

УДК 551.465.43(265.53)

В.А. Лучин¹, В.И. Матвеев^{2*}

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

² Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр, 690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ХОЛОДНОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОХОТСКОГО МОРЯ

Анализ межгодовой изменчивости термического состояния холодного подповерхностного слоя (ХПС) Охотского моря выполнен с использованием всех доступных данных океанологических наблюдений с марта по август за период с 1946 по 2015 г. (65 742 станции). На каждой станции выполнен расчет интегрального содержания тепла в ХПС. Далее в двухградусных трапециях проводился расчет средних годовых аномалий интегрального содержания тепла в ХПС за период с марта по август. Сформированные поля средних годовых аномалий были разложены по естественным ортогональным функциям. Получено, что для подповерхностных вод Охотского моря характерны долговременные циклы, которые имеют продолжительность около 30 лет. В 1946–1950 гг. наблюдалось понижение теплового состояния ХПС, а с 2009–2010 по 2015 г. — его рост. Периоды потепления ХПС выделяются с 1951 по 1964, а также с 1978 по 1994 г. Периоды похолодания ХПС выделяются с 1965 по 1977 г. и с 1995 до 2008 г. В ХПС Охотского моря (согласно предложенным критериям) выделены следующие по термическим условиям годы: «экстремально холодный» 2001 г.; «холодные» 1947, 1949, 1950, 1951, 1958, 1959, 1960, 1966, 1967, 1969, 1973, 1976, 1977, 1978, 1980, 1999, 2000, 2010, 2012 гг.; «нормальные» 1946, 1952, 1953, 1954, 1955, 1957, 1961, 1962, 1965, 1970, 1971, 1972, 1975, 1979, 1982, 1983, 1985, 1986, 1988, 1989, 1990, 1993, 1995, 1996, 1998, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013, 2014 гг.; «теплые» 1948, 1956, 1964, 1968, 1974, 1981, 1984, 1987, 1991, 1992, 1994, 1997, 2015 гг.; «экстремально теплый» 1963 г. В работе получены статистически значимые корреляционные связи между параметрами изменчивости ХПС и межгодовыми вариациями климатических индексов атмосферы и океана, а также межгодовыми изменениями локальных параметров в системе атмосфера–лед–океан Охотского моря и прилегающих регионов суши и Тихого океана.

Ключевые слова: Охотское море, океанологические наблюдения, температура морской воды, разложение полей по ЕОФ, межгодовая изменчивость, «холодные» годы, «нормальные» годы, «теплые» годы, корреляционные связи.

Luchin V.A., Matveev V.I. Interannual variability of thermal state of the cold subsurface layer in the Okhotsk Sea // *Izv. TINRO*. — 2016. — Vol. 187. — P. 205–216.

Long-term variability of the cold subsurface water (CSW) in the Okhotsk Sea is analyzed on the base of all available oceanographic data collected in March through August of 1946–

* Лучин Владимир Александрович, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: vluchin@poi.dvo.ru; Матвеев Владимир Иванович, кандидат географических наук, заведующий сектором, e-mail: matveev@tinro.ru.

Luchin Vladimir A., D.Sc., leading researcher, e-mail: vluchin@poi.dvo.ru; Matveev Vladimir I., Ph.D., head of section, e-mail: matveev@tinro.ru.

2015 (total 65,742 stations). The Integral Heat Content (IHC) is calculated for each station and average annual IHC anomalies of the cold subsurface water are determined by month and by 2-degree grid. The IHC anomaly series are analyzed using the EOF analysis. Cycles with period of approximately 30 years are revealed in the variations of the subsurface layer heat content. Thus, in the 1946–1950, its temperature decreased, but it grew since 2009–2010 to 2015. The warming of CSW was also observed in the 1951–1964 and 1978–1994, while the cooling was in the 1965–1977 and 1995–2008. Based on this criterion, the CSW thermal condition in certain years is classified as «extremely cold» in 2001, as «cold» in 1949, 1950, 1951, 1958, 1959, 1960, 1966, 1967, 1969, 1973, 1976, 1977, 1978, 1980, 1999, 2000, 2010, 2012, as «normal» in 1946, 1952, 1953, 1954, 1955, 1957, 1961, 1962, 1965, 1970, 1971, 1972, 1975, 1979, 1982, 1983, 1985, 1986, 1988, 1989, 1990, 1993, 1995, 1996, 1998, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013, 2014, as «warm» in 1948, 1956, 1964, 1968, 1974, 1981, 1984, 1987, 1991, 1992, 1994, 1997, 2015, and as «extremely warm» in 1963. Statistically significant correlation is found between changes of the CSW thermal conditions and long-term variations of atmosphere and ocean climate indices, as well as local patterns of the atmosphere–ice–ocean interaction in the Okhotsk Sea and adjacent onshore and offshore areas of Asia and the Pacific Ocean.

Key words: Okhotsk Sea, oceanographic observation, seawater temperature, EOF analysis, long-term variability, cold year, normal year, warm year, correlation analysis.

Введение

Охотское море — один из высокопродуктивных районов Мирового океана. Здесь находятся традиционные районы промысла минтая, сельди, тихоокеанских лососей, крабов и других видов рыб и беспозвоночных. В нем сосредоточено около 58 % общей биомассы макрофауны и около 62 % биомассы рыб дальневосточных морей России (Шунтов, 2016). Охотское море является важной транспортной артерией, а на континентальном шельфе содержатся значительные запасы углеводородов (Бакланов и др., 2003).

В.П. Шунтовым (1986) было отмечено, а затем подтверждено в ряде работ (см. Шунтов, Темных, 2013), что проблема многолетних изменений численности гидробионтов дальневосточных морей более сложна, чем представлялось еще в недавнем прошлом. Циклы их численности являются составной частью, а точнее — связаны с цикличностью общих природных процессов. В.П. Шунтов (1986) подчеркивал, что поиски зависимостей волн численности рыб от отдельных факторов среды в основном были неудачными, а основанные на их базе долгосрочные прогнозы динамики численности рыб имеют невысокую оправдываемость. По мнению В.П. Шунтова (2001), наряду с антропогенным воздействием значительное влияние на биоту моря оказывают биоценологические, климатические и океанологические факторы. Было также показано (Шунтов, 1986; Радченко и др., 1997; Шунтов и др., 2002, 2003; Шунтов, Темных, 2013), что изучение многолетней цикличности и поиск причин изменений численности гидробионтов необходимо проводить с учетом космофизических, климатических и океанологических факторов, а также биоценологического фона (т.е. с экосистемных позиций).

Важность изучения межгодовых изменений термического состояния морей как одного из элементов экосистемных исследований неоднократно подчеркивалась, особенно в публикациях последних десятилетий (Гершанович, Муромцев, 1982; Шунтов, 1986; Радченко и др., 1997; Дулепова, 2005; Шунтов, Темных, 2013).

При оценках изменений среды обитания промысловых объектов авторы использовали температуру воды на придонных горизонтах (Винокурова, 1965, 1972; Фигуркин, 2011), термическое состояние подповерхностных вод на локальных акваториях (Давыдов, 1975) и по данным фиксированных разрезов (Давыдов, Куцых, 1968; Давыдов, 1972), площади ядер «холода» (Чернявский, 1992). И.В. Давыдов (1986) отмечал, что долгопериодные (в несколько десятков лет) флюктуации обилия некоторых рыб являются закономерными и генерируются главным образом подобными по длительности изменениями климато-океанологической обстановки.

Предыдущие исследования по выявлению межгодовых изменений термических условий деятельного слоя Охотского моря основывались на гипотезе, согласно которой аномалии температуры воды формируются в основном в осенне-зимнее время (Вино-

курова, 1964, 1965, 1972; Давыдов, 1975, 1984; Павлычев и др., 1989; Чернявский, 1992; Лучин, Лаврентьев, 1997; Фигуркин, 1997, 2002, 2011; Luchin et al., 2004; Жигалов, Лучин, 2005; Лучин, Жигалов, 2006). При этом, как правило, авторы исходили из предположения о противодействии и межгодовых вариациях двух основных термодинамических процессов осенне-зимнего периода: адвекции сравнительно теплых тихоокеанских вод в море и выхолаживающего эффекта осенне-зимней конвекции.

Типизации многолетних изменений термических условий подповерхностных вод различных регионов Охотского моря и моря в целом посвящены многие работы (Винокурова, 1964, 1972; Давыдов, 1975; Чернявский, 1992; Фигуркин, 1997; Жигалов, Лучин, 2005; Лучин, Жигалов, 2006). В некоторых статьях (Давыдов, 1975, 1984; Лучин, Жигалов, 2006) отмечается важная роль крупномасштабной циркуляции атмосферы в формировании типа гидрологического режима вод моря.

В качестве критериев для исследования межгодовых колебаний термических условий деятельного слоя вод моря были использованы минимальные значения температуры воды в холодном подповерхностном слое — ХПС (Давыдов, 1984; Лучин, Лаврентьев, 1997; Лучин, Жигалов, 2006); площади, занятые ХПС (Винокурова, 1965, 1972; Чернявский, 1992); средние значения (Фигуркин, 1997) и аномалии (Luchin et al., 2010) температуры воды на различных горизонтах и в слоях (Давыдов, 1984; Лучин, Лаврентьев, 1997; Хен, 2002).

В предшествующих работах, из-за ограниченности исходных данных, была рассмотрена межгодовая изменчивость термических условий моря в прибрежных водах, на отдельных участках моря, горизонтах или в придонном слое вод шельфа. В основном это свидетельство того, что имеющиеся данные океанографических наблюдений, характеризующие деятельный слой моря, распределены неравномерно во времени и в пространстве. Необходимо также отметить, что параметры межгодовой изменчивости, полученные по данным отдельных разрезов, локальных акваторий или конкретных горизонтов, не в полной мере отражают межгодовые изменения термического состояния вод моря.

Целью настоящей работы является исследование межгодовой изменчивости термического состояния холодного подповерхностного слоя вод Охотского моря.

Материалы и методы

В работе были использованы все доступные данные глубоководных океанографических наблюдений. Основная часть данных взята из исторических океанографических массивов, имеющихся во ВНИИГМИ-МЦД, ТИНРО-центре, ДВНИГМИ. Затем выполнено дополнение данных из всех доступных архивов и центров данных (NOAA's National Oceanographic Data Center (NODC), Japan Oceanographic Data Center (JODC), ТОИ ДВО РАН). Обобщенный массив глубоководных наблюдений включает батометрические, батитермографные и STD-наблюдения. Включены также наблюдения отрывными термозондами (Expendable Bathythermograph Data — XBT) и данные дрейфующих буев (Profiling Autonomous Lagrangian Circulation Explorer — PALACE).

Вначале проводилась процедура исключения дублей станций, что неизбежно при обобщении массового материала наблюдений, взятого из различных источников. Затем отбраковывались недостоверные значения характеристик с применением статистических методов и региональных особенностей Охотского моря.

Всего с марта по август, за исключением станций мелководнее 30 м, а также станций с двумя горизонтами (поверхность–дно), в Охотском море осталось 65 742 станции. До формирования специализированных массивов и расчета статистических параметров на каждой океанографической станции проведена линейная интерполяция измеренных параметров на горизонты, кратные 10 м.

Анализ базы данных показал, что океанографических станций, выполненных в холодный период года в Охотском море, очень мало. На основе этой информации невозможно дать оценку межгодовой изменчивости термического состояния вод всего моря в холодный период года (в период максимального охлаждения верхнего слоя вод

и максимального развития зимней конвекции). Особенно это актуально для обширного шельфа, который в зимний период покрыт льдом.

Однако известно (Винокурова, 1964, 1965; Морошкин, 1966; Лучин, Лаврентьев, 1997; Гладышев, 1998; Хен и др., 2002; Gladyshev et al., 2003; Жигалов, Лучин, 2005; Лучин, Жигалов, 2006; Фигуркин, 2011), что особенности распределения температуры воды на подповерхностных горизонтах, сформированные в зимний период, сохраняются длительное время (по июль-август). Хорошо выраженный слой сезонного пикноклина препятствует поступлению тепла от поверхности моря на подповерхностные горизонты. Поэтому термический режим подповерхностных вод зависит в основном от метеорологических условий предшествующей зимы, особенностей динамики вод в пределах моря и адвекции тепла течениями. Сезонный прогрев поверхностных вод в весенне-летний период, как правило, не распространяется глубже 20–30 м. Все это свидетельствует о том, что данные океанологических наблюдений за период с марта по август в подповерхностном слое вод (ниже сезонного пикноклина/термоклина) можно использовать для исследования межгодовой изменчивости термического состояния ХПС Охотского моря.

В настоящей работе для оценки межгодовых изменений термического состояния вод Охотского моря использованы аномалии теплосодержания ХПС, которые были рассчитаны по следующей схеме. Положение верхней и нижней границ ХПС приведено в работе А.А. Круц, В.А. Лучина (2013). С использованием этих значений в трапециях со сторонами 1° по широте и долготе (для более детальных расчетов теплосодержания на конкретной станции) на каждой станции были рассчитаны интегральные содержания тепла в ХПС по формуле:

$$Q = \sum_{h_1}^{h_2} \Delta h_i \bar{t}_i,$$

где Q — интегральное содержание тепла в слое; \bar{t}_i — среднее значение температуры i -го слоя; Δh_i — толщина i -го слоя; h_1, h_2 — верхняя и нижняя границы слоя, в котором проводился расчет интегрального содержания тепла.

Далее в двухградусных трапециях проводился расчет средних многолетних месячных значений интегрального содержания тепла в ХПС, а относительно их — аномалий интегрального содержания тепла каждой станции. Затем проводился расчет средних месячных аномалий интегрального содержания за каждый год, а на конечном этапе вычислений — средних годовых аномалий интегрального содержания тепла (АИСТ) в ХПС за период с марта по август.

Отметим, что в настоящее время на исследуемой акватории нет даже сравнительно небольших по размерам областей, в которых имеется непрерывный пакет информации за последние 50–70 лет. Поэтому восстановление пропусков в трехмерных массивах (широта, долгота, годы) аномалий интегрального содержания тепла выполнено в три этапа. На первом из них использованы регрессионные соотношения, основанные на корреляционном анализе данных, согласно процедуре, изложенной ранее (Лучин, Жигалов, 2006).

На следующем этапе, после выполнения корреляционной процедуры восстановления недостающих значений, проводился анализ полноты средних годовых полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС. Если в них имелись единичные пропуски, которые располагались внутри ежегодных полей, то они были восстановлены kriging-методом в программном пакете SURFER.

Оставшиеся пропуски данных в годовых полях (после выполнения двух процедур заполнения недостающих значений) восстанавливались с применением процедуры разложения полей по естественным ортогональным функциям (ЕОФ), а имеющиеся пропуски заполнялись нулевыми значениями. Затем для заполнения пропущенных значений использовался вклад только нескольких первых векторов разложения полей по ЕОФ. Опытным путем было установлено, что первые 4 вектора ЕОФ обычно производят лучшее восстановление недостающих значений.

После выполнения всех этапов восстановления пропущенных значений выполнялось окончательное разложение средних годовых аномалий интегрального содержания тепла в ХПС по ЕОФ.

Анализ многолетней изменчивости полученных временных рядов проведен в два этапа. На первом этапе оценивалось наличие трендовой составляющей. Для этой цели использован фильтр, выделяющий линейную функцию времени из смеси с белым шумом (Плотников, 2003). На втором этапе проводился спектральный анализ анализируемых рядов. При этом для корректности получаемых спектральных оценок предварительно проводилась фильтрация трендовых составляющих. Анализ частотных спектров временных рядов получен методом максимальной энтропии (Привальский, 1985). Все расчеты проведены для 95 %-ного уровня значимости.

Результаты и их обсуждение

Метод разложения полей по ЕОФ позволяет аппроксимировать исследуемые природные процессы рядом пространственно-временных колебаний различной статистической повторяемости. Как правило, наиболее полно рассматриваются физические процессы, связанные с формированием первых собственных векторов, несущих информацию об основных крупномасштабных изменениях исследуемых полей. Последующие более мелкомасштабные составляющие формируются под влиянием множества локальных факторов, и их строгая физическая интерпретация обычно затруднена.

Обычно наиболее полно анализируется вклад только первой составляющей разложения исходных полей, которая характеризует наиболее крупномасштабные процессы и отвечает за синхронные изменения в пределах моря. Другие составляющие отражают перераспределение термического потенциала между отдельными регионами моря, поэтому их следует учитывать при оценке термического режима акваторий, значительная часть которых подвержена влиянию экстремумов отдельных компонент ЕОФ.

Для анализа межгодовой изменчивости термического состояния ХПС Охотского моря были использованы 4 первые составляющие разложения по ЕОФ, аккумулирующие 53,5 % информации об изменчивости исходных полей (рис. 1). Эти компоненты дают представление об основных особенностях крупномасштабной межгодовой изменчивости термического режима ХПС. Мелкомасштабные составляющие более высоких порядков формируются под влиянием множества локальных факторов (и короткопериодной изменчивости температуры воды), поэтому их интерпретация обычно затруднена. Кроме того, масштабы их изменчивости соизмеримы с уровнем ошибок наблюдений и вычислительного процесса, поэтому исключение их из анализа можно трактовать как дополнительное сглаживание исходных полей.

В поле пространственного распределения первой компоненты (рис. 1, а), вклад которой составляет 24,6 % общей дисперсии анализируемых полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС, наблюдаются синхронные колебания в пределах всей исследуемой акватории моря, что подтверждается отсутствием участков со сменой знака в поле изолиний.

Область повышенных значений межгодовых колебаний аномалий интегрального содержания тепла в ХПС выделяется в центре моря (с максимумом над шельфом и склоном южной части п-ова Камчатка). На большей части периферийных участков Охотского моря вклад первой компоненты существенно уменьшается (рис. 1, а). Представленное распределение повышенных значений в поле первой ЕОФ можно объяснить распространением теплых тихоокеанских вод в пределах Охотского моря, которое существенно различается в теплые и холодные годы. Это подтверждают карты типовых распределений температуры воды на подповерхностных горизонтах, опубликованные ранее (Лучин, Жигалов, 2006).

В пространственном распределении собственного вектора второй компоненты, вклад которой составляет 13,2 % общей дисперсии полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС, отражена противофазность межгодовых колебаний в центральной части моря по отношению к северной и юго-западной частям Охотского

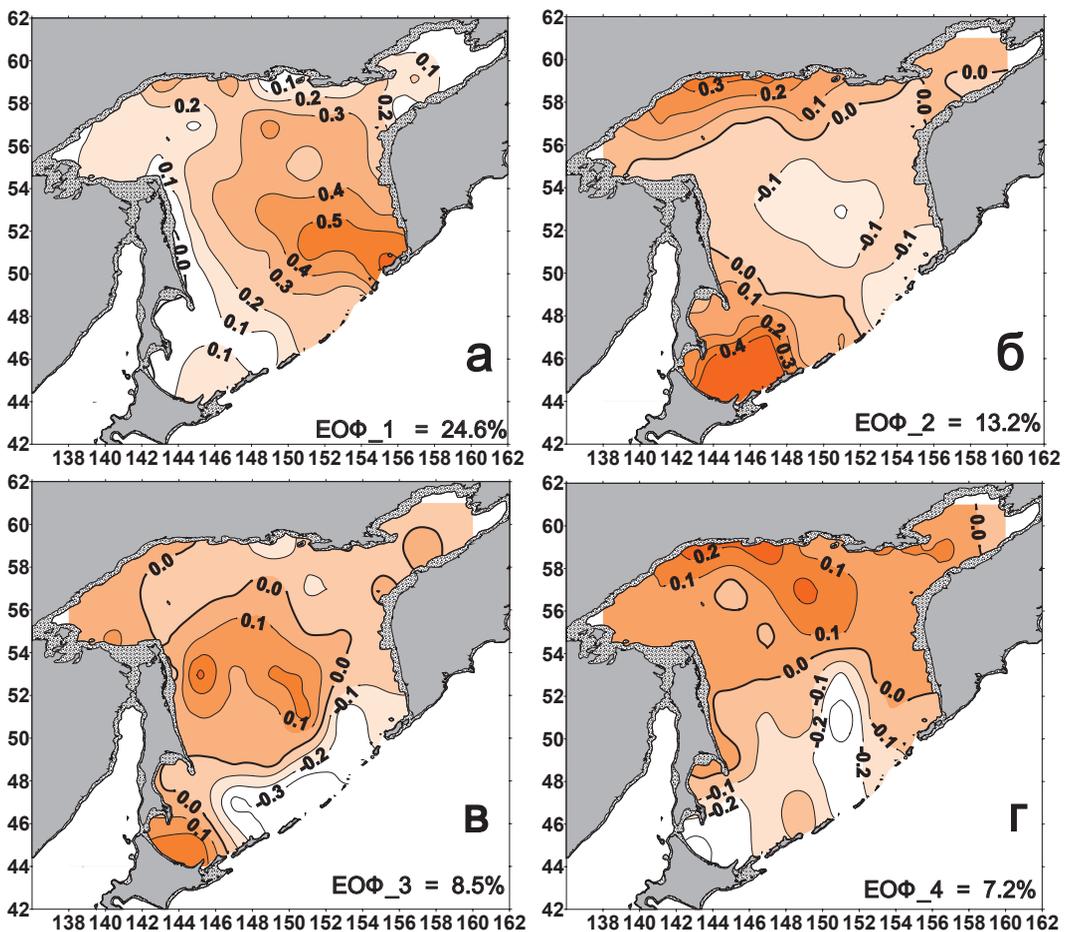


Рис. 1. Пространственные распределения первых 4 компонент разложения по ЕОФ полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС Охотского моря

Fig. 1. Spatial distribution of the first four EOF modes of the Integral Heat Content anomalies for the Okhotsk Sea cold subsurface water

моря (рис. 1, б). Отрицательные экстремумы выделяются в центральной части моря и в районе северных проливов Курильской гряды. Противоположные им по знаку экстремумы выделяются в южной части моря (западная часть Курильской котловины), а также в прибрежном районе моря от Аяна до Тауйской губы. Область с экстремумами отрицательных значений вытянута от северных проливов Курильской гряды в направлении банки Кашеварова (это район Срединного течения Охотского моря (Чернявский, 1981)). Поэтому наиболее вероятно, что формирование этой области с отрицательными значениями в поле второй компоненты может быть связано с межгодовыми изменениями термического состояния вод Срединного течения. Вклад второго вектора разложения проявляется таким образом, что если в центральной части моря и в районе северных проливов Курильской гряды в конкретный год будет наблюдаться потепление, то в южной части моря (западная часть Курильской котловины), а также в прибрежном районе моря от Аяна до Тауйской губы произойдет соответствующее похолодание.

В поле третьей компоненты разложения (рис. 1, в), вклад которой составляет 8,5 % общей дисперсии, также отражается противофазность межгодовых колебаний двух обширных районов Охотского моря. В первый из них (с положительными значениями в поле изолиний) входит центральная часть Охотского моря, прилегающая к о. Сахалин, а также более мелкие северо-западный и юго-западный районы моря. Второй район (с отрицательными значениями в поле изолиний) включает периферийные акватории юго-восточной, восточной и северной частей Охотского моря. Вклад третьего вектора

разложения проявляется таким образом, что если в центральной и западной частях моря в конкретный год будет наблюдаться потепление, то на периферии юго-восточной, восточной и северной частей Охотского моря произойдет соответствующее похолодание.

Четвертая составляющая ЕОФ-разложения несет в себе 7,2 % межгодовых изменений полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС (рис. 1, г). На представленной схеме пространственного распределения значений этой компоненты выделяется противофазность процессов на оси север–юг. В центральной части Охотского моря вклад этой компоненты минимален. Поле значений четвертой составляющей свидетельствует о синхронности потеплений и похолоданий в южной части моря, а также о противоположно протекающих процессах в северной части моря.

Многолетняя изменчивость первых 4 временных составляющих полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС Охотского моря представлена на рис. 2 (V_1, ..., V_4), на котором видно, что в распределении временных коэффициентов разложения прослеживается ряд квазипериодических циклов. Проведенные расчеты показали, что статистически значимые линейные тренды во всех анализируемых рядах, представленных на рис. 2, в ХПС Охотского моря не выделяются.

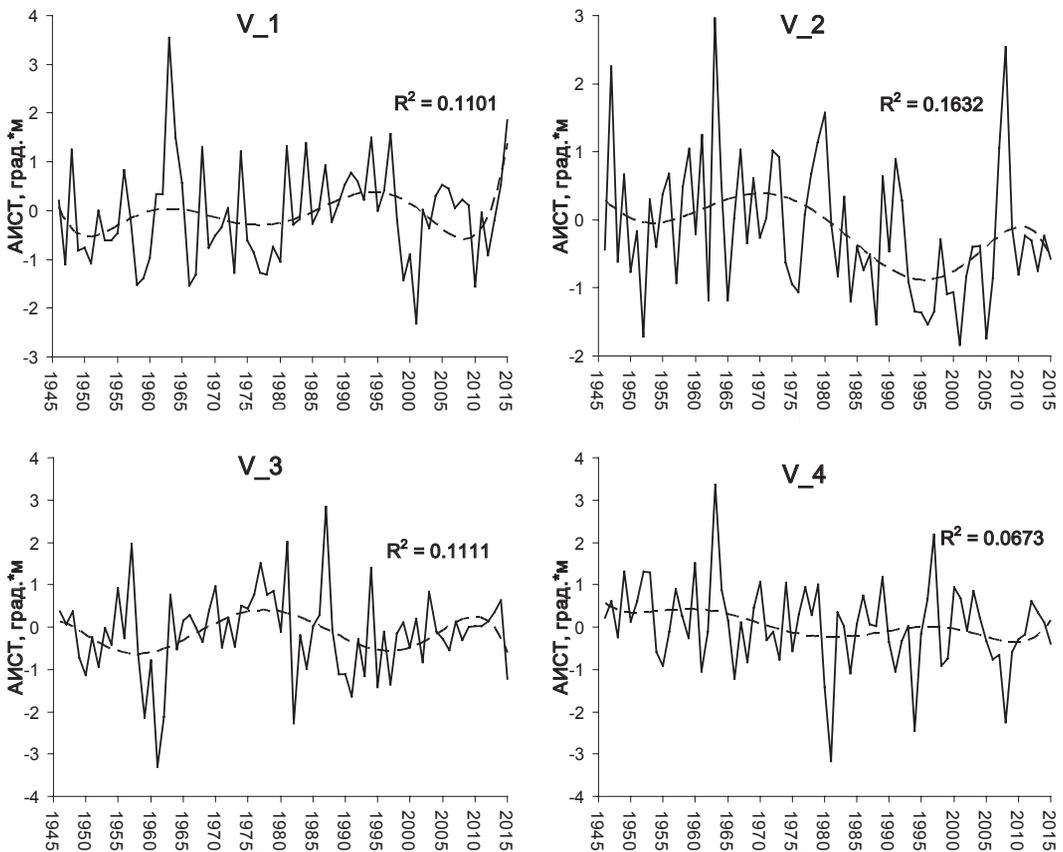


Рис. 2. Первые 4 временные функции разложения по ЕОФ полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС Охотского моря

Fig. 2. First four EOF time functions of the Integral Heat Content anomalies for the Okhotsk Sea cold subsurface water

Для оценки наличия долговременных тенденций (потепления/похолодания) представлены также полиномиальные тренды шестой степени (пунктирные линии на рис. 2). Только для четвертого временного коэффициента, если учитывать величину достоверности аппроксимации R^2 на рис. 2, полиномиальный тренд оказался статистически незначимым.

Линия полиномиального тренда ряда первого временного коэффициента показала (рис. 2, а), что для Охотского моря в целом характерны долговременные циклы, вклю-

чающие конкретные периоды потепления и похолодания, которые имеют продолжительность около 30 лет. В начале исследуемого периода (1946–1950 гг.) наблюдалось понижение теплового состояния ХПС, а с 2009–2010 по 2015 г. — его рост. Периоды потепления ХПС выделяются с 1951 по 1964, а также с 1978 по 1994 г. Периоды похолодания ХПС выделяются с 1965 по 1977 и с 1995 до 2008 г.

Полиномиальные тренды рядов второго и третьего временных коэффициентов свидетельствуют о том, что в локальных районах Охотского моря возможны долговременные циклы продолжительностью 35–45 лет, включающие конкретные перемежающиеся периоды потепления и похолодания (рис. 2). Более того, их экстремумы имеют сдвиги между собой, а также, как правило, находятся в противофазе полиномиальному тренду первого временного коэффициента (рис. 2).

По результатам спектрального анализа рядов временных коэффициентов разложения аномалий интегрального содержания тепла в ХПС Охотского моря были выделены следующие статистически значимые колебания: первая компонента — 8–9- и 2–3-летние периодичности; вторая компонента — 8–9, 4–5 и 2–3-летние; третья компонента — 7–8- и 2–3-летние; четвертая компонента — 12–13, 6, 3–4 и 2–3-летние периодичности. Полученные результаты не противоречат оценкам предшествующих авторов для ограниченных акваторий моря (Винокурова, 1972; Давыдов, 1984; Павлычев и др., 1989; Чернявский, 1992; Лучин, Лаврентьев, 1997; Фигуркин, 1997; Устинова и др., 2002; Хен, 2002; Жигалов, Лучин, 2005).

Термическое состояние конкретного года можно определить при анализе ряда временного коэффициента первой моды разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря. Эта мода характеризует синхронные межгодовые изменения термического состояния ХПС в пределах всего моря (рис. 1, а). Следуя рекомендациям, изложенным в работе И.И. Елисеевой, М.М. Юзбашева (1998), была выполнена типизация термического состояния ХПС Охотского моря на 5 категорий: «экстремально холодные», «холодные», «нормальные», «теплые» и «экстремально теплые» годы.

Вначале были вычислены среднее значение и стандартное отклонение временного ряда первой компоненты (рис. 2, а). Затем были использованы следующие критерии для отнесения конкретного года к соответствующему типу лет: в категорию нормальных лет отнесены значения ряда, диапазон изменений которых (относительно среднего значения ряда) не выходит за пределы $|\Delta T| < 0,674\sigma$, где ΔT — значения первого временного коэффициента разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря, σ — среднее квадратическое отклонение ряда величин первого временного коэффициента разложения по ЕОФ. Для холодных лет $-2\sigma < \Delta T < -0,674\sigma$; для экстремально холодных $\Delta T < -2\sigma$; для теплых $0,674\sigma < \Delta T < 2\sigma$; для экстремально теплых $2\sigma < \Delta T$.

Выполненный согласно предложенным критериям анализ ряда временного коэффициента первой моды разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря позволил выделить с 1946 по 2015 г. следующие по термическим условиям годы:

- «экстремально холодный» 2001 г.;
- «холодные» 1947, 1949, 1950, 1951, 1958, 1959, 1960, 1966, 1967, 1969, 1973, 1976, 1977, 1978, 1980, 1999, 2000, 2010, 2012 гг.;
- «нормальные» 1946, 1952, 1953, 1954, 1955, 1957, 1961, 1962, 1965, 1970, 1971, 1972, 1975, 1979, 1982, 1983, 1985, 1986, 1988, 1989, 1990, 1993, 1995, 1996, 1998, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013, 2014 гг.;
- «теплые» 1948, 1956, 1964, 1968, 1974, 1981, 1984, 1987, 1991, 1992, 1994, 1997, 2015 гг.;
- «экстремально теплый» 1963 г.

В настоящей работе также был выполнен поиск возможных факторов, влияющих на термический режим ХПС Охотского моря. Для этого рассчитаны и исследованы корреляционные зависимости между временными коэффициентами первых 4 мод разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря с межгодовыми вариациями климатических индексов атмосферы и океана, представленных на сайте <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>, а также с межгодовыми вариациями локальных

параметров в системе атмосфера–лед–океан Охотского моря и прилегающих регионов суши и Тихого океана.

В результате проведенного исследования были получены следующие статистически значимые корреляционные связи между временными коэффициентами мод разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря, климатическими индексами и локальными параметрами, характеризующими межгодовые изменения в системе атмосфера–лед–океан Охотского моря и прилегающих регионов суши и Тихого океана.

Индекс Арктической осцилляции (АО). Выявлена значимая связь только с индексом АО в феврале ($R = 0,40$; при $R_{\text{крит}} = 0,25$) и третьим временным коэффициентом разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря.

West Pacific teleconnection index (WP). Значимая связь ($R = -0,31$ и $-0,38$ соответственно в январе и феврале) выявлена между первым коэффициентом разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря и индексом WP (при $R_{\text{крит}} = 0,25$). Этот индекс характеризует основной низкочастотный режим изменчивости северной части Тихого океана. В течение зимы и весны этот индекс образует диполь, один центр которого расположен над северной частью Охотского моря и п-овом Камчатка, а другой центр противоположного знака простирается над юго-восточной Азией и западными субтропиками северной части Тихого океана. Положительная фаза индекса WP связана с температурами воздуха ниже среднего в регионе Восточной Сибири во все сезоны. Максимальные значения коэффициента корреляции ($-0,42$) получены при осреднении средних месячных значений индекса WP за январь и февраль.

Средняя месячная температура воздуха по данным реанализа NCEP/NCAR. Получены статистически значимые (при $R_{\text{крит}} = 0,25$) значения коэффициентов корреляции первого временного коэффициента разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря с температурой воздуха на поверхности 1000 мб над северной частью моря и прилегающими районами суши. Были использованы значения температуры воздуха с различными временными и пространственными масштабами осреднения. Значимые коэффициенты корреляции (при различных пространственных осреднениях) получены для периода с ноября по апрель. Максимальные коэффициенты корреляции ($R = 0,52$) получены при осреднении температуры воздуха на поверхности 1000 мб в регионе $52,5-60,0^\circ$ с.ш. $132,5-150,0^\circ$ в.д. за период с ноября по апрель (это период только с отрицательными средними месячными значениями температуры воздуха).

Температура воздуха по данным метеостанций. Выполнена оценка корреляционной связи временных коэффициентов разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря со средней месячной температурой воздуха, количеством дней с отрицательными значениями температуры воздуха, а также с суммой градусо-дней мороза на метеорологических станциях Охотск и Магадан. Критическое значение коэффициента корреляции сравниваемых рядов равно 0,25. Наиболее тесная связь ($R = 0,54$) получена между первым коэффициентом разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря с суммой градусо-дней мороза на станции Магадан (на станции Охотск она существенно ниже, $R = 0,43$).

Данные о ледовитости Охотского моря (предоставлены В.В. Плотниковым, Е.И. Устиновой и Ю.Д. Сорокиным, а также В.М. Пищальником). Получены хорошие связи первого временного коэффициента разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря с ледовитостью Охотского моря ($R_{\text{крит}} = 0,26$). Значимые противофазные коэффициенты связи особенно тесны для периода максимального развития ледяного покрова (февраль–апрель), а максимальные коэффициенты корреляции получены для марта ($-0,61$) и для периода февраль–март ($-0,60$).

У второго временного коэффициента разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря также есть значимые положительные связи с ледовитостью Охотского моря в январе (0,31), феврале (0,32) и апреле (0,33), а также со средней ледовитостью за период с декабря по апрель (0,31). Наличие этой связи можно трактовать так, что в годы с повышенной ледовитостью моря в центральной части Охотского моря и в районе северных проливов Курильской гряды вклад второй компоненты ЕОФ (см.

рис. 1) будет понижать теплосодержание ХПС, а в юго-западной части Курильской котловины и в прибрежном районе моря от Аяна до Тауйской губы будет повышать теплосодержание ХПС Охотского моря.

Температура воды в деятельном слое Японского моря. Определена значимая корреляционная связь между первой модой разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря и вкладом второй моды разложения температуры воды Японского моря на горизонте 50 м в январе-марте (Лучин и др., 2007). Коэффициент корреляции этой связи составляет 0,47 (при $R_{\text{крит}} = 0,28$) и проявляется таким образом, что если зимой (январь-март) конкретного года в северо-восточной части Японского моря будет повышенное теплосодержание вод на горизонте 50 м, то это приведет к росту температуры воды в ХПС в пределах всего Охотского моря.

Температура поверхности северо-западной части Тихого океана. Получены статистически значимые (при $R_{\text{крит}} = 0,24$) значения коэффициентов корреляции первого временного коэффициента разложения по ЕОФ полей АИСТ в ХПС Охотского моря с температурой поверхности прилегающих районов Тихого океана с января по май. Ниболее тесная связь определена для локального района к востоку от мыса Лопатка (пределы координат 50,5–52,4° с.ш. 157,5–161,3° в.д.) с января по апрель ($R = 0,35 \dots 0,54$ с минимумом в апреле и максимумом в феврале) и осредненных значений температуры поверхности этого района Тихого океана за февраль-март ($R = 0,53$).

Следует отметить, что не были выявлены статистически значимые связи со следующими индексами, которые потенциально могут воздействовать на термическое состояние деятельного слоя Охотского моря.

1. С меридиональной и зональной составляющими скорости ветра на поверхности 1000 мб в холодный период года над акваторией Охотского моря и прилегающими регионами азиатского континента (несмотря на то что были рассмотрены различные по площади и географическому положению участки над морем и сушей, а также средние месячные и более длительные обобщения временных рядов).

2. Со средней по земному шару аномалией температуры (**Global Mean Lan/Ocean Temperature Index**).

3. С тихоокеанской декадной осцилляцией (**PDO**).

4. С индексом **North Pacific pattern (NP)**, который рассчитывается как среднее взвешенное давление на уровне моря в регионе 30–65° с.ш. 160° в.д. — 140° з.д.

5. С индексом **Pacific/North American (PNA)**.

6. С индексами, характеризующими явление Эль-Ниньо.

7. С межгодовыми колебаниями температуры воды в ХПС Берингова моря, временные ряды которых представлены ранее (Лучин и др., 2007).

Заключение

Анализ многолетней изменчивости первых 4 временных компонент разложения исходных полей по ЕОФ показал, что в их распределении прослеживается ряд квазипериодических циклов (продолжительностью до 30–45 лет), а статистически значимые линейные тренды не выделяются.

По результатам спектрального анализа временных коэффициентов были выделены следующие статистически значимые колебания: первая компонента — 8–9- и 2–3-летние периодичности; вторая компонента — 8–9, 4–5 и 2–3-летние периодичности; третья компонента — 7–8- и 2–3-летние периодичности; четвертая компонента — 12–13, 6, 3–4 и 2–3-летние периодичности.

Линия полиномиального тренда первого временного коэффициента показала, что для Охотского моря в целом характерны долговременные циклы, включающие конкретные периоды потепления и похолодания, которые имеют продолжительность около 30 лет. В начале исследуемого периода (1946–1950 гг.) наблюдалось понижение теплового состояния ХПС, а с 2009–2010 по 2015 г. отмечается его рост. Периоды потепления ХПС выделяются с 1951 по 1964, а также с 1978 по 1994 г., а периоды похолодания — с 1965 по 1977 и с 1995 до 2008 г.

Выполненный согласно предложенным критериям анализ ряда временного коэффициента первой моды разложения по ЕОФ полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС Охотского моря позволил выделить с 1946 по 2015 г. следующие по термическим условиям годы: «экстремально холодный» 2001 г.; «холодные» 1947, 1949, 1950, 1951, 1958, 1959, 1960, 1966, 1967, 1969, 1973, 1976, 1977, 1978, 1980, 1999, 2000, 2010, 2012 гг.; «нормальные» 1946, 1952, 1953, 1954, 1955, 1957, 1961, 1962, 1965, 1970, 1971, 1972, 1975, 1979, 1982, 1983, 1985, 1986, 1988, 1989, 1990, 1993, 1995, 1996, 1998, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013, 2014 гг.; «теплые» 1948, 1956, 1964, 1968, 1974, 1981, 1984, 1987, 1991, 1992, 1994, 1997, 2015 гг.; «экстремально теплый» 1963 г.

В результате проведенного исследования были выявлены статистически значимые корреляционные связи между временными коэффициентами мод разложения по ЕОФ полей аномалий интегрального содержания тепла в ХПС Охотского моря, климатическими индексами (АО, WP) и локальными параметрами, характеризующими межгодовые изменения в системе атмосфера–лед–океан Охотского моря и прилегающих регионов суши и Тихого океана (температурой воздуха на поверхности 1000 мб над северной частью моря и прилегающими районами суши, с суммой градусо-дней мороза на метеорологических станциях Охотск и Магадан, с ледовитостью Охотского моря, с температурой воды Японского моря на горизонте 50 м в январе-марте, с температурой поверхности прилегающих районов Тихого океана с января по май).

Список литературы

Бакланов П.Я., Арзамасцев И.С., Качур А.Н. и др. Природопользование в прибрежной зоне (проблемы управления на Дальнем Востоке России) : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2003. — 229 с.

Винокурова Т.Т. Изменчивость температурных условий вод в северной части Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 1965. — Т. 59. — С. 14–26.

Винокурова Т.Т. Межгодовая изменчивость придонной температуры у западного побережья Камчатки // Исслед. по биол. рыб и промысл. океаногр.— Владивосток : ТИНРО, 1972. — Вып. 7. — С. 3–11.

Винокурова Т.Т. О распределении придонной температуры воды у западного побережья Камчатки // Изв. ТИНРО. — 1964. — Т. 55. — С. 165–174.

Гершанович Д.Е., Муромцев А.М. Океанологические основы биологической продуктивности Мирового океана : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1982. — 320 с.

Гладышев С.В. Термохалинная структура вод придонного слоя на северном шельфе Охотского моря // Метеорол. и гидрол. — 1998. — № 3. — С. 54–64.

Давыдов И.В. К вопросу об океанологических основах формирования урожайности отдельных поколений сельди западной части Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 1972. — Т. 82. — С. 281–307.

Давыдов И.В. О природе длительных изменений численности рыб и возможности их предвидения // Динамика численности промысловых животных дальневосточных морей. — Владивосток : ТИНРО, 1986. — С. 5–16.

Давыдов И.В. О сопряженности развития океанологических условий в основных рыбопромысловых районах дальневосточных морей // Изв. ТИНРО. — 1984. — Т. 109. — С. 3–16.

Давыдов И.В. Режим вод западнокамчатского шельфа и некоторые особенности поведения и воспроизводства промысловых рыб // Изв. ТИНРО. — 1975. — Т. 97. — С. 63–81.

Давыдов И.В., Куцых А.Г. Температура ядра холодного промежуточного слоя как прогностический показатель термического состояния вод, прилегающих к Камчатке // Изв. ТИНРО. — 1968. — Т. 64. — С. 301–308.

Дулупова Е.П. Экосистемные исследования ТИНРО-центра в дальневосточных морях // Изв. ТИНРО. — 2005. — Т. 141. — С. 3–29.

Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики : учеб. — М. : Финансы и статистика, 1998. — 366 с.

Жигалов И.А., Лучин В.А. Межгодовая изменчивость температуры придонных вод на шельфе западной Камчатки // Метеорол. и гидрол. — 2005. — № 10. — С. 72–80.

Круц А.А., Лучин В.А. Вертикальная структура толщи вод Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 175. — С. 234–253.

Лучин В.А., Жигалов И.А. Межгодовые изменения типовых распределений температуры воды в деятельном слое Охотского моря и возможность их прогноза // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 147. — С. 183–204.

Лучин В.А., Лаврентьев В.М. Особенности межгодовых изменений температуры воды на шельфе и материковом склоне Западной Камчатки и возможности их прогнозирования // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. — М. : ВНИРО, 1997. — С. 52–56.

Лучин В.А., Соколов О.В., Плотников В.В. Межгодовая изменчивость температуры воды в деятельном слое Японского моря и возможность ее прогноза // Динамика экосистем и современные проблемы сохранения биоресурсного потенциала морей России. — Владивосток : Дальнаука, 2007. — С. 14–33.

Морошкин К.В. Водные массы Охотского моря : моногр. — М. : Наука, 1966. — 70 с.

Павлычев В.П., Будаева В.Д., Хен Г.В. и др. Межгодовые изменения гидрометеорологических условий в основных районах промысла северо-западной части Тихого океана и возможности их прогнозирования // Долгопериодная изменчивость условий природной среды и некоторые вопросы рыбопромыслового прогнозирования. — М. : ВНИРО, 1989. — С. 124–141.

Плотников В.В. Эволюция ледовых условий на дальневосточных морях России во второй половине XX века // Вестн. ДВО РАН. — 2003. — Вып. 2. — С. 126–133.

Привальский В.Е. Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры) : моногр. — М. : Наука, 1985. — 184 с.

Радченко В.И., Мельников И.В., Волков А.Ф. и др. Условия среды, состав планктона и нектона эпипелагиали южной части Охотского моря и сопредельных океанских вод летом // Биол. моря. — 1997. — Т. 23, № 1. — С. 15–25.

Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д., Хен Г.В. Межгодовая изменчивость термических условий Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 44–51.

Фигуркин А.Л. Изменчивость термохалинного состояния придонных вод северной части Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 166. — С. 255–274.

Фигуркин А.Л. Межгодовая изменчивость теплового состояния вод охотоморского шельфа // Комплексные исследования экосистем Охотского моря. — М. : ВНИРО, 1997. — С. 50–52.

Фигуркин А.Л. Развитие океанологических условий западной Камчатки по данным мониторинговых наблюдений 1997 и 2000 гг. // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 103–116.

Хен Г.В. Гидрологические условия Охотского моря в конце 90-х гг. по данным стандартных разрезов // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 52–58.

Хен Г.В., Ванин Н.С., Фигуркин А.Л. Особенности гидрологических условий в северной части Охотского моря во второй половине 90-х гг. // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 24–43.

Чернявский В.И. Изменчивость ядра холода и прогноз типа термического режима на севере Охотского моря // Океанологические основы биологической продуктивности северо-западной части Тихого океана. — Владивосток, 1992. — С. 104–113.

Чернявский В.И. Циркуляционные системы Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 1981. — Т. 105. — С. 13–19.

Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. — Т. 1. — 579 с.

Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2016. — Т. 2. — 796 с.

Шунтов В.П. Состояние изученности многолетних циклических изменений численности рыб дальневосточных морей // Биол. моря. — 1986. — № 3. — С. 3–14.

Шунтов В.П., Бочаров Л.Н., Дулепова Е.П. Результаты мониторинга и экосистемного изучения биологических ресурсов дальневосточных морей России (1998–2002 гг.) // Изв. ТИНРО. — 2003. — Т. 132. — С. 3–26.

Шунтов В.П., Дулепова Е.П., Волвенко И.В. Современный статус и многолетняя динамика биологических ресурсов дальневосточной экономической зоны России // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 3–11.

Шунтов В.П., Темных О.С. Иллюзии и реалии экосистемного подхода к изучению и управлению морскими и океаническими биологическими ресурсами // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 173. — С. 3–29.

Gladyshev S., Talley L., Kantakov G. et al. Distribution, formation, and seasonal variability of Okhotsk Sea Mode Water // J. Geophys. Res. — 2003. — Vol. 108, № C6, 3186. doi: 10.1029/2001JC000877.

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 : NOAA Atlas NESDIS 67. International Ocean Atlas and Information Series. — Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office, 2010. — Vol. 12. — 329 p., CD-ROM.

Luchin V.A., Zhigalov I.A., Plotnikov V.V. The Interannual Variability of the Water Temperature of the Okhotsk Sea // PICES Sci. Rep. — 2004. — № 27. — P. 27–29.

Поступила в редакцию 3.10.16 г.