоснованно, что типы, обусловленные ее местоположением, возникают чаще — на долю IV, V и VI типов приходится соответственно 25, 24 и 43 % (рис. 2). Самым «активным» является VI тип (депрессия южнее Берингова моря, над бассейном преобладает восточный перенос), причем вероятность его появления возрастает от января к февралю и почти вдвое сокращается в марте.

Повторяемость IV и V типов, которые характеризуются локализацией Алеутского минимума над восточными и западными районами Берингова моря, почти одинаковая, при этом от месяца к месяцу количество IV типа (с северо-восточными переносами) постепенно сокращается, а V типа (с юго-восточными переносами), наоборот, возрастает.

Влияние охотского циклона, с которым связано формирование II типа и распространение над Беринговым морем южных ветров, проявляется крайне редко, всего в 7 % случаев, и в основном в марте; малоградиентные процессы I типа зимой практически не отмечаются (рис. 2).

Берингово море находится в зоне активной циклонической деятельности, ежемесячно над его акваторией может проходить до 10 циклонов. Из-за большой широтной протяженности моря циклоны поступают и на западную, и на восточную его половину, по-разному влияя на погодный режим.

Как оказалось, в среднем количество и интенсивность циклонов в этих районах зимой равны (рис. 3), и причиной этому может быть пропорциональное формирование в течение сезона IV и V типов.

Периодические смещения депрессии в западно-восточном направлении вызывают смену траекторий циклонов и, соответственно, их распределение по районам: повторяемость «восточных» циклонов положительно коррелирует с IV типом ($R = 0,49$), а «западных» — с V типом ($R = 0,59$). С VI типом связь оказалась весьма слабой, и это позволяет предположить, что нахождение Алеутской депрессии над океаном не может являться «абсолютным ограничением» для поступления циклонов в тот или иной район моря. Характерно, что интенсивность циклонов в обоих районах от синоптических ситуаций практически не зависит (связь невыраженная).

Частая смена типовых ситуаций и, следовательно, направлений перемещения циклонов способствует нестабильности погодных условий из-за резкой смены ветров. Тем не менее преобладающим зимой является северо-восточный перенос (рис. 3, в), восточная составляющая (Iз) которого в семь раз интенсивнее северной (Iм). С одной стороны, причиной активизации восточных ветров является преимущественное появление зимой VI типа, с другой — «ослабление» северного переноса может быть связано с формированием V и II типов, при которых северная направленность ветровой циркуляции меняется на южную.

В многолетнем плане повторяемость синоптических типов, как и соотношение между ними, может существенно колебаться, устанавливая тем самым характер погодо-климатических условий. Судя по представленным графикам (рис. 4), в ходе основных IV, V и VI типов можно обнаружить 10–12-летнюю периодичность, причем у IV и V типов тенденции противоположные.

В соответствии со сменой типовых ситуаций менялся и характер циклонической деятельности. На рис. 5 (а, б) хорошо видно, что колебания количества и интенсивности циклонов на западе моря находились в соответствии с ходом V типа: при увеличении его количества (как правило, в конце каждого десятилетия) число циклонов и особенно их интенсивность увеличивались. Во второй половине 2010-х гг., на фоне максимальной повторяемости V типа, глубокие циклоны на запад моря стали приходить наиболее часто.

На востоке моря отмечалась обратная картина: после активной циклонической деятельности в конце 1990 — начале 2000-х гг. вслед за сокращением количества IV типа число приходящих сюда циклонов постепенно снижалось, а их мощность к концу 2010-х гг. достигла самых наименьших показателей (рис. 5, в, г).

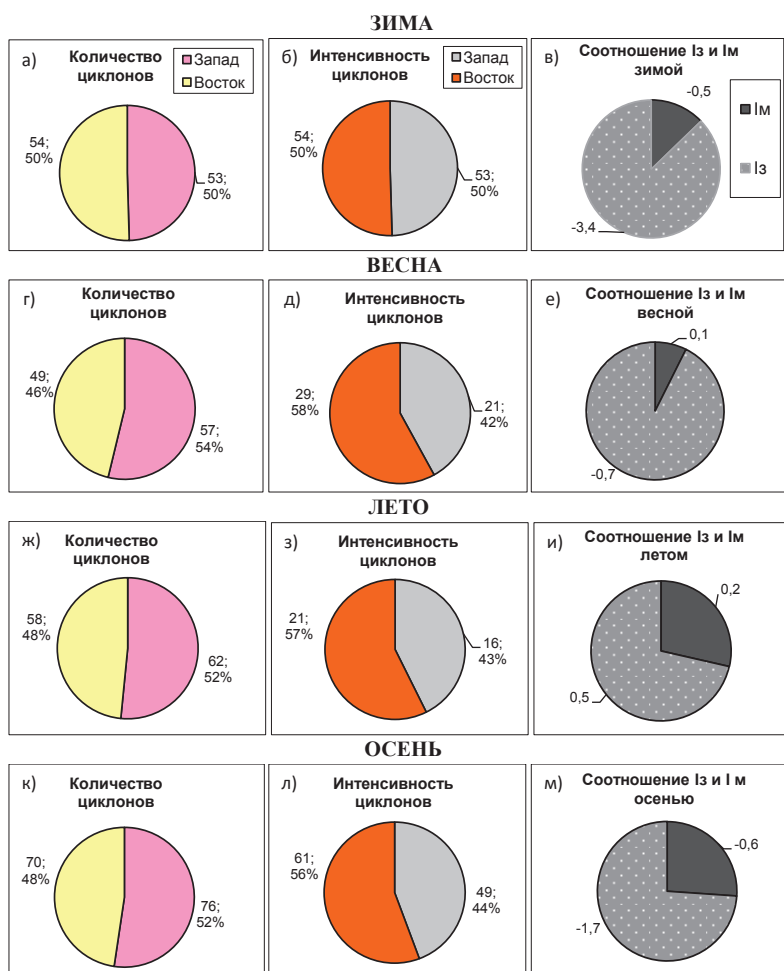


Рис. 3. Диаграммы соотношения среднесезонных значений количества и интенсивности циклонов на западе и востоке Берингова моря в процентах и в абсолютных значениях (**слева** и в **центре**) и индексов атмосферной циркуляции (**справа**) над берингоморским бассейном зимой, весной, летом и осенью. Западному и южному переносам соответствуют положительные значения I_з и I_м, восточному и северному — их отрицательные значения

Fig. 3. Mean seasonal values of the number and intensity of cyclones in the western and eastern Bering Sea (**left** and **central** panels) and the meridional (I_м) and zonal (I_з) indices of atmospheric circulation (**right** panels) for winter, spring, summer, and autumn. Positive values of I_з and I_м correspond to the western and southern wind transfers, respectively

Характер циклогенеза определяет особенности ветрового переноса в Беринговом море, и, как оказалось, наибольшую роль играют циклоны, приходящие в западные районы, что подтверждают графики на рис. 5 (б, д, е). «Провалы» в ходе меридионального и зонального индексов в начале 2000-х и середине 2010-х гг., соответствующие усилению северного и восточного переносов, совпадали с периодами уменьшения количества и интенсивности циклонов на западе.

Наоборот, в годы частого выхода сюда более глубоких циклонов (конец 1990-х, середина 2000-х и вторая половина 2010-х гг.) и северная, и восточная составляющие ветровой циркуляции были сильно ослаблены. Исключительная ситуация сложилась в конце 2010-х гг., когда активная циклоническая деятельность на западе и ее ослабление на востоке (сюда приходили самые маломощные циклоны) стали причиной развития над Беринговым морем не характерного для зимнего сезона устойчивого южного переноса и заметного снижения интенсивности восточного. Подобная синоптическая

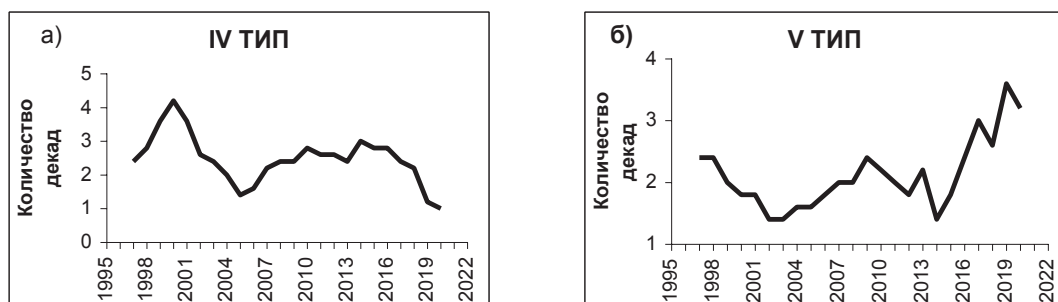


Рис. 4. Динамика повторяемости основных типов (IV, V и IV) над Беринговым морем зимой (сглажена скользящим 5-летним осреднением)

Fig. 4. Dynamics of frequency for the main types (IV, V and IV) of synoptic situation over the Bering Sea in winter (smoothed by running 5-year averaging)

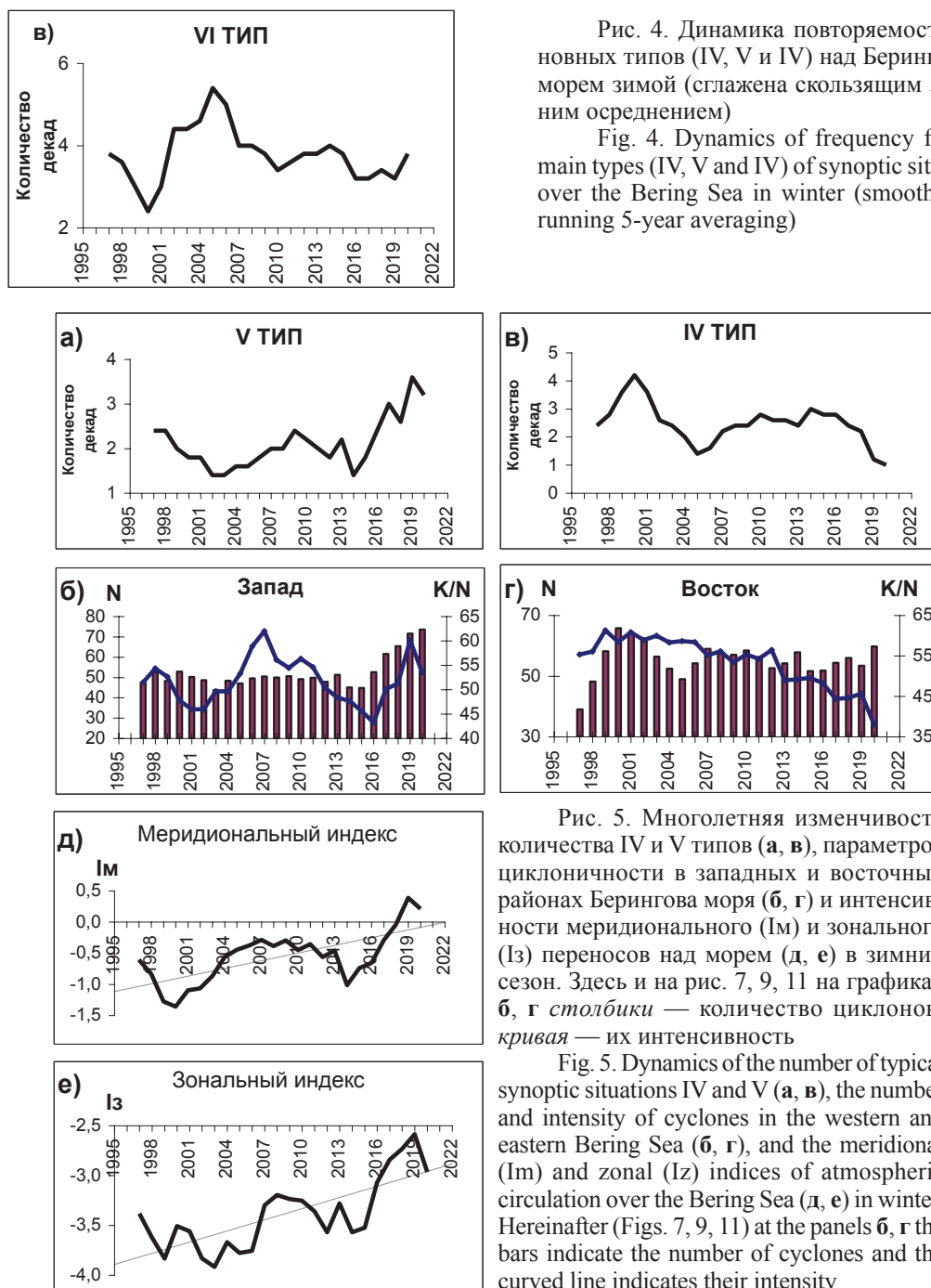


Рис. 5. Многолетняя изменчивость количества IV и V типов (а, в), параметров циклоничности в западных и восточных районах Берингова моря (б, г) и интенсивности меридионального (I_m) и зонального (I_z) переносов над морем (д, е) в зимний сезон. Здесь и на рис. 7, 9, 11 на графиках б, г столбики — количество циклонов, кривая — их интенсивность

Fig. 5. Dynamics of the number of typical synoptic situations IV and V (a, в), the number and intensity of cyclones in the western and eastern Bering Sea (б, г), and the meridional (I_m) and zonal (I_z) indices of atmospheric circulation over the Bering Sea (д, е) in winter. Hereinafter (Figs. 7, 9, 11) at the panels б, г the bars indicate the number of cyclones and the curved line indicates their intensity

ситуация характерна для формирования «теплых» климатических условий. В целом выявляющиеся с начала 2000-х гг. в ходе зонального и меридионального индексов положительные тренды могут свидетельствовать о процессе «потепления» зимнего атмосферного режима над Беринговым морем.

Особенности атмосферной циркуляции над Беринговым морем весной

Весной происходит перестройка атмосферного режима: Алеутская депрессия значительно ослабевает, а над Тихим океаном Северотихоокеанский антициклон расширяется и начинает препятствовать частому выходу циклонов в Берингово море. В результате над морем в преобладающем числе случаев формируются малоградиентные процессы I типа (36 % от всех «весенних» ситуаций), и в течение сезона (от апреля к июню) их количество быстро возрастает (см. рис. 2). II тип отмечается немного чаще, чем зимой (11 %): в апреле он возникает преимущественно из-за активизации циклонической деятельности над Охотским морем, а в мае-июне — при формировании над материком Дальневосточной депрессии с ее северо-восточной ложбиной, ориентированной в сторону Берингова моря. Вероятность появления II типа во все весенние месяцы практически одинаковая. Изредка весной складываются условия для появления III типа, когда над чукотским побережьем чаще начинают проходить циклоны арктического фронта; данная ситуация фиксируется с вероятностью 6 %.

Несмотря на то что Алеутская депрессия весной теряет свою активность, она не заполняется полностью, поэтому связанные с ней IV, V и VI типы продолжают формироваться (соответственно в 21, 13 и 13 % случаев) и «преимущество» имеет «холодный» IV тип. Основная повторяемость этих синоптических ситуаций приходится на апрель, в последующие месяцы вероятность образования V и VI типов убывает, а у IV типа в мае — немного возрастает.

Вслед за изменением количественного соотношения между типовыми процессами весной меняется и общий характер атмосферного режима на бассейне. Если зимой количество и интенсивность циклонов равномерно «распределяются» между западными и восточными областями моря, то в весенние месяцы атмосферные вихри чаще приходят на запад бассейна, хотя на востоке их средняя мощность выше (рис. 3, г, д). В целом весной берингоморские циклоны менее интенсивны, чем зимой (значения индексов циклоничности снижены практически вдвое и на востоке, и на западе).

Еще одной особенностью весеннего периода является изменение характера ветровой циркуляции: зональный перенос сохраняет восточную направленность, но уже с южной составляющей. Соотношение между компонентами такое же, как зимой — I_3 семикратно I_m , но показатели обоих индексов в 5 раз меньше зимних (рис. 3, е, в).

В многолетнем ходе повторяемости большинства ситуаций, как и зимой, присутствует 10–12-летняя периодичность (рис. 6). Исключение составляет II тип, в ходе которого выявляется квазидвадцатилетний период. Тот факт, что после максимума в середине 2000-х гг. его количество к концу 2010-х гг. сократилось (рис. 6, б), может свидетельствовать о постепенном ослаблении влияния на Берингово море как охотских циклонов, так и Дальневосточной депрессии. В то же время можно говорить о возрастающей роли циклонической деятельности на севере и востоке моря, поскольку количество III и IV типов, наоборот, к концу второго десятилетия увеличилось (рис. 6, в, г).

Наиболее слаженно происходило изменение повторяемости V и VI типов, и оба были в противофазе к I типу (рис. 6, а, д, е). Рост числа малоградиентных процессов (усиление влияния Северотихоокеанского антициклона) отмечен в середине 1990-х, начале и конце 2010-х гг. и сопровождался сокращением количества V и VI типов, т.е. фактически ослаблением (либо прекращением действия) Алеутской депрессии на западе и юге моря. Более активной депрессия становилась в начале 2000-х и середине 2010-х гг. (максимальная повторяемость обоих типов).

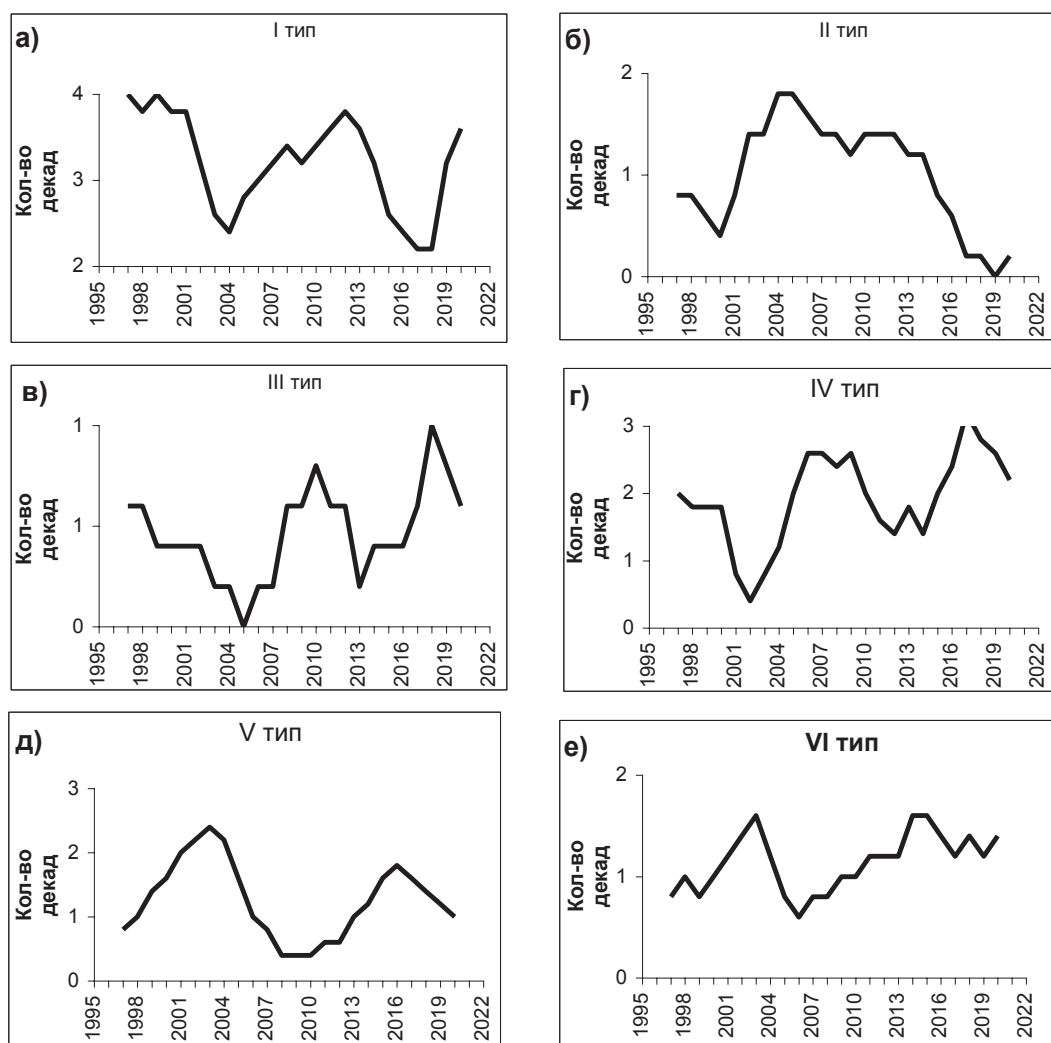


Рис. 6. Динамика повторяемости синоптических типов над Беринговым морем весной
Fig. 6. Dynamics of frequency for the types of synoptic situation over the Bering Sea in spring

Несмотря на то что в весенние месяцы IV и V типы формируются реже, чем зимой, их влияние на характер циклогенеза в районе сохраняется: на западе моря количество циклонов коррелирует с V типом ($R = 0,50$), на востоке — с IV типом ($R = 0,48$).

В многолетнем ходе повторяемости V типа выявляется отрицательный тренд, а у IV типа — положительный, и по такому же принципу менялось количественное соотношение циклонов (рис. 7, а–г). На запад моря циклоны чаще приходили с конца 1990-х до середины 2000-х гг., при максимальной повторяемости V типа, на восток — в конце 2010-х гг., на «пике» появления IV типа.

Таким образом, с конца 1990-х гг. происходила ориентация весенних циклонов с западной половины моря на восток (в отличие от зимы, когда циклоническая деятельность к концу периода активизировалась преимущественно над западными районами). Не удивительно, что весной соответственно изменялся и характер ветровой циркуляции над морем. До середины 2000-х гг. активный циклогенез над западными районами способствовал развитию над бассейном юго-восточного переноса, в эти годы значения Im достигали максимальных положительных, а Iz — минимальных отрицательных величин за весь период (рис. 7, д, е). Со второй половины десятилетия циклоны на

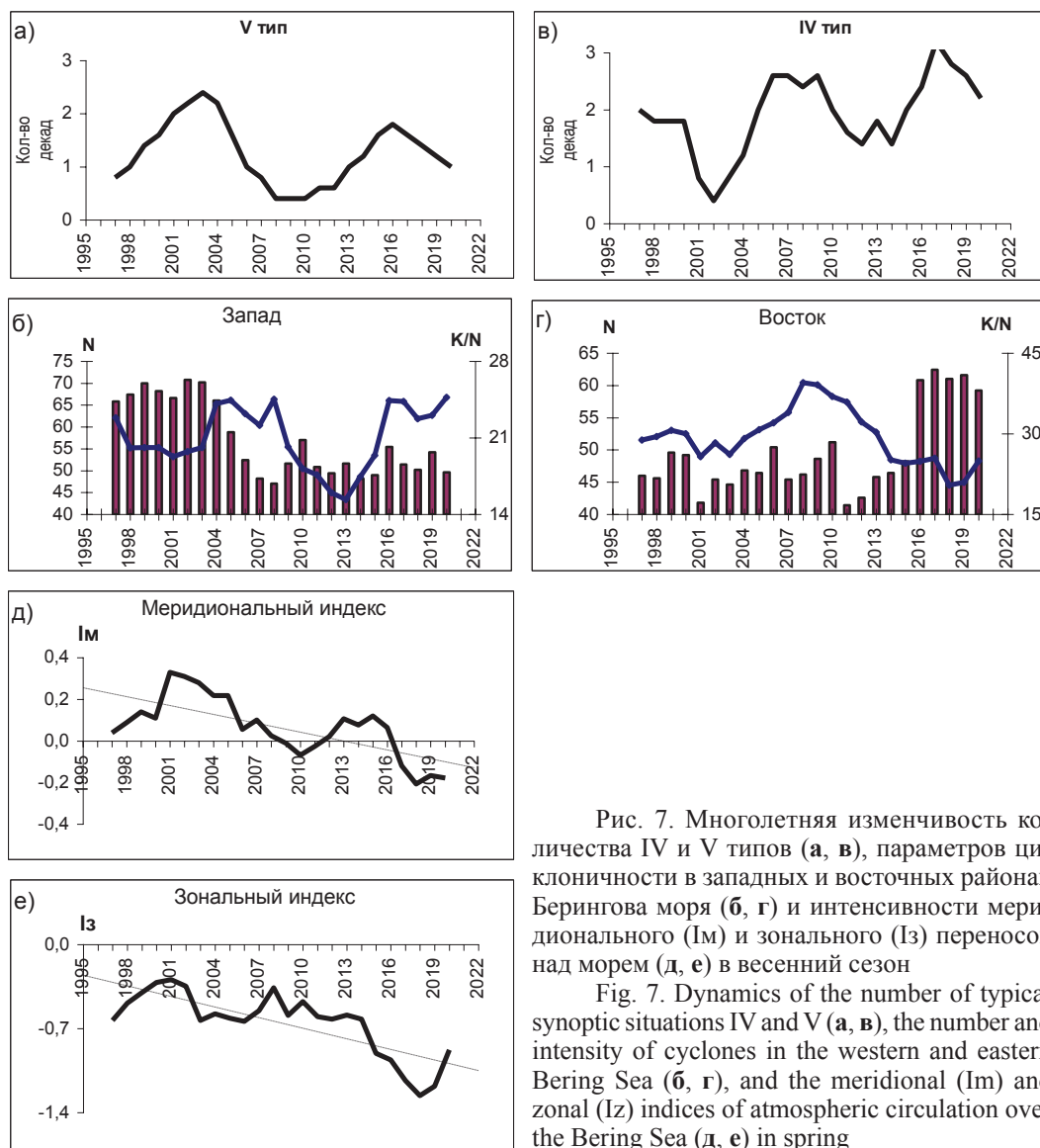


Рис. 7. Многолетняя изменчивость количества IV и V типов (а, в), параметров циклоничности в западных и восточных районах Берингова моря (б, г) и интенсивности меридионального (Im) и зонального (Iz) переносов над морем (д, е) в весенний сезон

Fig. 7. Dynamics of the number of typical synoptic situations IV and V (a, b), the number and intensity of cyclones in the western and eastern Bering Sea (b, g), and the meridional (Im) and zonal (Iz) indices of atmospheric circulation over the Bering Sea (d, e) in spring

запад бассейна стали приходить реже, и, несмотря на периодическое повышение их интенсивности в середине 2000- и 2010-х гг., южный перенос ослабевал (на рубеже нулевых и десятых годов значения Im даже переходили в отрицательную фазу) (рис. 7, д). Ситуация, которая сложилась к концу 2010-х гг. — крайне редкий выход циклонов на запад и резкое увеличение их количества на востоке, — привела к распространению над Беринговым морем северных и восточных переносов экстремально высокой интенсивности (рис. 7, б, г, д, е). Атмосферный режим весенних сезонов, в отличие от зимних, стал формироваться по «холодному» типу.

Особенности атмосферной циркуляции над Беринговым морем летом

В июле-сентябре, как правило, усиливается Северотихоокеанский антициклон, и Берингово море оказывается под влиянием его северной периферии. В результате еще более часто (по сравнению с весной) над бассейном наблюдаются малоградиентные процессы I типа, на долю которых теперь приходится почти половина (46 %) всех ситуаций. В основном они формируются в июле и августе, а к сентябрю вероятность

их появления сокращается вдвое (см. рис. 2). Существенно уменьшается частота процессов, обусловленных полем низкого давления: появление IV и V типов отмечается соответственно в 13 и 10 % случаев, VI тип — всего в 4 %, из-за доминирования над океаном области высокого давления. Образование летом II типа связано с влиянием ложбины Дальневосточной депрессии, поэтому его появление (8 %) приходится обычно на июль и август, и это реже по сравнению с весенним сезоном. Только III тип летом может отмечаться чаще, чем в предыдущем сезоне (19 %), за счет активизации арктического фронта, проходящего по периферии тихоокеанского антициклона; в течение лета вероятность его возникновения возрастает.

Поступающие на бассейн циклоны «распределяются» по аналогичному с весной принципу: доля «западных» выше, чем «восточных», но они меньшей интенсивности (рис. 3, ж, з). Характерно, что количество летних циклонов превосходит их число зимой и весной, но по интенсивности они самые слабые (рис. 3, ж, з, и).

Общий ветровой перенос летом имеет юго-западную направленность (с более выраженной западной составляющей) (рис. 3, и) и в первую очередь может быть обусловлен наиболее массовыми I и III типами (хотя в развитии западных и южных ветров могут участвовать II и V типы).

Межгодовая изменчивость повторяемости атмосферных процессов имеет особенности. Если зимой и весной периодичность большинства типов составляет порядка 10–12 лет, то летом с аналогичной частотой появляются только «редкие» для этого сезона IV, V и VI типы (рис. 8). Ход повторяемости I, II и III типов отличается периодичностью, близкой к 8–10-летней. Наиболее активное формирование самого много-

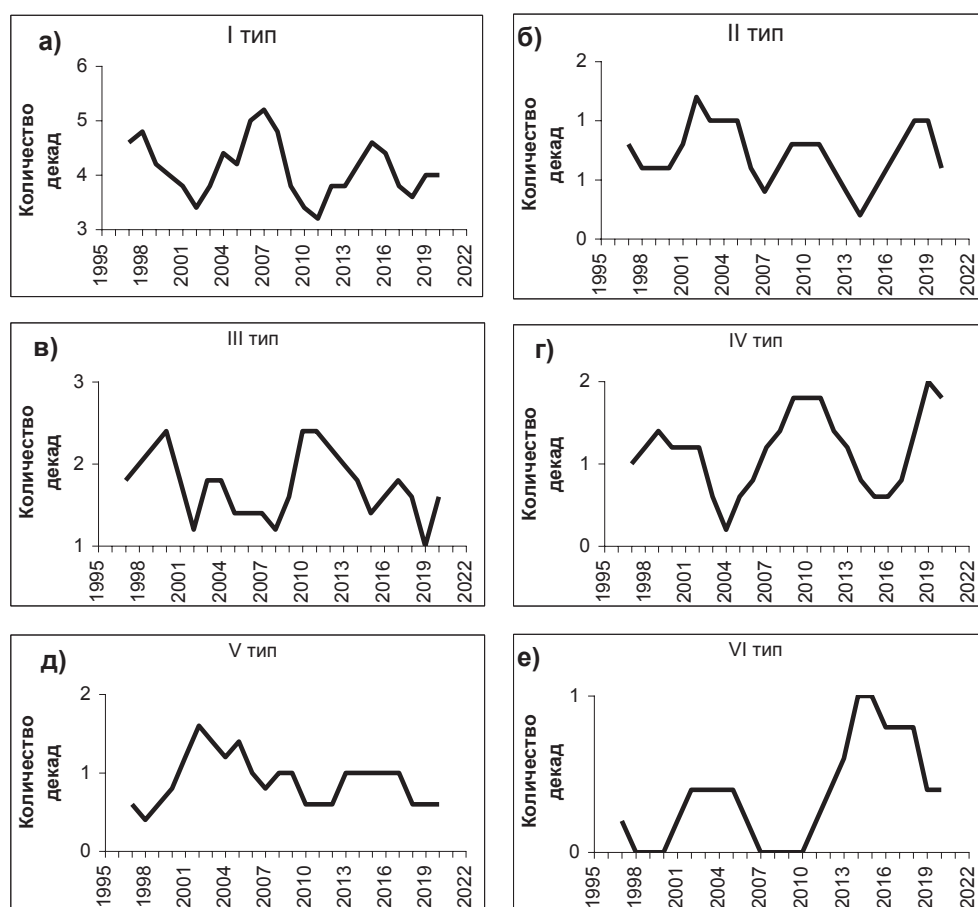


Рис. 8. Динамика повторяемости синоптических типов над Беринговым морем летом
Fig. 8. Dynamics of frequency for the types of synoptic situation over the Bering Sea in summer

численного I типа пришлось на середину каждого десятилетия, хотя «доминировал» он только в середине 2000-х гг. (при одновременном сокращении всех прочих ситуаций). Скорее всего, летние сезоны этого периода отличались преимущественно спокойными погодными условиями, без особых климатических «потрясений». В 1990-е гг. одновременно с I типом увеличивалось количество III и IV типов, в 2010-е гг. — V и VI типов.

Частота выхода циклонов в Берингово море, как и в предыдущие сезоны, количественно связана с IV и V типами, но иным образом. В отличие от зимы и весны, повторяемость циклонов на западе моря положительно коррелирует не с V, а с IV типом ($R = 0,46$), в то время как с V типом и «западные», и «восточные» циклоны связаны отрицательно ($RR = -0,38$ и $-0,45$).

Очевидно, при локализации Алеутской депрессии на востоке моря циклоны начинают ее обходить по периферии, следуя в его западные районы. В случае смещения депрессии к камчатскому побережью циклоны в Берингово море вообще заходят редко. Наглядно это демонстрируют графики на рис. 9: рост количества (и интенсивности) циклонов в западной половине моря четко совпадал с максимальным появлением IV типа (конец 1990, 2000 и 2010-х гг.) (рис. 9).

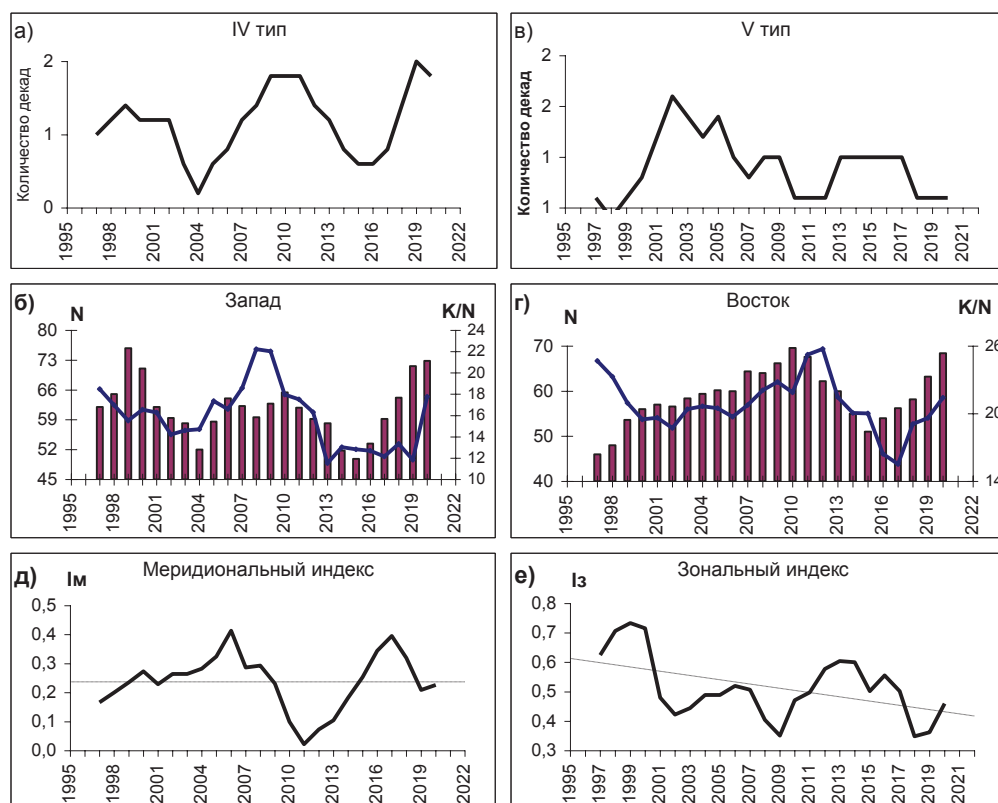


Рис. 9. Многолетняя изменчивость количества IV и V типов (а, в), параметров циклоничности в западных и восточных районах Берингова моря (б, г) и интенсивности меридионального (I_m) и зонального (I_z) переносов над морем (д, е) в летний сезон

Fig. 9. Dynamics of the number of typical synoptic situations IV and V (а, в), the number and intensity of cyclones in the western and eastern Bering Sea (б, г), and the meridional (I_m) and zonal (I_z) indices of atmospheric circulation over the Bering Sea (д, е) in summer

На востоке моря усиление циклонической активности пришлось на два периода: середина 2000 — начало 2010-х и конец 2010-х гг., в эти годы сокращалось и количество V типа (рис. 9, в, г). Исключением стали последние годы 1990-х гг. — при практическом отсутствии V типа циклоны на восток моря выходили крайне редко, но имели высокую интенсивность (рис. 9, г).

Ветровой перенос летом также связан с циклонической деятельностью, но при некоторых отличительных особенностях. Например, если зимой и весной развитие южных (либо ослабление северных) ветров совпадает с периодами усиления циклонической активности на западе моря, то летом подобная закономерность не прослеживается. Наоборот, в середине 2000-х и 2010-х гг. значения I_m находились на максимальном уровне (южный перенос активизировался) в периоды уменьшения количества и интенсивности «западных» циклонов. Вероятно, причиной усиления южной циркуляции было не увеличение повторяемости циклонов, а скорее их отсутствие, т.е. основную роль могли играть иные циркуляционные факторы.

Если обратиться к рис. 8 (а), то можно видеть, что именно в середине десятилетий увеличивалось количество малоградиентных процессов I типа, фактически усиливалось влияние тихоокеанского антициклона, с которым обычно и связано развитие над Беринговым морем характерной юго-западной циркуляции (рис. 9, д, е). Кроме того, в ходе летних значений I_m (в отличие от зимы и весны) не прослеживается трендовый характер, присутствуют только периодические колебания. Однако в ходе зонального индекса все же проявляется слабая отрицательная тенденция, указывающая на постепенное ослабление западной составляющей переноса с середины 1990-х гг.

Особенности атмосферной циркуляции над Беринговым морем осенью

В осенний период, когда барическое поле над Беринговым морем перестраивается с летнего на зимний режим, резко сокращается количество малоградиентных процессов и вновь начинают преобладать типовые ситуации, связанные с местоположением Алеутской депрессии (см. рис. 2). Комбинация осенних типов напоминает зимнюю, но с некоторыми нюансами, поскольку в начале осени еще могут сохраняться элементы летних процессов. В первую очередь это касается I и III типов, которые зимой практически не наблюдаются, от весны к лету их количество возрастает, а осенью они появляются довольно редко: на долю I типа приходится 7 %, III типа — 10 % всех ситуаций (оба преимущественно в октябре). Из типов, связанных с Алеутской депрессией, наибольшая повторяемость характерна для IV типа (30 %), в течение всего сезона он может отмечаться равномерно, но с небольшим преобладанием также в октябре (рис. 2). Доля V и VI типов составляет 19 и 24 % (меньше, чем зимой), и оба типа отмечаются чаще в ноябре-декабре (рис. 2).

По изменению соотношения в повторяемости типовых ситуаций можно косвенным образом оценивать осенние перемещения Алеутской депрессии: в октябре она чаще всего может располагаться над восточной половиной Берингова моря (IV тип), в ноябре — отходить к восточной Камчатке (V тип), а в декабре преимущественно располагается над океаническими районами (VI тип).

Несмотря на то что осенью IV тип имеет количественное преимущество перед V типом, тем не менее на западные районы Берингова моря циклоны приходят чаще, но с меньшей средней интенсивностью по сравнению с «восточными» циклонами (рис. 3, к, л). В целом, судя по тому, что абсолютные значения количества и интенсивности циклонов превосходят эти же показатели в другие сезоны (рис. 3), циклоническая деятельность осенью достигает наибольшей активности. Направленность ветрового переноса аналогична зимней (северо-восточная), но интенсивность ее восточной составляющей вдвое слабее по сравнению с зимним периодом (рис. 3, в, м).

В формировании циклонической деятельности осенью «участвуют» все синоптические ситуации. Например, количество циклонов на западе моря положительно коррелирует с двумя типами, III и V ($RR = 0,52$ и $0,49$), т.е. наилучшими условиями для выхода циклонов к восточной Камчатке является развитие на севере Берингова моря арктического фронта и локализация Алеутской депрессии над западной частью акватории. На востоке циклогенез усиливается при смещении сюда Алеутской депрессии (IV тип) и отсутствии над Охотским морем циклонической области (II тип) (соот-

ветственно $RR = 0,60$ и $-0,53$). Общим условием, ограничивающим выход циклонов в оба района Берингова моря, является местоположение Алеутской депрессии над океаном (отрицательная корреляция количества «западных» и «восточных» циклонов с VI типом) ($RR = -0,53$ и $-0,39$).

В многолетнем ходе большинства «осенних» типов выявляется характерный 10–12-летний цикл. Исключение составляют I тип с более короткопериодной изменчивостью в 8–10 лет и III тип, в повторяемости которого отмечается устойчивый положительный тренд, свидетельствующий о постепенном усилении осенью в течение последних десятилетий циклонической активности над северными районами моря (рис. 10).

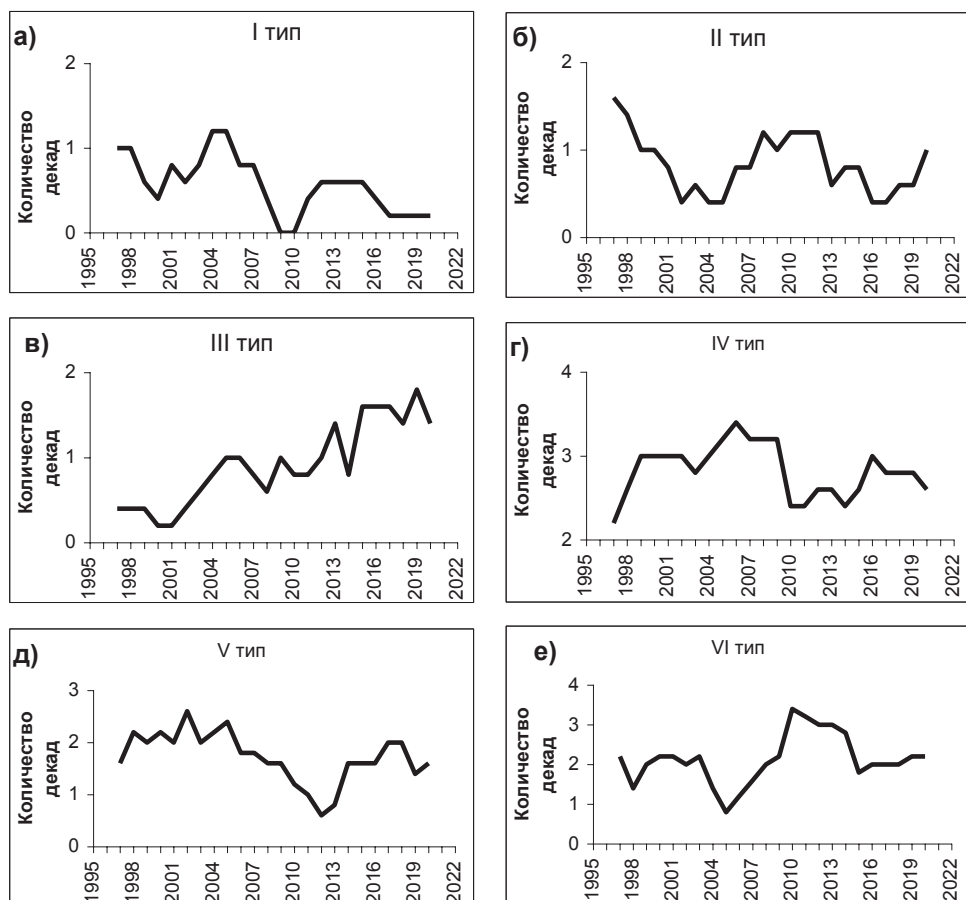


Рис. 10. Динамика хода повторяемости синоптических типов над Беринговым морем осенью

Fig. 10. Dynamics of frequency for the types of synoptic situation over the Bering Sea in autumn

Количество I и II типов, как и летом, чаще менялось обратным образом по отношению друг к другу, за исключением 1990-х гг., когда оба типа находились на «пике». Эти ситуации осенью появляются не часто, поэтому их вклад в формирование погодных условий Берингова моря незначителен. К основным «климатообразующим» синоптическим процессам следует отнести, как и зимой, IV, V и VI типы, но характер их взаимодействия различается: осенью динамика повторяемости IV типа схожа с V типом и оба противоположны VI (рис. 10).

В наибольшей степени это проявилось в начале 2010-х гг., когда на фоне максимально частого возникновения VI типа повторяемость других ситуаций была снижена, следовательно, в эти годы Алеутская депрессия чаще смещалась в сторону океана.

Наоборот, рост количества IV и V типов (сокращение VI типа) в 2000-е и середине 2010-х гг. свидетельствует о локализации депрессии над Беринговым морем и долготных перемещениях ее центра в западно-восточном направлении. В эти же периоды увеличивалось и количество циклонов над обоими районами моря (рис. 11, а–г), и это означает, что IV и V типы «равнозначно» влияют на характер осенней циклонической деятельности.

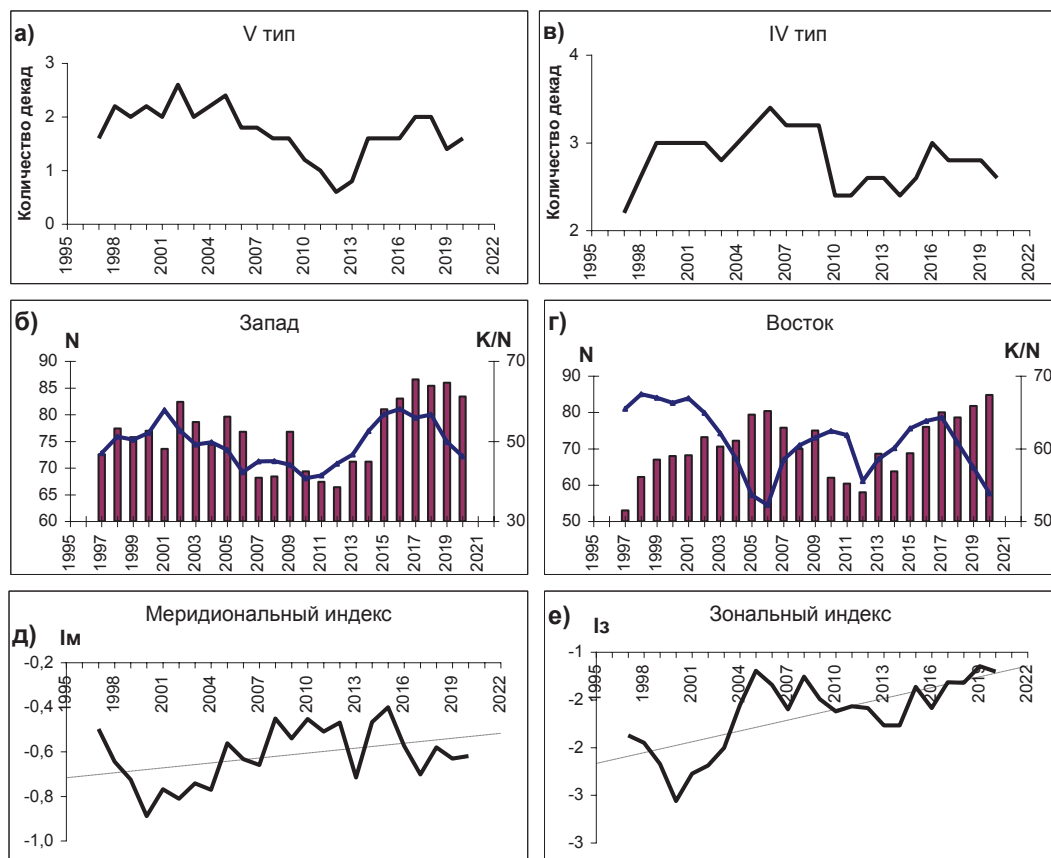


Рис. 11. Многолетняя изменчивость количества IV и V типов (а, в), параметров циклоничности в западных и восточных районах Берингова моря (б, г) и интенсивности меридионального (I_m) и зонального (I_z) переносов над морем (д, е) в осенний сезон

Fig. 11. Dynamics of the number of typical synoptic situations IV and V (а, в), the number and intensity of cyclones in the western and eastern Bering Sea (б, г), and the meridional (I_m) and zonal (I_z) indices of atmospheric circulation over the Bering Sea (д, е) in autumn

На западе моря периоды роста количества циклонов совпадали с периодами увеличения их мощности, в то время как эти же показатели у «восточных» циклонов чаще менялись противофазно. На рубеже 1990–2000 гг. выход малочисленных, но очень глубоких циклонов стал причиной экстремального усиления восточного переноса (в эти же годы максимальным был и северный перенос) (рис. 11, г–е).

Осенью сохраняется выявленная для других сезонов закономерность — характер циклонической деятельности определяет и развитие муссонной циркуляции, но «особым образом». С ростом числа и интенсивности «западных» циклонов северный перенос над бассейном не ослабевает (как зимой), а наоборот, усиливается (периоды начала 2000-х и конца 2010-х гг.) (рис. 11, д). Особенности зональной циркуляции определяет интенсивность «восточных» циклонов: активизация восточного переноса в начале 2000-х и 2010-х гг. происходила при поступлении в район наиболее глубоких барических минимумов, хотя их количество в эти же годы было низким (рис. 11, е).

В целом, если судить по интенсивности ветровой циркуляции, самым «холодным» можно считать период на рубеже 1990–2000-х гг., когда оба индекса имели максимальные отрицательные значения (северо-восточный муссон получал экстремальное развитие). Относительно «теплым» является период с середины 2000-х до середины 2010-х гг.: интенсивность северного переноса была минимальной, а восточного — умеренной.

Тем не менее положительные тенденции в ходе и меридионального, и зонального индексов могут свидетельствовать о том, что в многолетнем плане осенний атмосферный режим над Беринговым морем (как и зимний) постепенно становится более «мягким».

Формирование локальных особенностей атмосферного режима над Беринговым морем (характер типовых синоптических процессов, развитие циклонической деятельности и ветровой циркуляции) во все сезоны непосредственно связано с процессами регионального масштаба и в первую очередь — с состоянием Алеутской депрессии. Так, в холодные сезоны года (осень и зима) над бассейном в преобладающем числе случаев образуются IV, V и VI типы, обусловленные ее местоположением. Зимой основная повторяемость приходится на VI тип (Алеутская депрессия над океаном), а осенью самым «массовым» становится IV тип (Алеутская депрессия над восточными районами моря). Типовые ситуации, не связанные с депрессией и обусловленные процессами иной природы — развитием циклонической деятельности над Охотским морем (II тип) и над северными районами Берингова моря (III тип), — в течение холодного полугодия возникают значительно реже, и основная их повторяемость приходится на осень.

Малоградиентные ситуации I типа, формирующиеся на фоне ослабления атмосферной циркуляции (основных сезонных барических систем), зимой обычно не возникают, а осенью — лишь эпизодически и преимущественно в начале сезона. «Лидером» по количеству появлений I тип становится весной и (особенно) летом, когда Берингово море находится под устойчивым влиянием Северотихоокеанского антициклона; кроме того, чаще начинают появляться II (весной) и III типы (летом). В теплые месяцы Алеутская депрессия заметно ослабевает, типы холодного периода (IV, V и VI) продолжают формироваться, хотя и в значительно меньшем количестве.

Особенностью Берингова моря является активная циклоническая деятельность на протяжении всего года. В зимний сезон повторяемость и интенсивность циклонов, приходящих на запад и восток бассейна, могут находиться в одинаковых пропорциях, а весной, летом и осенью количество «западных» циклонов выше, но «восточные» в среднем более глубокие.

Важным фактором для развития циклогенеза над Беринговым морем можно называть местоположение Алеутской депрессии, поскольку сезонные особенности циклонической деятельности (в частности, повторяемость циклонов) тесно связаны с IV и V типами. Зимой, весной и осенью количество «западных» циклонов положительно коррелирует с V типом (депрессия на западе бассейна), а «восточных» — с IV типом (депрессия над восточными районами). Летом эта закономерность нарушается и выявляется обратная зависимость — количество циклонов на западе возрастает при IV типе, в то время как при V типе циклоническая активность ослабевает и на западе, и на востоке моря.

Сезонные особенности атмосферного режима (преимущественное формирование над Беринговым морем тех или иных синоптических типов, изменение характера циклогенеза) способствуют развитию над районом сезонной ветровой циркуляции, интенсивность и направленность которой оценивается в индексах циркуляции А.Л. Каца [1960]. Осенью и зимой над Беринговым морем устанавливается северо-восточный перенос (зимний муссон), а весной и летом развивается летний муссон, который весной имеет юго-восточную ориентацию, а летом — юго-западную. Характерно, что во все сезоны зональная составляющая переноса (I_z) более выражена по сравнению с меридиональной (I_m), причем зимой и весной превышение восточной составляющей (соответственно над северной и южной) в среднем достигает семикратных значений.

Подобные изменения ветрового переноса в большой степени обусловлены циклонами, приходящими преимущественно на западные районы Берингова моря (хотя «восточные» циклоны тоже играют немалую роль). Каждому сезону присущи свои особенности межгодового хода атмосферных показателей, и даже выявляются разные тенденции.

Зимой при активной циклонической деятельности на западе северо-восточный муссон над бассейном ослабевает, при частом выходе циклонов на восток — усиливается. На протяжении рассматриваемого периода (с середины 1990-х гг.) ситуация с выходом циклонов менялась кардинально. На рубеже 1990–2000-х гг. повторяемость IV типа (положение Алеутской депрессии на востоке моря) находилась на чрезвычайно высоком уровне, поэтому основная циклоническая деятельность развивалась также на востоке бассейна. Сюда приходили наиболее мощные циклоны, вызывая над всей акваторией усиление северного и восточного переносов (до максимальных отрицательных значений I_m и I_z). Подобные экстремальные события в атмосфере отразились и на термическом режиме моря: в 1998–2001 гг. отмечено резкое выхолаживание вод и увеличение ледовитости до максимальных показателей [Хен и др., 2012; Лучин, 2023; и мн. др.].

В последующие годы количество синоптических ситуаций менялось с разной направленностью — в ходе IV типа присутствовал отрицательный тренд, V типа — положительный, повторяемость обоих типов менялась с 10–12-летней цикликой. Периодические изменения в атмосфере вызывали изменения и в гидрологической обстановке, причем эти процессы проходили параллельно. Рост количества V типа в середине нулевых годов сопровождался усилением циклонической активности на западе моря (увеличением интенсивности циклонов) и ослаблением северного переноса, хотя еще сохранялась высокая интенсивность восточного (см. рис. 5, а, в, д, е). На северо-западе бассейна «холодный» температурный режим сменился «теплым» (2003–2004 гг.) и «нормальным» (2005–2007 гг.) [Лучин, 2023]. К концу десятилетия снизилась интенсивность и восточного переноса, следовательно, произошло общее ослабление зимнего муссона, на этом фоне в 2007–2011 гг. сокращалась ледовитость и в Анадырском заливе [Крюкова и др., 2014].

Со второй половины 2000-х и до начала 2010-х гг. участились случаи формирования IV типа, интенсивность обеих компонент муссона возросла (рис. 5, б, г). Это привело к активному выхолаживанию водной поверхности, доминированию отрицательных аномалий ТПО и развитию ледовитости [Хен и др., 2014; Басюк, Зуенко, 2019; Кровнин и др., 2021]; причем зимние условия 2009 и 2012 гг. отнесены к «экстремально холодным» [Лучин, 2023].

Конец десятилетия отличался аномальными процессами в атмосфере: активное формирование V типа стало благоприятным фактором для усиления циклонической активности над западными районами моря, над бассейном сформировался устойчивый южный ветровой перенос, не характерный для зимнего сезона. Подобная смена ветрового режима сопровождалась существенным потеплением берингоморских вод в 2018–2019 гг. [Басюк, Зунко, 2019; Кровнин и др., 2021]. Таким образом, на протяжении исследуемого периода (с середины 1990-х гг.) зимний климатический режим в Беринговом море перешел от «холодного» к «теплому».

Весной тенденции в развитии процессов приобрели обратную направленность: повторяемость V типа монотонно сокращалась (с 10–12-летней периодичностью), IV типа — увеличивалась, т.е. Алеутская депрессия постепенно занимала восточные позиции. Один из минимумов в ходе V типа пришелся на конец 1990-х гг., на запад моря циклоны поступали в большом количестве, но, как правило, невысокой интенсивности. Вероятно, поэтому развитие южного переноса происходило постепенно и достигло наибольших значений лишь к началу 2000-х гг. (рис. 7, д). Термические условия на северо-западе моря на рубеже веков еще характеризовались как «холодные», но к

2003–2004 гг., на фоне максимального усиления южного переноса, процесс накопления отрицательных аномалий ТПО завершился началом фазы потепления [Кузнецов и др., 2013; Ростов и др., 2018].

С середины 2000-х гг. количество, а позднее и интенсивность, «западных» циклонов стали сокращаться; мощность «восточных» циклонов неуклонно увеличивалась, достигнув максимума на рубеже 2000–2010-х гг. В результате активность южного переноса не только ослабевала, но к началу 2010-х гг. направленность переноса сменилась на северную (рис. 7, д, е). В соответствии с ходом атмосферных процессов менялся и характер весеннего гидрологического режима: в 2007–2009 гг. температурные условия характеризовались как относительно «холодные», а в 2010–2012 гг. — «экстремально холодные» [Кузнецов и др., 2013]. В середине десятилетия, одновременно с ростом интенсивности «западных» циклонов и ослаблением «восточных», над бассейном вновь сформировался южный перенос, произошло кратковременное потепление вод [Хен и др., 2014].

В конце 2010-х гг. циклоны в преобладающем числе случаев выходили на восток бассейна, в то время как на западе их количество снизилось до минимального уровня. Снова произошла смена циркуляции: южный перенос окончательно прекратил свое действие и поменялся на северный, восточный — увеличился (рис. 7, д, е), и это отразилось на термическом режиме: усилилось холодное Камчатское течение [Тепнин, 2022], в целом относительно «теплые» условия на северо-западе моря сменились на относительно «холодные» [Зуенко, Басюк, 2017].

Летом общий ветровой перенос над Беринговым морем имеет юго-западную направленность и связан с преимущественным формированием I и III типов, периодичность которых близка к 8–10-летней. Сохраняется вероятность возникновения типов «Алеутской депрессии» — IV, V и VI, хотя появляются они еще реже, чем весной, но с аналогичной 10–12-летней периодичностью. Эти типовые ситуации, как и в другие сезоны, связаны с характером циклонической деятельности на бассейне, но с существенным отличием: увеличение повторяемости «западных» циклонов в большей степени определяется не V, а IV типом, когда депрессия располагается на востоке моря. Наиболее частое формирование IV типа приходилось на конец каждого десятилетия и сопровождалось ослаблением южных переносов; при его низкой повторяемости (середина 2000-х и 2010-х гг.) активность южного переноса становилась максимальной.

Еще одной особенностью летнего сезона можно считать отсутствие тренда в ходе меридионального индекса, в большей степени его значения менялись периодически, хотя в динамике зонального индекса наблюдалась очень слабая отрицательная тенденция (западный перенос постепенно ослабевал) (рис. 9, д, е). Характерно, что в многолетней изменчивости летней температуры воды четких тенденций также не было выявлено [Хен и др., 2015], хотя случаи потепления и похолодания летнего термического режима Берингова моря, как правило, совпадали с периодами изменения «локальной» ветровой циркуляции. Экстремальное понижение температуры на северо-западе Берингова моря на рубеже 1990–2000 и в начале 2010-х гг. [Кузнецов и др., 2013] соответствовало периодам слабой (и даже минимальной) активности южного переноса; потепление вод в середине 2000-х и второй половине 2010-х гг., с максимальным температурным фоном в 2018 г. [Кузнецов и др., 2013; Басюк, Зуенко, 2019], происходило на «пике» развития южной циркуляции (рис. 9, д). Однако летние условия 2020 г. уже оказались менее теплыми по сравнению с 2018–2019 гг. [Поляничко, Кузнецов, 2022], и вероятной причиной может быть начавшееся ослабление южного переноса (рис. 9, д).

Осенью комбинация типов, формирующихся над Беринговым морем, достаточно разнообразна, но преобладают IV, V и VI типы. Из них наиболее часто повторяется IV тип, т.е. Алеутская депрессия осенью преимущественно располагается над восточными районами.

В многолетнем плане повторяемость IV и V типов, определяющих характер циклоничности на бассейне, менялась согласованно, поэтому периоды увеличения и сокра-

щения количества циклонов в западных и восточных районах моря также практически совпадали (рис. 11, б, г). Осенние циклоны «традиционно» играют определяющую роль в формировании локального муссона, но влияние «западных» циклонов проявляется неоднозначно. В отличие от зимнего сезона, при росте количества и интенсивности циклонов на западе бассейна северная составляющая переноса не ослабевает, а усиливается. В свою очередь, интенсивность восточной компоненты муссона определяется главным образом глубиной «восточных» циклонов.

Экстремальное усиление ветровой циркуляции, когда значения и меридионального, и зонального индексов достигали максимальных отрицательных величин, пришлось на период с конца 1990-х до середины 2000-х гг. и сопровождалось сильным выхолаживанием северо-западного района моря в 1998–2001 гг. [Кузнецов и др., 2013]. Начавшееся (по данным М.Ю. Кузнецова с соавторами [2013]) в 2002–2003 гг. сезонное потепление происходило при резком ослаблении восточного переноса, хотя северный еще сохранял свою высокую интенсивность на протяжении последующих нескольких лет (рис. 11, д, е). В начале 2010-х гг. в атмосфере сложилась обратная ситуация: интенсивность северного переноса снизилась (значения I_m достигли минимального уровня), а восточный перенос стал активизироваться. Термический режим на северо-западе Берингова моря в эти годы вновь «похолодал»: значительно расширились площади отрицательных аномалий ТПО и Лаврентьевского холодного пятна [Кузнецов и др., 2013; Хен и др., 2014]. Следовательно, осенью влияние муссона на океанологические процессы проявляется в первую очередь за счет его зональной компоненты (восточный перенос играет большую роль по сравнению с северным). Это подтвердилось и событиями последующих лет: с середины 2010-х гг. температурный фон на северо-западе Берингова моря стал повышаться и в конце десятилетия характеризовался как аномально теплый [Басюк, Зуенко, 2019; Поляничко, Кузнецов, 2022]. В эти же годы восточный перенос ослабевал до минимальных значений, хотя северный сохранял повышенную интенсивность (рис. 11, д, е).

С учетом того, что в ходе зонального и (в меньшей степени) меридионального индексов выявляются положительные тренды, напряжение ветрового переноса в осенние сезоны уменьшалось, значит, климат, как и зимой, на протяжении всего рассматриваемого периода постепенно становился «мягче».

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что «локальные» атмосферные процессы, формирующиеся над Беринговым морем в разные сезоны и оказывающие динамическое воздействие на водную поверхность, можно рассматривать не только в качестве показателей, но и как причину происходящих в гидротермическом режиме моря изменений.

Заключение

Рассмотрение сезонных особенностей атмосферного режима над Беринговым морем в течение последнего 30-летнего периода показало, что зимой, весной, летом и осенью комбинации из 6 типовых синоптических ситуаций, формирующихся над районом, меняются, но во все сезоны присутствуют IV, V и VI типы, обусловленные состоянием и местоположением Алеутской депрессии. При этом IV и V типы играют определяющую роль в развитии циклонической деятельности над Беринговым морем.

Интенсивность и направленность сезонной ветровой циркуляции над бассейном («локальный» муссон) определяются характером циклоничности на западе моря: рост числа циклонов зимой приводит к ослаблению муссона, а осенью — к его усилению; весной «западные» циклоны способствуют активизации летнего муссона, летом — снижению его интенсивности.

Выявлены сезонные особенности в многолетнем ходе атмосферных показателей, которые проявляются и в гидрологическом режиме. С середины 1990-х гг. интенсивность зимнего муссона (северной и восточной компонент) зимой и осенью ослабевает;

в зимние сезоны в конце 2010-х гг. над Беринговым морем сформировался «нехарактерный» южный перенос, в термическом режиме также отмечалось потепление. Весной юго-восточный перенос ослабевал, сменившись в конце 2010-х гг. на сильный северо-восточный; климатический режим становился холоднее. В ходе индексов циркуляции летом присутствовали периодические изменения, трендовой направленности не выявлялось.

Сезонные изменения «локальных» синоптических процессов проходят довольно согласованно с изменениями гидрологического режима.

Благодарности (ANKNOWLEDGEMENTS)

Автор выражает благодарность анонимным рецензентам за полезные замечания.
The author is thankful to anonymous reviewers for their helpful comments.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.
The study had no sponsorship.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Эта работа не содержит никаких исследований с участием людей и животных. Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

This study did not concern investigations involving humans or animals. The author declares that she has no conflict of interest.

Список литературы

- Басюк Е.О., Зуенко Ю.И.** Берингово море 2018 — экстремально малоледовитый и теплый год // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 198. — С. 119–142. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142.
- Глебова С.Ю.** Особенности развития атмосферных процессов над Беринговым морем в 2000–2006 гг. // Изв. ТИНРО. — 2007. — Т. 151. — С. 271–289.
- Глебова С.Ю.** Сибирский антициклон как важный фактор развития циклонической деятельности в Дальневосточном регионе в зимний, весенний и летний сезоны // Изв. ТИНРО. — 2021. — Т. 201, вып. 4. — С. 879–894. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-879-894.
- Глебова С.Ю.** Типы атмосферных процессов и связанных с ними условий погоды на Беринговом море // Метеорол. и гидрол. — 2001. — № 1. — С. 63–71.
- Глебова С.Ю.** Типы атмосферных процессов над дальневосточными морями, межгодовая изменчивость их повторяемости и сопряженность // Изв. ТИНРО. — 2003. — Т. 134. — С. 209–257.
- Зуенко Ю.И., Басюк Е.О.** Влияние изменений океанологических условий на состав и обилие зоопланктона в наваринском промысловом районе Берингова моря и их значение для российского минтаевого промысла // Изв. ТИНРО. — 2017. — Т. 189. — С. 103–120. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-189-103-120.
- Кац А.Л.** Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1960. — 270 с.
- Кровнин А.С., Кивва К.К., Мурый Г.П., Сумкина А.А.** Влияние климатических факторов на межгодовые колебания запасов камчатской горбуши в 2014–2020 гг. // Вопр. рыб-ва. — 2021. — Т. 22, № 4. — С. 35–45. DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-4-35-45.
- Крюкова Н.В., Кочнев А.А., Переверзев А.А.** Влияние ледовых условий на функционирование береговых лежбищ тихоокеанского моржа *Odobenus rosmarus divergens* Illiger, 1815 в Анадырском заливе Берингова моря // Биол. моря. — 2014. — Т. 40, № 1. — С. 32–37.
- Кузнецов М.Ю., Басюк Е.О., Чульчиков Д.Н., Сыроваткин Е.В.** Распределение и гидрологические условия обитания минтая в северо-западной части Берингова моря в летне-осенний период // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 174. — С. 104–124.
- Куницын А.В.** О количественной характеристике циклонической деятельности // Метеорол. и гидрол. — 1956. — № 6. — С. 29–30.
- Лучин В.А.** Межгодовая изменчивость термического состояния верхнего квазиоднородного слоя Берингова моря в зимний период // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 601–617. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-601-617. EDN: CLBUPR.

Поляничко В.И., Кузнецов М.Ю. Распределение и обилие минтая *Theragra chalcogramma* в северо-западной части Берингова моря в летне-осенний период 2020 г. и их межгодовая изменчивость // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 4. — С. 793–809. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-793-809. EDN: IIAZEX.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 193. — С. 167–182. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182.

Тепнин О.Б. Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточно-камчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2022. — № 66. — С. 79–93. DOI: 10.15853/2072-8212.2022.66.79-93.

Хен Г.В., Басюк Е.О., Зуенко Ю.И. и др. Гидрометеорологические условия в дальневосточных морях России в 2012 и 2013 гг. // Вопр. промысл. океанол. — 2014. — Вып. 11. — С. 38–59.

Хен Г.В., Басюк Е.О., Матвеев В.И. Параметры верхнего квазиоднородного слоя и слоя скачка температуры и хлорофилл-*a* в западной глубоководной части Берингова моря летом и осенью 2002–2013 гг. // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 182. — С. 115–131.

Хен Г.В., Басюк Е.О., Устинова Е.И., Фигуркин А.Л. Изменчивость и современное состояние климата дальневосточных морей // Мат-лы Всерос. науч. конф., посвящ. 80-летию юбилею ФГУП “КамчатНИРО”. — Петропавловск-Камчатский, 2012. — С. 498–508.

References

Basyuk, E.O. and Zuenko, Yu.I., Bering Sea: 2018 as the extreme low-ice and warm year, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 198, pp. 119–142. doi 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142

Glebova, S.Yu., Features of atmospheric processes development over the Bering Sea in 2000–2006, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2007, vol. 151, pp. 271–289.

Glebova, S.Yu., Siberian High as an important factor for development of cyclonic activity in the Far Eastern region in winter, spring and summer seasons, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 201, no. 4, pp. 879–894. doi 10.26428/1606-9919-2021-201-879-894

Glebova, S.Yu., Types of atmospheric processes and associated weather conditions in the Bering Sea, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2001, no. 1, pp. 63–71.

Glebova, S.Yu., Types of the atmospheric processes over Far-Eastern Seas, interannual variability of their repeatability and mutual coordination, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2003, vol. 134, pp. 209–257.

Zuenko, Yu.I. and Basyuk, E.O., Impact of changing oceanographic conditions on species composition and abundance of zooplankton on the fishing grounds at Cape Navarin and their importance for the Russian pollock fishery in the Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2017, vol. 189, pp. 103–120. doi 10.26428/1606-9919-2017-189-103-120

Kats, A.L., *Sezonnyye izmeneniya obshchey tsirkulyatsii atmosfery i dolgosrochnyye prognozy* (Seasonal changes in the general circulation of the atmosphere and long-term forecasts), Leningrad: Hydrometeoizdat, 1960.

Krovnin, A.S., Kivva, K.K., Moury, G.P., and Sumkina, A.A., Influence of climatic factors on interannual variations of Kamchatka pink salmon stocks in 2014–2020, *Vopr. Rybolov.*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 35–45. doi 10.36038/0234-2774-2021-22-4-35-45

Kryukova, N.V., Kochnev, A.A., and Pereverzev, A.A., The influence of ice conditions on terrestrial haulouts of the pacific walrus *Odobenus rosmarus divergens* Illiger, 1815 in the gulf of Anadyr, Bering Sea, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2014, vol. 40, no. 1, pp. 30–35.

Kuznetsov, M.Yu., Basyuk, E.O., Chulchekov, D.N., and Syrovatkin, E.V., Distribution and oceanographic conditions of habitat for walleye pollock in the northwestern Bering Sea in summer-fall season, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2013, vol. 174, pp. 104–124.

Kunitsyn, A.V., On the quantitative characteristics of cyclonic activity, *Meteorol. Gidrol.*, 1956, no. 6, pp. 29–30.

Luchin, V.A., Interannual variability in thermal state of the upper mixed layer, in the Bering Sea in winter, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 601–617. doi 10.26428/1606-9919-2023-203-601-617. EDN: CLBUPR.

Polyanichko, V.I. and Kuznetsov, M.Yu., Distribution and abundance of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the northwestern Bering Sea in the summer-fall period of 2020 and their

interannual variability, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 4, pp. 793–809. doi 10.26428/1606-9919-2022-793-809. EDN: IIAZEX.

Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V., and Vorontsov, A.A., Tendencies of climate changes for thermal conditions in the coastal waters of the western Bering Sea and adjacent areas in the last decades, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 167–182. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182

Tepnin, O.B., Variability of hydrological conditions at spawning sites of East Kamchatka walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2022, vol. 66, pp. 79–93. doi 10.15853/2072-8212.2022.66.79-93

Khen, G.V., Basyuk, E.O., Zuenko, Yu.I., Ustinova, E.I., Figurkin, A.L., and Shatilina, T.A., Hydrometeorological conditions in the Far Eastern seas of Russia in 2012 and 2013, *Vopr. Promysl. Okeanol.*, 2014, vol. 11, pp. 38–59.

Khen, G.V., Basyuk, E.O., and Matveev, V.I., Parameters of the upper mixed layer and thermocline layer and chlorophyll-*a* in the western deep basin of the Bering Sea in summer and fall of 2002–2013, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 182, pp. 115–131.

Khen, G.V., Basyuk, E.O., Ustinova, E.I., and Figurkin, A.L., Variability and current state of the climate of the Far Eastern seas, in *Mat-ly Vseros. Nauch. konf., posvyashch. 80-letnemu yubileyu FGUP “KamchatNIRO”* (Materials of the All-Russian scientific conference dedicated to the 80th anniversary of the Federal State Unitary Enterprise “KamchatNIRO”), Petropavlovsk-Kamchatsky, 2012, pp. 498–508.

Поступила в редакцию 20.11.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята к публикации 1.03.2024 г.

*The article was submitted 20.11.2023; approved after reviewing 30.11.2023;
accepted for publication 1.03.2024*