

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ПОДСТИЛАЮЩЕГО ЕГО ГАЛОКЛИНА АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД (ПО ДАННЫМ 1973–1979 гг.)

мл. науч. сотр. Е.А. ЧЕРНЯВСКАЯ, д-р физ.-мат. наук Л.А. ТИМОХОВ,
д-р геогр. наук Е.Г. НИКИФОРОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: cherni_ka@mail.ru, ltim@aari.nw.ru

В статье приводятся результаты расчетов толщины верхнего перемешанного слоя, глубины залегания максимального градиента солёности и толщины галоклина, полученные по наиболее полным океанографическим съёмкам 1973–1979 гг. в Арктическом бассейне. Рассматриваются особенности пространственной и межгодовой изменчивости характеристик поверхностного слоя и подстилающего его галоклина в зимний период (толщины перемешанного слоя, средней солёности перемешанного слоя, средней частоты Вьяйся–Брента в галоклине, толщины галоклина и разницы солёностей на верхней и нижней границах галоклина). Анализ причин межгодовой изменчивости состояния поверхностного слоя и слоя скачка солёности показал, что межгодовая изменчивость параметров поверхностного слоя в Евразийском суббассейне определяется преимущественно влиянием атлантических вод и типом атмосферной циркуляции. Основными факторами, определяющими изменчивость характеристик поверхностного слоя в Американо-Северном суббассейне, являются атмосферные процессы, поступление тихоокеанских вод через Берингов пролив, таяние льда и речной сток из морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

Ключевые слова: Арктический бассейн, перемешанный слой, галоклин, параметрическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностный слой Арктического бассейна (АБ) и подстилающий его галоклин составляют деятельный слой океана [Никифоров, 2006], который играет важную роль в процессе взаимодействия атмосферы и глубокого океана. Активные процессы, протекающие в деятельном слое, формируют специфические черты вертикального распределения температуры и солёности и определяют особенности пространственной термохалинной структуры. Поэтому исследования термохалинных характеристик деятельного слоя, параметров поверхностного слоя и галоклина, а также их изменчивости являются важным этапом на пути развития теории гидрологического режима Северного Ледовитого океана (СЛО) [Никифоров, Шпайхер, 1980].

В поверхностном слое (ПС), располагающемся непосредственно под дрейфующим льдом, вертикальные изменения температуры и солёности, как правило, небольшие [Ширшов, 1944; Трешников, 1959]. В нижележащем пикноклине, который в АБ совпадает с галоклином, наблюдаются значительные изменения плотности и солёности. Отметим, что пикноклин составляет множество слоев и прослоек с локальными экстремумами температуры. Прежде всего это зимние и летние тихоокеанские воды.

Е.Г.Никифоров [Никифоров, 2006] выделил шесть типов строения вод деятельного слоя АБ, встречающихся в зимний период, и составил карты распределения этих типов по акватории АБ для зимнего периода 1973 и 1974 гг. Автор отмечает, что картина распределения типов в пространстве от года к году не сохраняется и, возможно, осуществляется переход от одного типа распределения к другому через переходное состояние, складывающееся вследствие процессов, определяющих перестройку термохалинных полей деятельного слоя.

В статье [Гарманов и др., 2008] на основе средних климатических данных были приведены оценки средней солёности и толщины поверхностного слоя в Арктическом бассейне для летнего и зимнего сезонов. Летом его толщина составляет около 10 м в северных частях арктических морей и около 20–40 м в центральной части Арктического бассейна. В зимний период толщина слоя на северных границах морей сибирского шельфа составляет 20–25 м и увеличивается до 70–100 м в Евразийском суббассейне. Установлена также изменчивость толщины слоя и средней солёности от десятилетия к десятилетию за период с 1950 по 1989 г.

В данной статье изложены результаты исследований изменчивости состояния поверхностного слоя и галоклина в зимний период по наиболее полным океанографическим съёмкам 1973–1979 гг. Для анализа использовались основные параметры верхнего слоя: средняя солёность и толщина перемешанного слоя, разность солёности (скачок солёности) на верхней и нижней границах галоклина, толщина галоклина и частота Вайселя–Брента. Температура поверхностного слоя не анализировалась, поскольку в зимний период ее величина в поверхностном слое близка к температуре замерзания, которая, в свою очередь, зависит от солёности воды. В отличие от работы [Гарманов и др., 2008], для расчетов нами были использованы только фактические данные, а также была применена другая процедура определения нижней границы перемешанного слоя и исследовалась межгодовая изменчивость параметров поверхностного слоя. В результате были получены показатели межгодовых вариаций характеристик поверхностного слоя и галоклина и выполнен анализ основных причин межгодовой изменчивости состояния поверхностного слоя и слоя скачка солёности.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА

Исследование производилось по данным зимних океанографических съёмок АБ 1973–1979 гг., выполненных ААНИИ в ходе высокоширотных воздушных экспедиций. Этот период был выбран в силу следующих причин. Данные океанографические съёмки покрывали значительную часть акватории АБ [Фролов и др., 2005]. Экспедиции начинали работу с 20 марта и заканчивали 10 мая, что позволяет считать их квазисинхронными. Не менее важным является и то обстоятельство, что ранее эти данные не использовались для анализа межгодовых изменений характеристик поверхностного слоя (ПС) и галоклина (ГКл) зимнего сезона.

Исходный массив данных был сформирован в общей сложности из 897 станций и представлял собой набор вертикальных профилей температуры и солёности, представленных их значениями на стандартных горизонтах 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 м и далее через каждые 500 м до дна.

Типичные профили плотности, солёности и температуры в слое 250 м в зимний период (на примере 1975 г.) приведены на рис. 1. Наиболее часто в слое до 25 м наблюдается квазиоднородность плотности, солёности и температуры. В некоторых местах плотность и солёность слабо меняются до глубины 50 м и более. Глубже солёность

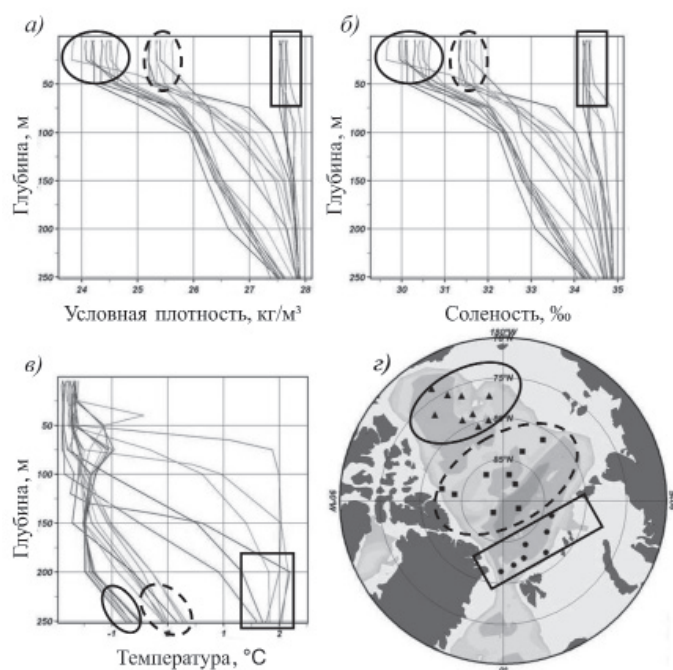


Рис. 1. Вертикальные профили условной плотности (а), солёности (б) и температуры (в) на океанографических станциях зимней съёмки 1975 г. в районе котловины Нансена (прямоугольник), в центральной части АБ (овал с прерывистым контуром) и в Канадской котловине (овал со сплошным контуром). На фрагменте (г) – схема расположения станций.

увеличивается с глубиной. Из рис. 1 также видно, что именно в поверхностном слое наблюдается значительный пространственный разброс значений термохалинных характеристик. На карте различными геометрическими фигурами показаны районы с различными типами вертикальных профилей температуры и солёности. Вид профилей, соответствующих тому или иному району, приведен на рисунках 1а, 1б и 1в.

Так, профили с максимальными значениями солёности и плотности, максимальными значениями температуры в термоклизе и минимальными значениями температуры в верхнем перемешанном слое, который достигает толщины 70–80 м, соответствуют району, расположенному к северу от Шпицбергена и Земли Франца-Иосифа (на карте обозначен кружками и прямоугольником на графиках профилей). По мере продвижения на восток вдоль евразийского материкового склона, значения солёности и плотности верхнего перемешанного слоя уменьшаются, и в районе Канадской котловины (на карте обозначен треугольниками и овалом со сплошным контуром) наблюдаются их минимальные значения. Профили температуры также трансформируются, сглаживаясь по мере удаления от пролива Фрама, и в районе Канадской котловины разница между температурой на поверхности и температурой на глубине 200 м становится минимальной.

В качестве признака нижних границ поверхностного слоя и галоклина нами выбраны точки перелома генерального хода солёности с глубиной (экстремумы второй производной от солёности по глубине). Первый перелом (первый максимум второй

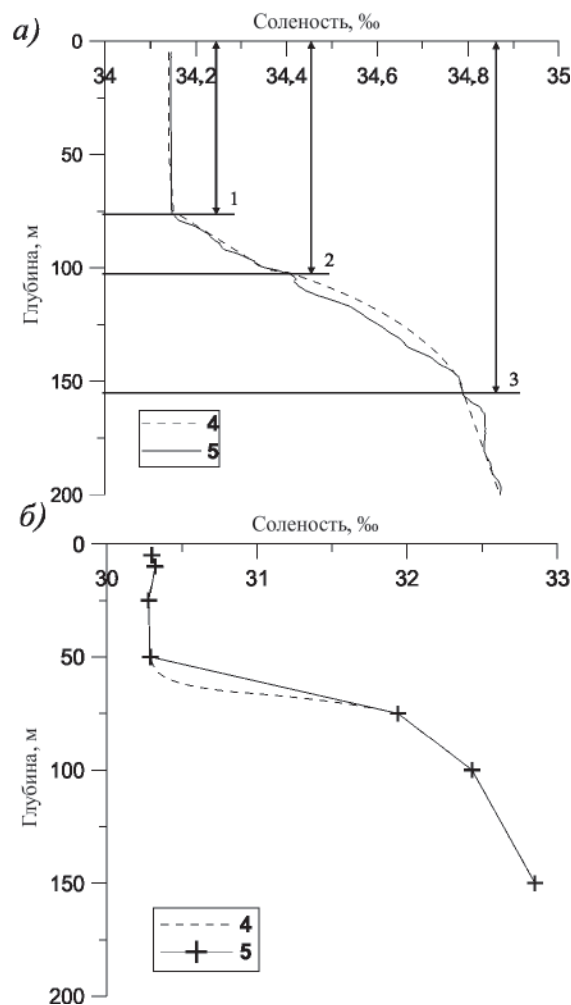


Рис. 2. Схема поверхностного слоя и галоклина (а) и пример восстановления профиля с помощью параметрической модели (б).

На фрагменте (а): 1 – верхний перемешанный слой; 2 – глубина залегания максимального градиента солёности; 3 – нижняя граница галоклина; 4 – профиль, рассчитанный по параметрической модели с использованием фактических данных измерений СТД на стандартных горизонтах; 5 – фактический профиль солёности по данным СТД-зондирования на СП-35 (апрель 2008 г.). На фрагменте (б): 4 – профиль, рассчитанный по параметрической модели; 5 – фактический профиль солёности, построенный по данным на стандартных горизонтах (отмечены крестиками).

производной от солёности по глубине) весьма четко отделяет поверхностный слой [Никифоров, Шпайхер, 1980]. Второй перелом хода солёности (второй экстремум второй производной от солёности по глубине) определяет нижнюю границу галоклина [Никифоров, 2005]. На рис. 2а указаны границы поверхностного слоя, галоклина и глубина залегания максимального градиента солёности.

В качестве характеристик состояния поверхностного слоя нами выбраны толщина и средняя солёность поверхностного слоя. В качестве параметров галоклина

использованы толщина галоклина, среднее число Вайсяля–Брента в слое галоклина, глубина залегания максимального градиента солености и разность солености на верхней и нижней границах галоклина.

Поскольку исходные данные имели дискретный характер, для более точного определения параметров верхнего слоя производилась реконструкция вертикальных профилей с помощью модифицированной параметрической модели [Лебедев, Тимохов и др., 2008].

Параметрическая модель представляет собой комбинацию двух экспоненциальных кривых с условием склейки величины солености и вертикального градиента в слое наибольшего изменения солености (в слое скачка солености), которая после подстановки в модель известных значений солености на стандартных горизонтах дает аналитическую кривую для конкретного вертикального профиля солености.

Для верификации модели производилась реконструкция непрерывного вертикального профиля солености, полученного с помощью CTD-зондирования, по дискретным данным солености на стандартных горизонтах, что дало нам возможность сравнить получаемые с помощью модели результаты с реальными величинами толщины перемешанного слоя, глубины максимального градиента и толщины галоклина. На рис. 2а приведены фактический профиль солености с разрешением по глубине 1 м (CTD-зондирование на СП-35 в апреле 2008 г.) и профиль, полученный для этой же океанографической станции в результате расчетов по данным на стандартных горизонтах.

Для оценки точности расчетов характеристик ПС и ГКл были использованы семнадцать профилей, выполненных с достаточно высоким разрешением по глубине с помощью CTD-зонда на дрейфующей станции СП-35 в марте–мае 2008 г. Чтобы ослабить влияние тонкой структуры солености на расчеты вторых производных от солености по глубине, было произведено скользящее осреднение вертикальных профилей солености с шагом 5 м. Среднее стандартное отклонение разности между расчетным и фактическим профилем в пределах перемешанного слоя не превышало 0,0086 ‰, а для слоя скачка солености – 0,24 ‰. Среднеквадратическая разность фактических и расчетных глубин залегания максимального градиента солености составила $\pm 7,48$ м для глубин 50–100 м, а толщины перемешанного слоя – $\pm 5,21$ м для толщин слоя в интервале 25–90 м. Для сравнения приведем оценки точности определения толщины перемешанного слоя по дискретным данным на стандартных горизонтах. В интервале стандартных горизонтов от 10 до 25 м ошибка может варьировать от $\pm 7,5$ до ± 15 м, а глубже 25 м – от $\pm 12,5$ до ± 25 м. Таким образом, применение параметрической модели повышает точность определения характеристик поверхностного слоя и галоклина.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И СЛОЯ СКАЧКА СОЛЕННОСТИ

Пространственное распределение параметров поверхностного слоя и галоклина на акватории АБ отличается большим разнообразием. На рис. 3 и 4 приведены карты пространственного распределения средних значений и среднеквадратических отклонений характеристик поверхностного слоя и слоя скачка соответственно. Для расчетов статистических характеристик были использованы общие для всех съемок 1973–1979 гг. точки наблюдений.

Величина толщины перемешанного слоя растет от евразийского материкового склона к канадскому, изменяясь почти в два раза (от 20–30 м до 70–80 м). Широтную ориентацию изолиний вдоль материкового склона морей Лаптевых и Восточно-Си-



Рис. 3. Распределения толщины перемешанного слоя, м (а); среднеквадратических отклонений толщины перемешанного слоя, м; (б) средней солёности перемешанного слоя, ‰ (в) и средней солёности, ‰ (г) в 1973–1979 гг.

бирского можно объяснить направлением распространения вод речного стока, выносимых в АБ из арктических морей. При этом существуют две области сгущения изолиний и увеличения толщин перемешанного слоя. Существование такой области в Канадской котловине, со стороны канадского материкового склона, обусловлено динамическими факторами на периферии антициклонического круговорота. Вторая область в котловине Нансена формируется под влиянием атлантических вод, вследствие чего здесь наблюдается значительная изменчивость практически всех параметров поверхностного слоя.

Над Чукотским поднятием наблюдается зона наибольшей изменчивости толщины перемешанного слоя, в которой межгодовая изменчивость толщины перемешанного слоя может достигать 95 % от средней величины параметра. Существование этой замкнутой зоны обусловлено, скорее всего, особенностями рельефа дна.

Средняя солёность перемешанного слоя в АБ изменяется, уменьшаясь с запада на восток более чем на 2 ‰ от котловины Нансена к Канадской котловине. Зона наибольшей изменчивости солёности, где амплитуда межгодовых колебаний достигала 1,8 ‰, в 1973–1979 гг. была вытянута вдоль хребта Ломоносова в направлении Гренландии. Эта зона ассоциируется с Трансарктическим течением, несущим опресненные воды из арктических морей в Северную Атлантику.

Полученное нами распределение средней солёности для 1973–1979 гг. по конфигурации близко к распределениям 1960–1969 гг. и 1980–1989 гг., приведенным в [Гарманов и др., 2008]. При этом величина солёности в Амеразийском суббассейне в 1973–1979 гг. была примерно на 0,4 ‰ меньше. Конфигурация поля средней соле-

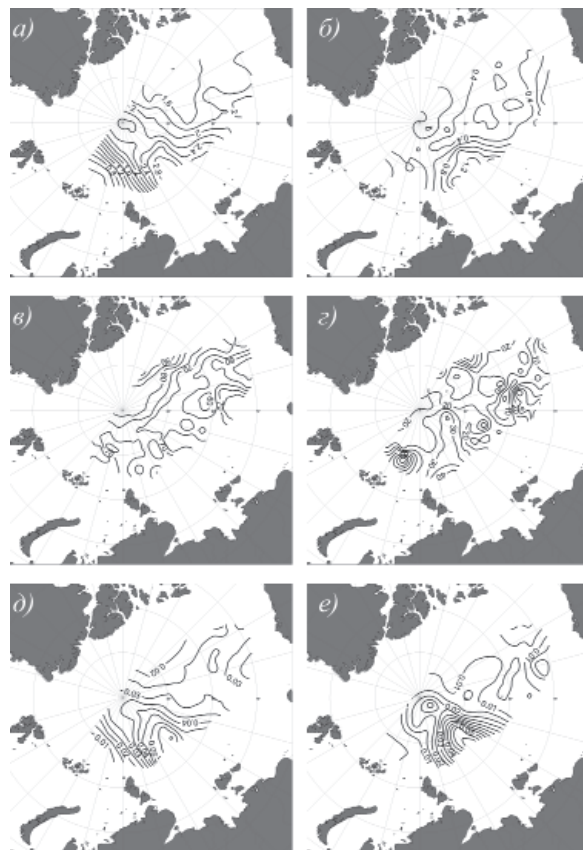


Рис. 4. Распределение разности солёности на нижней и верхней границах галоклина, ‰ (а), толщины галоклина, м (б), числа Вэйсяля–Брента, s^{-1} (д) и их среднеквадратических отклонений соответственно (б), (с), (е) в 1973–1979 гг.

ности для климатического периода 1970–1979 гг. [Гарманов и др., 2008] отличается от приведенной нами на рис. 3в не только величиной солёности, но и ориентацией изогалин в Амеразийском суббассейне. Указанные различия могут быть связаны со способом определения толщины перемешанного слоя, которая в статье [Гарманов и др., 2008] определялась по глубине залегания максимального градиента солёности, а также с тем, что в расчетах авторы использовали средние за десятилетие значения солёности на стандартных горизонтах гридированных полей 200×200 км.

Минимальные значения разности солёностей на верхней и нижней границах галоклина наблюдаются в районе севернее Шпицбергена и Земли Франца-Иосифа. Как видно из вертикальных профилей, соответствующих данному району на рис. 1, здесь наблюдаются самая большая толщина перемешанного слоя и самая высокая солёность в верхнем слое, обусловленные, прежде всего, влиянием атлантических вод, в результате чего вертикальные градиенты солёности здесь минимальны.

Далее на восток разница солёностей увеличивается, поскольку влияние атлантических вод ослабевает, но возрастает влияние распреснения поверхностного слоя за счет стока рек. При этом максимальные значения, так же как и зона наибольшей

изменчивости, наблюдаются вдоль стрежня Трансарктического течения (в районе хребта Ломоносова). Здесь же отмечаются и максимальные значения средней в слое галоклина частоты Вьяйсяля–Брента.

В целом пространственное распределение частот Вьяйсяля–Брента, которые ассоциируются с устойчивостью водных слоев, повторяет распределение разностей солёности на границах галоклина. Распределение среднеквадратических отклонений указанных параметров также имеет общие черты. Особенно хорошо это заметно в районе хребта Ломоносова, где межгодовая изменчивость и разностей солёности, и частот Вьяйсяля–Брента максимальна.

Пространственное распределение толщины галоклина повторяет основные черты распределения толщины перемешанного слоя, за тем исключением, что максимальные значения толщины слоя скачка солёности наблюдаются в Канадской котловине, а максимальные значения толщины перемешанного слоя отмечаются в районе котловины Нансена. Что опять-таки связано с разницей в величине вертикальных градиентов солёности в этих районах (см. рис. 1 и рис. 4а).

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Для иллюстрации пространственной и временной неоднородности поверхностного слоя из имеющегося массива данных нами были выбраны 1975 и 1977 гг., поскольку эти годы являются представителями двух различных ветвей кластерного древа и отображают два крайних варианта распределения солёности поверхностного слоя 5–50 м [Тимохов и др., 2011]. На рис. 5 приведены карты распределения средней солёности и толщины, а также средней в слое скачка частоты Вьяйсяля–Брента. Из рисунка видно, что в структуре поверхностного слоя за период от 1975 до 1977 г. произошли существенные изменения. Двухдерная зона распреснения, которая зимой 1975 г. была вытянута вдоль материкового склона от моря Бофорта до моря Лаптевых, к 1977 г. исчезла. Характер распределения средней солёности перемешанного слоя стал близок к среднему, для которого характерно (а) наличие зоны распреснения, связанной с антициклонической циркуляцией вод и льдов в Канадской котловине, (б) вытянутой вдоль материкового склона области более солёных вод в Евразийском суббассейне, связанной с поступлением в АБ атлантических вод.

В пространственном распределении устойчивости вод и толщины перемешанного слоя также произошли изменения. Область повышенной устойчивости сместилась из района, расположенного к северу от моря Лаптевых, в район Чукотского поднятия. При этом устойчивость слоя скачка АБ в целом к 1977 г. несколько уменьшилась, что привело к увеличению на 6 м средней по бассейну толщины перемешанного слоя.

Также хотелось бы обратить внимание на то, что на картах пространственного распределения средней солёности перемешанного слоя и частот Вьяйсяля–Брента положение зон сгущения изолиний соответствует положению таковых для карт средних значений этих характеристик (см. рис. 3 и 4).

Рассмотрим особенности межгодовой изменчивости характеристик интегрально для Евразийского и Амеразийского суббассейнов. На рис. 6 приведены кривые межгодовой изменчивости средних параметров поверхностного слоя для суббассейнов за период 1973–1979 гг. Из рисунка видно, что амплитуда изменчивости параметров поверхностного слоя в Евразийском суббассейне значительно больше таковой для Амеразийского суббассейна. И только амплитуды изменчивости толщины перемешанного слоя в обоих суббассейнах сопоставимы.

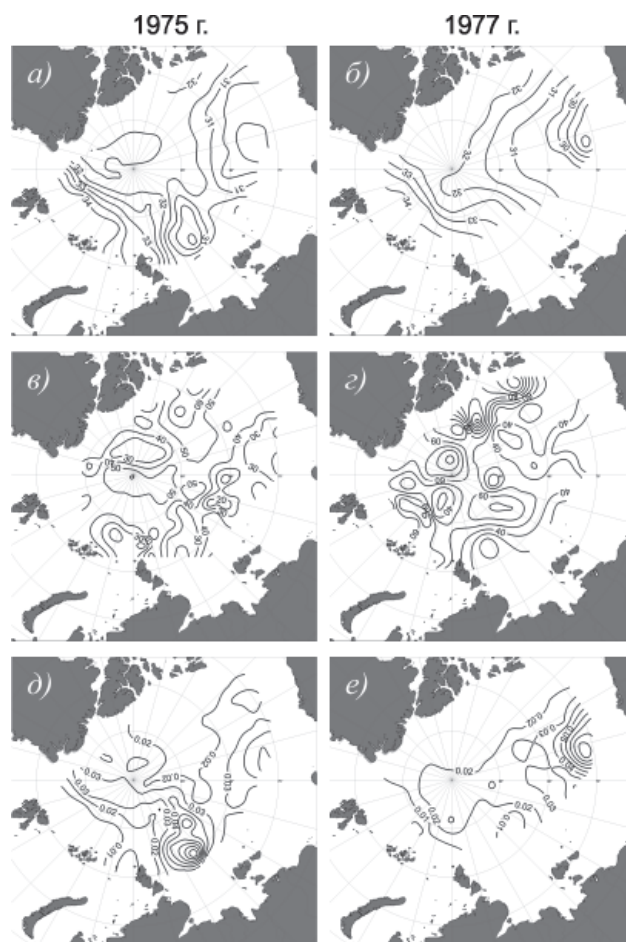


Рис. 5. Пространственное распределение характеристик поверхностного слоя для зимы 1975 и 1977 гг.: а, б – средняя соленость перемешанного слоя, ‰; в, г – толщина перемешанного слоя, м; д, е – средняя в слое скачка частота Вейселя–Брента, с⁻¹.

Межгодовые вариации солености поверхностного слоя в обоих суббассейнах на данном коротком временном интервале оказались сопряженными (рис. 6а). Но формируются эти изменения под влиянием различных факторов. Поверхностный слой и галоклин Евразийского суббассейна располагаются преимущественно над водами атлантического происхождения. Поэтому средняя соленость перемешанного слоя и разница соленостей на нижней и верхней границах галоклина в Евразийском суббассейне оказались зависящими от состояния атлантических вод. Этот факт был известен ранее и нашел отражение в том, что область наибольшей солености на поверхности океана от пролива Фрама вдоль евразийского материкового склона до моря Лаптевых (см. рис. 3в) была названа «следом атлантических вод» [Трешников, 1959]. Наибольший коэффициент корреляции r между средней соленостью перемешанного слоя и соленостью атлантических вод в Фареро-Шетландском проливе при временном сдвиге 7–8 лет по нашим оценкам оказался равным $r = 0,74$. Для скачка

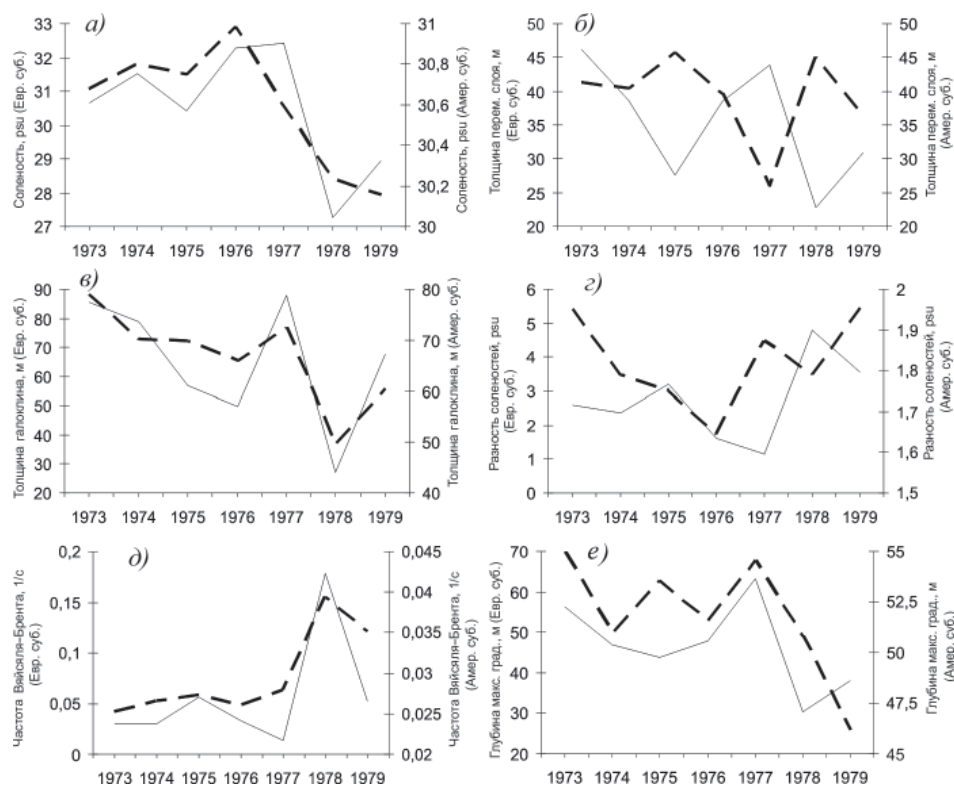


Рис. 6. Межгодовая изменчивость средних по суббассейнам параметров поверхностного слоя (сплошная линия – в Евразийском суббассейне, прерывистая – в Амеразийском): *a* – средней солёности перемешанного слоя, psu; *б* – толщины перемешанного слоя, м; *в* – толщины галоклина, м; *г* – разности солёностей на нижней и верхней границах галоклина, psu; *д* – частот Вайсяля–Брента, s^{-1} ; *е* – глубины залегания максимального градиента солёности, м.

солёности в галоклине связь с солёностью атлантических вод получилась обратная, и коэффициент корреляции равен $r = -0,67$. Механизм влияния атлантических вод на параметры поверхностного слоя очевиден. Аномалия солёности атлантических вод, поступивших в Норвежское море через Фареро-Шетландский пролив, через 7–8 лет сформирует аномалию солёности в Евразийском суббассейне. Увеличение солёности атлантических вод сопровождается увеличением потока соли к поверхностному слою, повышением средней солёности поверхностного слоя и уменьшением разницы солёностей на нижней и верхней границах галоклина. В то время как уменьшение солёности атлантических вод сопровождается уменьшением солёности поверхностного слоя и увеличением скачка солёности в галоклине.

Изменения солёности в Евразийском суббассейне зависят также от предшествующих метеорологических процессов. По нашей оценке, значимый коэффициент корреляции между вариациями средней солёности и среднегодовым индексом атмосферной циркуляции АО (арктическое колебание) со сдвигом в 1 год получился равным $r = 0,8$. Это означает, что в период преобладания антициклонического типа атмосферной циркуляции, когда ось трансарктического дрейфа смещается на запад

от хребта Ломоносова, в Евразийском суббассейне отмечается уменьшение солёности поверхностного слоя [Gudkovich et al., 2004]. При циклоническом типе атмосферной циркуляции наблюдается обратная ситуация.

В Амеразийском суббассейне поверхностный слой непосредственно подстилают тихоокеанские воды и промежуточные воды шельфового происхождения. Нами установлена связь между средней солёностью перемешанного слоя и потоком соли через Берингов пролив. При трехлетнем сдвиге коэффициент корреляции оказался равным $r = 0,57$. Временной сдвиг показывает, что аномалия соли, прошедшая через пролив, через три года изменит солёность на значительной части Амеразийского суббассейна.

Межгодовая изменчивость средней солёности и толщины галоклина оказались зависящими от речного стока из морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Большие значения коэффициентов корреляции (более 0,8 по модулю) были получены при временном сдвиге 4 года, время, по-видимому, достаточное для того, чтобы опресненные воды из морей достигли АБ и были вовлечены в антициклонический круговорот.

Оценка косвенного влияния объема пресной воды, поступающей в поверхностный слой в результате таяния льда, осуществлялась путем корреляции средней солёности перемешанного слоя с величиной площади открытой воды в арктических морях в сентябре. В результате большой отрицательный коэффициент корреляции ($r = -0,73$) был получен между изменчивостью средней солёности перемешанного слоя Амеразийского суббассейна и площади чистой воды в Чукотском море. Таким образом, увеличение таяния льда, пропорциональное площади открытой воды, сопровождается уменьшением солёности поверхностного слоя в следующий зимний период.

Вариации средней толщины перемешанного слоя в Евразийском суббассейне оказались связанными с величиной средней солёности, коэффициент корреляции с которой равен $r = 0,78$. Механизм этого процесса таков. Увеличение солёности поверхностных вод сопровождается уменьшением числа Вьясяля–Брента (рис. 6д) за счет уменьшения градиента солёности в галоклине, что способствует интенсификации процесса диффузии соли и увеличению толщины поверхностного слоя.

Средняя толщина перемешанного слоя Евразийского суббассейна зависит также от типа атмосферной циркуляции, моделируемого индексом АО. Коэффициент корреляции со среднегодовым значением индекса АО при временном сдвиге в 1 год равен $r = 0,68$. Это означает, что при доминанте циклонического типа атмосферной циркуляции средняя толщина слоя увеличивается, а в период влияния антициклонического типа атмосферной циркуляции – уменьшается. Ранее на эту закономерность обратили внимание Е.Г.Никифоров и А.О.Шпайхер [1980].

В отличие от Евразийского суббассейна в Амеразийском суббассейне толщина перемешанного слоя зависит от других параметров. Она тесно связана с типом атмосферной циркуляции, моделируемым индексом PNA (Pacific North American-like, PNA, [Overland, Wang, 2011]), осредненным за июль–сентябрь предшествующего года. Коэффициент корреляции равен $r = -0,95$. На толщину перемешанного слоя Амеразийского суббассейна оказывает существенное влияние расход вод через Берингов пролив. Коэффициент корреляции равен $r = 0,82$ при временном сдвиге 3 года. В силу различия факторов, влияющих на формирование толщины слоя в обоих суббассейнах, межгодовые изменения этого параметра в Евразийском суббассейне не совпадают с таковыми в Амеразийском суббассейне (рис. 6б).

Изменчивость чисел Вайсяля–Брента в обоих суббассейнах в значительной степени зависит от средней солёности перемешанного слоя. Чем выше средняя солёность перемешанного слоя, тем меньше градиент солёности с подстилающими водами (атлантическими или тихоокеанскими), что приводит к ослаблению устойчивости в слое скачка солёности и, соответственно, уменьшению чисел Вайсяля–Брента. В Евразийском суббассейне этот процесс сопровождается также увеличением толщины перемешанного слоя и заглублением максимального градиента солёности.

В Амеразийском суббассейне механизм изменчивости глубины залегания максимального градиента солёности несколько другой. На основе корреляционного анализа можно предположить следующую цепочку взаимосвязей: увеличение расхода через Берингов пролив через 3 года приводит к увеличению толщины перемешанного слоя, что, в свою очередь, еще через два года способствует заглублению горизонта максимального градиента солёности. Коэффициент корреляции между расходом через Берингов пролив и глубиной залегания максимального градиента солёности с временным сдвигом 5 лет равен $r = 0,81$.

В статистических расчетах использовался 5-процентный уровень значимости. Это означает, что при данной длине выборки все коэффициенты корреляции, превышающие по модулю величину 0,75, являются статистически значимыми с вероятностью 95 %. Наличие довольно тесных связей между изменчивостью параметров поверхностного слоя и индексами атмосферной циркуляции и другими факторами представляется нам убедительным, даже несмотря на малую длину выборки, поскольку величины коэффициентов корреляции довольно высоки.

ВЫВОДЫ

1. Пространственное распределение параметров поверхностного слоя и галоклина на акватории АБ отличается большим разнообразием. Величина толщины перемешанного слоя растет от евразийского к канадскому материковому склону, изменяясь почти в два раза. Средняя солёность перемешанного слоя в АБ изменяется, уменьшаясь с запада на восток от котловины Нансена к Канадской котловине более чем на 2 ‰. Зона наибольшей изменчивости солёности, где амплитуда межгодовых колебаний достигала 1,8 ‰, в 1973–1979 гг. была вытянута вдоль хребта Ломоносова.

2. В галоклине минимальные значения разности солёностей на нижней и верхней границах галоклина наблюдаются в районе севернее Шпицбергена и Земли Франца-Иосифа. Далее на восток разница солёностей увеличивается, поскольку влияние атлантических вод ослабевает, но возрастает влияние распреснения поверхностного слоя за счет стока рек. В целом пространственное распределение частот Вайсяля–Брента повторяет распределение разностей солёности на границах галоклина. Пространственное распределение толщины галоклина сопряжено с распределением толщины перемешанного слоя.

3. Амплитуда изменчивости параметров поверхностного слоя в Евразийском суббассейне значительно больше таковой для Амеразийского суббассейна, за исключением толщины перемешанного слоя, которая в обоих суббассейнах меняется с одинаковой амплитудой, но в противофазе.

4. Статистический анализ показал зависимость параметров поверхностного слоя и галоклина от типа атмосферной циркуляции, интенсивности потока атлантических и тихоокеанских вод в АБ, таяния льда и речного стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Гарманов А.Л., Колтышев А.Е., Никифоров Е.Г., Тимохов Л.А., Морисон Дж. Верхний перемешанный слой в Арктическом бассейне // Тр. ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 149–189.
- Лебедев Н.В., Тимохов Л.А., Нитишинский М.А. Параметрическая модель вертикальных профилей (оценки толщины верхнего перемешанного слоя по данным наблюдений на стандартных горизонтах) // Тр. ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 242–247.
- Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 296 с.
- Никифоров Е.Г. Стеродинамическая система Северного Ледовитого океана. СПб.: ААНИИ, 2006. 174 с.
- Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
- Тимохов Л.А., Чернявская Е.А., Никифоров Е.Г. и др. Пространственно-временная изменчивость зимней солености воды в слое 5–50 м Арктического бассейна // Проблемы Арктики и антарктики. 2011. № 3 (89). С. 5–19.
- Трешиников А.Ф. Поверхностные воды в Арктическом бассейне // Проблемы Арктики. 1959. № 7. С. 5–14.
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Радионов В.Ф. и др. Научные исследования в Арктике. Научно-исследовательские дрейфующие станции «Северный полюс». Т. 1. СПб.: Наука, 2005. 267 с.
- Ширишов П.П. Научные результаты дрейфа станции «Северный полюс» // Общее собрание АН СССР 14–17 февраля 1944 г. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1944. С. 110–140.
- Gudkovich Z.M., Proshutinsky A.Yu., Timokhov L.A., Koltyshev A.E., Garmanov A.L. Climatic salinity changes of the surface layer of the Arctic Ocean // ACSYS Final Science Conference, St. Petersburg, Russia, 11–14 November, 2003. WCRP-118 (CD), WMO/TD No. 1232. September 2004. 3 p.
- Overland J.E., Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice // Tellus. 2010. Vol. 62A. P. 1–9.

E.A.CHERNYAVSKAYA, L.A.TIMOKHOV

CHARACTERISTICS OF THE ARCTIC OCEAN SURFACE LAYER AND UNDERLYING HALOCLINE IN WINTER (ACCORDING TO THE 1973–1979 PERIOD)

The paper presents the results of calculations of the mixed layer thickness, depth of maximum salinity gradient and halocline thickness obtained using the most comprehensive oceanographic data base for 1973–1979. The features of the spatial and interannual variability of the surface layer characteristics and underlying halocline in the Arctic Ocean in winter (thickness of the mixed layer, the mean salinity of the mixed layer, the mean Brunt-Väisälä frequency in the layer of halocline, halocline thickness and salinity differences at the upper and lower boundaries of the halocline) are investigated. Analysis of the surface layer state and the halocline showed that interannual variability of the surface layer parameters in the Eurasian basin determined mainly by influence of the Atlantic water and atmospheric circulation. The main factors that determine the variability of the Canadian basin surface layer are the atmospheric processes, the Pacific water inflow through the Bering Strait, ice melting and river runoff in the Laptev sea and the East Siberian sea.

Keywords: Arctic Ocean, mixed layer, halocline, modeling.