

УДК [551.465.11+551.465.7](265.53)

РОЛЬ РЕГИОНАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ И РАЗВИТИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР В РАЙОНЕ ПРОЛИВОВ, ОМЫВАЮЩИХ ОСТРОВ УРУП (КУРИЛЬСКАЯ ОСТРОВНАЯ СИСТЕМА)

Г.А. Власова

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного
отделения РАН, gavlvasova@mail.ru

На основе численного моделирования показана роль региональных атмосферных процессов в формировании структуры течений в районе о. Уруп под воздействием северо-западного ветра за период 1949—1994 гг. Сделан вывод о том, что характер изменчивости гидродинамических и атмосферных процессов хорошо коррелируется по сезонам: максимум этих процессов приходится на осенне-зимний период, минимум — на весенне-летний. Выявленный двухмесячный фазовый сдвиг динамики сравниваемых процессов может быть объяснен существованием порога возникновения зависимости формирования гидродинамических структур от силы ветрового воздействия, а также различием инерционной сохранности сформированных водных и воздушных масс.

Ключевые слова: Курильские острова, остров Уруп, атмосферные процессы, циркуляция вод.

THE ROLE OF REGIONAL ATMOSPHERIC PROCESSES IN THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF HYDRODYNAMIC STRUCTURES IN REGION OF THE STRAITS SURROUNDING URUP ISLAND (KURIL ISLAND SYSTEM)

G.A. Vlasova

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch RAS

The role of regional atmospheric processes in formation of the structure of current in the region of Urup Island (the Kuril Islands System) under of influence north-western wind for period 1949—1994 was shown on the basis of numerical modeling. It is concluded that the nature of the variability of the hydrodynamic and atmospheric processes are well correlated to seasonal: its maximum falls on the autumn-winter period, the minimum at the spring-summer period. The revealed two-month phase shift of the dynamics of the compared processes can be explained by the existence of a threshold of occurrence of the dependence of the formation of hydrodynamic structures on the force of the wind effect, as well as the difference in inertial keeping of the formed water and air masses.

Keywords: Kuril Islands, Urup Island, atmospheric processes, water circulation.

Введение

Данная статья является продолжением серии авторских публикаций, посвященных исследованию влияния региональной атмосферной циркуляции на гидродинамические процессы в пределах Курильской островной системы [5—9].

В результате предшествующих исследований были получены следующие результаты:

1) показано, что в приостровном районе Курильской глубоководной котловины независимо от региональных типов атмосферной циркуляции на поверхности наблюдается квазистационарная дипольная система охотоморских течений (циклонические и антициклонические структуры); установлена четкая корреляция пространственной ориентации движения водных и воздушных масс [5];

2) охарактеризован сезонный водообмен в проливах Южных и Северных Курил за период 1949—1994 гг. [7, 8];

3) выявлено, что на акватории Южных Курил за период 1949—2010 гг. антициклонические структуры в слое 0—200 м занимают гораздо большую площадь, но выражены слабее, чем на поверхности [6];

4) описана сезонная изменчивость течения Ойясио и показана квазиустойчивость Курильского течения за период 1949—2010 гг.; исследована антициклоническая циркуляция вод в районе о. Уруп под воздействием региональных атмосферных процессов за период 1949—2010 гг. [9].

Целью настоящей работы является получение полной картины циркуляции вод в районе о. Уруп, включая условия формирования и развития циклонических структур под влиянием превалирующих здесь региональных атмосферных процессов.

Гидрофизические процессы в этом районе, в частности интенсивный водообмен между Охотским морем и Тихим океаном через расположенные здесь глубоководные проливы Буссоль, Фриза и Уруп, оказывают существенное влияние на климат и общий гидродинамический режим близлежащего региона. Этому также способствует активная сезонная изменчивость атмосферных процессов, и прежде всего ветрового фактора. Первичным источником ветрового режима здесь является своеобразное сезонное распределение региональных барических центров. Роль ветрового фактора усиливается значительной протяженностью Курильской островной гряды, деформирующей потоки воздушных масс на границе Охотского моря с прилегающей частью Тихого океана и обуславливающей существенную неоднородность погодных условий.

Своеобразие местного климата выражается в том, что рассматриваемая акватория находится на границе двух климатических зон: умеренно муссонной и субарктической. Так, на юге, в условиях теплого течения Соя, пролив Фриза располагается в умеренно муссонной зоне, а северные проливы — Буссоль и Уруп — находятся под влиянием холодного Курильского течения и Охотского моря. В связи с этим климат здесь может быть отнесен к субарктическому [1].

Публикаций по исследованию непосредственно Курильских проливов и районов, омывающих Курильский архипелаг, недостаточно. К основополагающим работам, посвященным этому району, можно отнести выполненные в конце 1960-х годов исследования Т.И. Супранович [20]. Ею достаточно полно обобщены инструментальные данные о течениях района Курильской островной дуги за период 1949—1977 гг. (в основном касающиеся летнего сезона и слоя 0—500 м).

В 1998 г. вышла монография «Гидрометеорология и гидрохимия морей» [10], в которой на основании инструментальных данных, полученных для зимнего сезона в слое до глубины 1200 м, в проливах Крузенштерна и Буссоль была выявлена перестройка движения вод с глубиной.

В 2000 и 2004 гг. были опубликованы две монографии К.Т. Богданова и др. [2, 3], где авторами на основе материалов своих предшествующих исследований были описаны водные массы отдельных проливов и прилегающих к ним акваторий.

В 2009 г. был опубликован Атлас Курильских островов [1], дающий общие представления о структуре и динамике вод этого региона.

К сожалению, результаты указанных работ имеют отрывочный или очень обобщенный характер, что не позволяет рассматривать их как полноценный источник информации для выполнения серьезного анализа и обобщения в области циркуляции вод. В силу того, что и в настоящее время натурных экспериментов в районе Курил в достаточном объеме не проводится, становится очевидной необходимость использования численного моделирования. В настоящей работе приводятся основные результаты такого моделирования, выполненного автором.

Расположение района исследований показано на рис. 1. Выбранный район включает в себя приостровную шельфовую зону, часть Курильской котловины с глубиной более 3000 м и часть Курило-Камчатского желоба с глубиной свыше 6000 м.

Известно, что атмосферная циркуляция является доминирующим фактором в формировании поверхностных течений в океане. В связи с этим правильное понимание причин и механизмов формирования гидрофизических процессов невозможно без знания их связи с динамикой воздушных масс. Однако изучение этой связи затрудняется значительной изменчивостью синоптических процессов.

В этой ситуации существенную помощь может оказать использование принципа региональной типизации атмосферных процессов. Для выполнения исследований в рамках такой методики необходимо использовать тип атмосферных процессов, разработанный для условий изучаемого района.

К наиболее ранним работам, посвященным типизации атмосферных процессов на Дальнем Востоке, можно отнести работы О.К. Ильинского [14] и А.И. Соркиной [18]. Ильинский осуществил опыт выделения основных форм циркуляции атмосферы над ДВ исходя из необходимости построения единой системы атмосферной циркуляции над указанным регионом. Соркина исследовала северную часть Тихого океана, но не учитывала окраинные моря и прибрежную зону.

В.С. Калачиковой и Е.В. Николаевой установлены типы синоптических процессов для Северного полушария с целью разработки прогнозов погоды [15].

С.Ю. Глебовой выделены атмосферные типы над дальневосточными морями за период 2000—2004 гг. по сезонам: тепломu и холодному [11—13].

К сожалению, результаты указанных работ не могут быть использованы для нашей цели, поскольку либо объекты их изучения были далеки от рассматриваемого района, либо авторы использовали недостаточно длительный период времени, необходимый для получения адекватных результатов.

В настоящей работе использовалась типизация атмосферных процессов над северной частью акватории Тихого океана (5—70° с.ш., 130° в.д. — 130° з.д.),

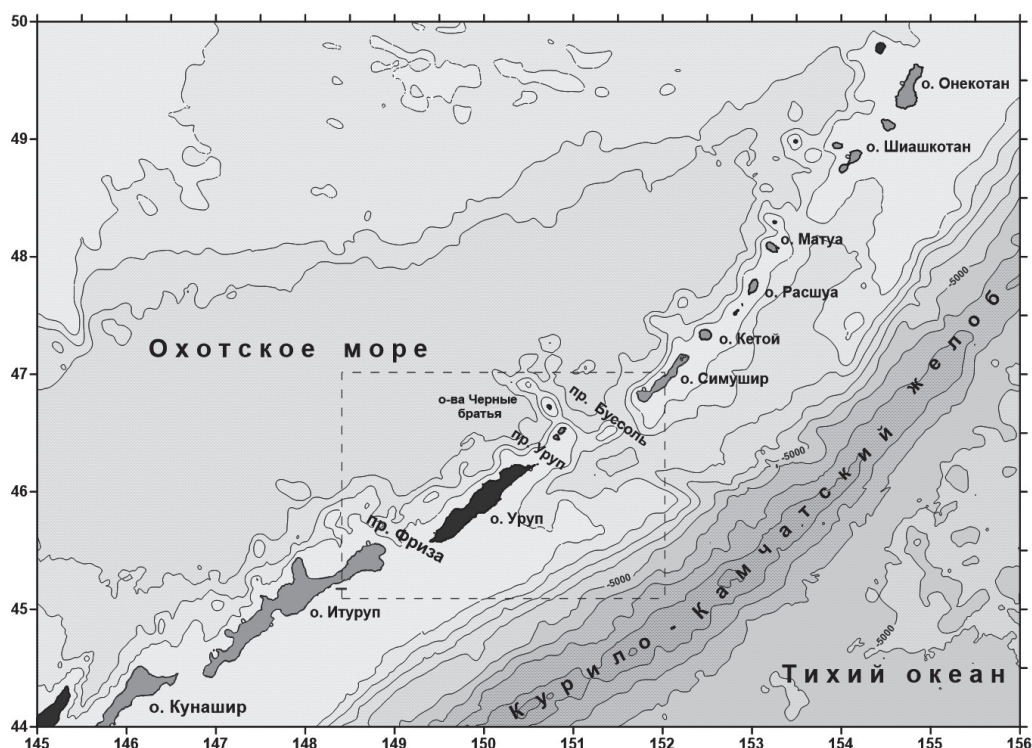


Рис. 1. Расположение исследуемого района в Курильской островодужной системе.

Прямоугольником выделен район исследований.

заимствованная из работы А.М. Поляковой [16]. В основу этой типизации положены географическое положение основных траекторий циклонов и антициклонов, направление перемещения воздушных масс и их общие характеристики (влажные или сухие, теплые или холодные, континентальные или морские). В результате автором указанной работы было выделено шесть типов атмосферной циркуляции.

Для выбора оптимального типа мы взяли так называемый северо-западный, поскольку он преобладает над северо-западной частью Тихого океана и проявляется в течение всего года (рис. 2).

При северо-западном ветре наиболее активная динамика воздушных масс наблюдается в регионе Японских островов и Охотского моря. При этом вблизи Японских островов и восточнее в океане превалирует циклоническая деятельность, а для северной половины Охотского моря характерно поле высокого давления и антициклоническое движение воздушных масс. Этот тип атмосферной циркуляции сохраняется в целом в течение всего года, однако имеет ярко выраженный сезонный ход: зимой и осенью его интенсивность высокая, а весной и летом — низкая.

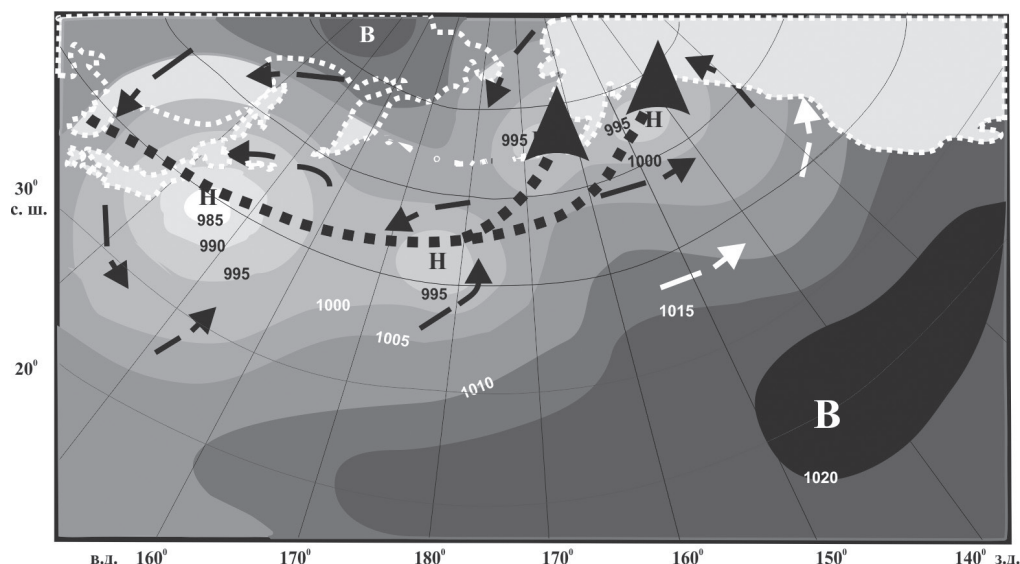


Рис. 2. Северо-западный тип атмосферной циркуляции [16].

Исходные данные и методика исследования

Для реализации указанной цели использовалась упрощенная квазистационарная бароклинная модель, идею создания которой высказал еще В.Б. Штокман [23] и которую затем разработали и усовершенствовали А.И. Фельзенбаум [21], Н.Б. Шапиро [22] и А.С. Васильев [4, 17]. Указанная модель учитывает как односвязную (море или океан), так и двухсвязную (море — пролив — океан) область. В рамках этой модели рассчитывались функции тока (скалярная функция координат и времени, пропорциональная расходу жидкости между поверхностями тока) в верхнем квазиоднородном слое. При этом учитывались: вертикальное распределение плотности водной толщи, рельеф дна и атмосферная циркуляция над исследуемой акваторией.

На жидких границах поверхности при $z = 0$ задавались T_0 , S_0 , P , где z — вертикальная составляющая (координата, направленная вертикально вниз), T_0 — температура воды на поверхности, S_0 — соленость воды на поверхности, P — атмосферное давление в узлах расчетной сетки, характерное для местных атмосферных ситуаций. По полю атмосферного давления рассчитывалось напряжение трения ветра. Поле плотности на поверхности моря рассчитывалось по заданным значениям температуры и солености. На дне при $z = H$ принимались условия прилипания, т.е. скорость течений на дне $U = V = W = 0$, где U , V , W — составляющие течений по осям x , y , z .

Для изучения связи формирования и развития гидродинамических структур с атмосферными процессами были выбраны метеорологические сезоны. Численные эксперименты выполнялись для всех сезонов периода, охватываемого имеющимися экспедиционными данными (1949—1994 гг.).

Для численных экспериментов использовались следующие исходные данные:

1) результаты типизации атмосферных ситуаций в рассматриваемом регионе за период с 1949 по 2010 г., представленные в работе [16] (в соответствии с данной работой использовался тип атмосферных процессов, получивший название «северо-западный», как наиболее часто повторяющийся в пределах изучаемой акватории; это существенно упростило последующий анализ);

2) база архивных данных глубоководных гидрологических наблюдений ТОИ ДВО РАН «Океан-1» за период 1927—1994 гг. (<http://pacificinfo.ru>);

3) массив батиметрических данных ЕТОРО-5 (<http://gcmd.nasa.gov>).

В рамках выбранной модели с использованием вышеуказанных исходных данных на равномерной сетке $5 \times 5'$ (9 км) была рассчитана циркуляция вод в поверхностном слое. Указанная расчетная сетка была выбрана, потому что исследуемый регион включает в себя не только приостровной шельф, где бароклинный радиус Россби составляет 2 км, но и глубоководный Курило-Камчатский желоб и глубоководную Курильскую котловину, где радиус Россби составляет 18—20 км [19].

Результаты и их обсуждение

По итогам численных расчетов построено 12 карт среднемесячной циркуляции поверхностных вод за период 1949—1994 гг. в условиях атмосферной циркуляции северо-западного типа. Анализ карт показывает, что данный район характеризуется достаточно сложной общей картиной течений с многообразным меандрированием и вихреобразованием. Однако на этом фоне удается выделить основные особенности сезонной изменчивости циркуляции вод. В качестве ее основных параметров мы рассматриваем изменчивость интенсивности ветра и циркуляции вод. За интенсивность ветра (введенный автором условный параметр, характеризующий степень активности атмосферных процессов) принимаются максимальные значения скорости ветра и продолжительность его действия, которые в совокупности выражены в условных единицах. В результате вычислялся так называемый нормированный индекс изменчивости атмосферных процессов. За единицу этого индекса принята максимальная для данного региона повторяемость синоптической ситуации. Максимум этого индекса приурочен к декабрю, его значения в остальные месяцы составляют долю от этого значения (рис. 3).

За интенсивность циркуляции вод принимаем максимальную величину разности функций тока водных масс между двумя рассматриваемыми поверхностями тока за единицу времени.

Ниже приводится посезонный анализ гидродинамической ситуации в районе исследований. Ограниченный объем статьи не позволяет представить все подготовленные нами карты, и поэтому для каждого сезона приводится только одна, наиболее показательная карта.

Зимний сезон (декабрь — февраль). Для этого периода наиболее показательным является декабрь (рис. 4). Из рисунка видно, что в этом месяце формируются два достаточно крупных и вытянутых в широтном направлении антициклонических круговорота в районах 47° и 46° — $46^\circ 30'$ с.ш. На всей остальной акватории

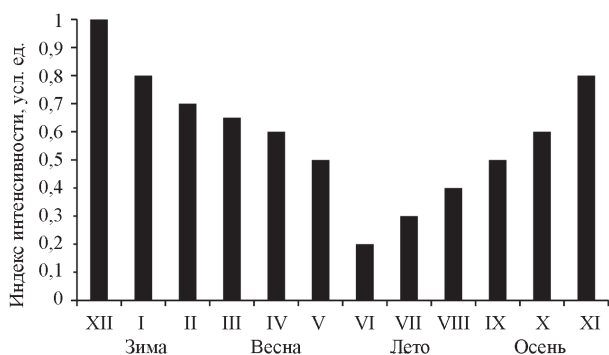


Рис. 3. Нормированный индекс сезонной изменчивости атмосферных процессов северо-западного типа.

наблюдаются более мелкие гидродинамические круговороты и вихри, как циклонические, так и антициклонические. Максимальные значения разности функций тока равны $2,1 \cdot 10^7$ см³/с. В остальные зимние месяцы происходит постепенное разрушение крупных круговоротов и снижение интенсивности гидродинамических структур. Так, в январе значения разности функций тока уменьшаются до $5 \cdot 10^6$ см³/с, а в феврале они близки к уровню минимума и составляют $4,2 \cdot 10^4$ см³/с.

В целом основная часть зимнего периода (декабрь — январь) характеризуется высокой интенсивностью циркуляции вод, что хорошо коррелирует с высокой интенсивностью северо-западного ветра в это время. В феврале интенсивность гидродинамических образований резко уменьшается, достигает годового минимума и сохраняется на низком уровне вплоть до апреля.

Весенний сезон (март — май). Характерным месяцем для этого сезона является март (см. рис. 4). Структура течений в это время характеризуется слабо выраженными гидродинамическими круговоротами и локальными вихрями. Интенсивность циркуляции вод в марте — апреле низкая, что напрямую связано с понижающейся интенсивностью ветра северо-западного направления в этот период. Значения разности функций тока в марте и апреле находятся на минимальном уровне и равны $3,4 \cdot 10^4$ см³/с. Однако в мае гидродинамические процессы начинают активизироваться и значения повышаются до $2,6 \cdot 10^6$ см³/с.

В целом весенний период (март — апрель) характеризуется низкой интенсивностью гидродинамических процессов. Помимо ослабления северо-западных ветров, немаловажную роль при этом играют процессы разрушения ледяного покрова и, соответственно, процессы перемешивания поверхностных вод. В конце весны происходит некоторое повышение гидродинамической активности.

Летний сезон (июнь — август) иллюстрируется картой циркуляции вод в июле (см. рис. 4). Летом начинает повышаться интенсивность атмосферных процессов, отнесенных к типу «северо-западный». В соответствии с этим от июня к августу постепенно возрастает и интенсивность гидродинамических процессов. Тем не менее структура течений в этот период по-прежнему изменяется мало. Значения

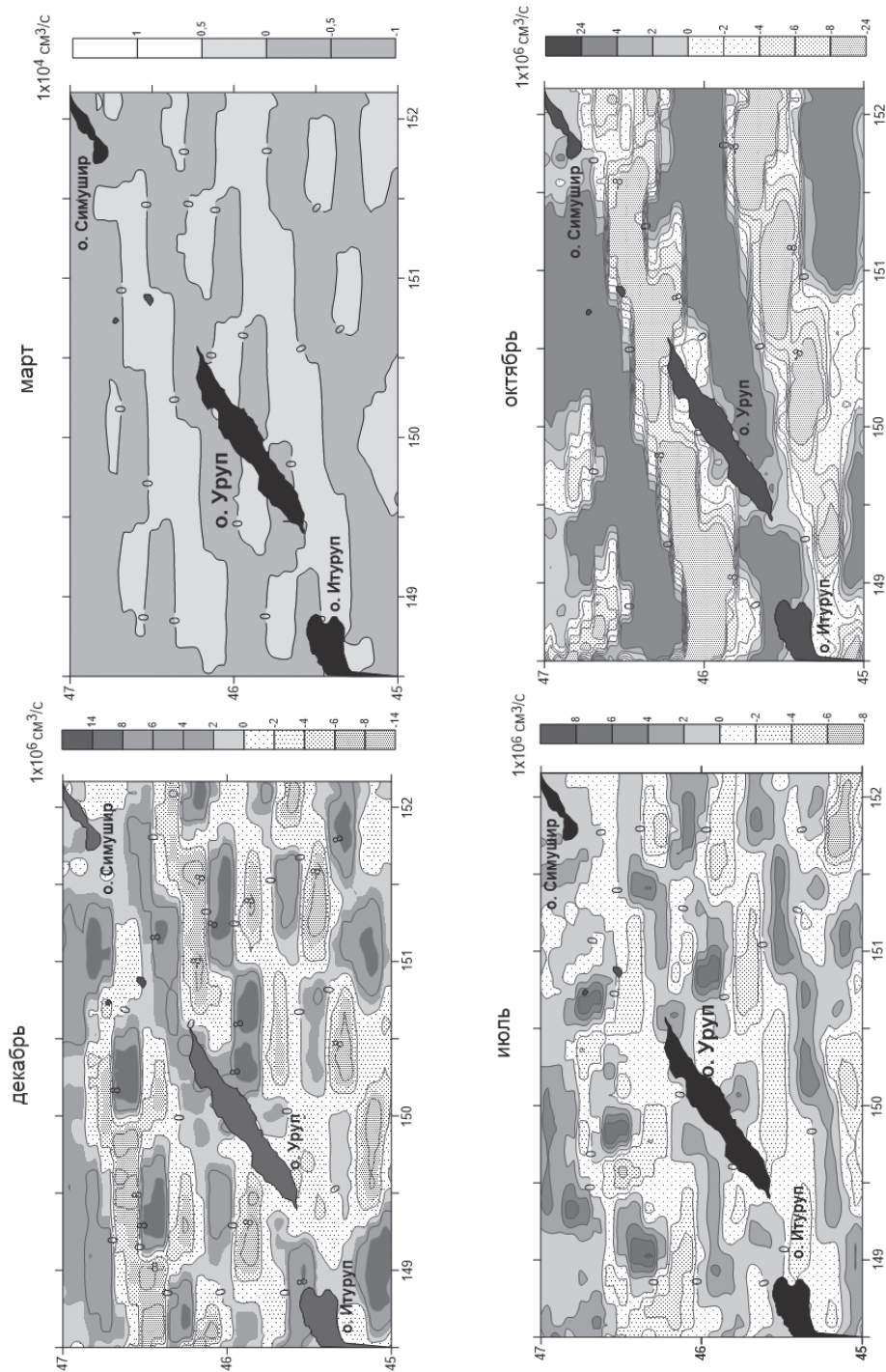


Рис. 4. Циркуляция поверхностных вод в условиях ветра северо-западного направления.

разности функций тока в июне равны $6,6 \cdot 10^6$ см³/с, в июле — $1,1 \cdot 10^7$ см³/с, в августе — $1,5 \cdot 10^7$ см³/с.

Таким образом, летний период характеризуется постепенным усилением северо-западного ветра, что влечет за собой повышение активности гидродинамических структур.

Осенний сезон (сентябрь — ноябрь). Самым характерным месяцем этого сезона и даже года является октябрь (см. рис. 4). В это время в связи со значительным усилением северо-западного ветра формируются и достигают своего максимального развития три антициклонических круговорота. Они располагаются в пределах Охотского моря на севере исследуемой области в районе $46^\circ 15' — 47^\circ$ с.ш., $148^\circ — 151^\circ 30'$ в.д. и со стороны Тихого океана в районах $45^\circ 20' — 46^\circ$ с.ш., $149^\circ 40' — 152^\circ$ в.д. и $45^\circ — 45^\circ 30'$ с.ш., $151 — 152^\circ$ в.д. Их разделяют два циклонических круговорота. Один из них протягивается из Охотского моря через Курильский архипелаг между островами Уруп и Симушир в Тихий океан (приблизительно $45^\circ 40' — 46^\circ 15'$ с.ш., $148^\circ — 151^\circ 40'$ в.д.). Второй располагается южнее, в пределах Тихого океана, протянувшись от о. Итуруп в открытый океан (приблизительно $45^\circ — 45^\circ 30'$ с.ш., $148^\circ — 152^\circ$ в.д.). Значения разности функций тока в октябре максимальны для всего года и составляют $2,7 \cdot 10^7$ см³/с. В остальные месяцы этого сезона указанные величины заметно уменьшаются и составляют в сентябре $1,6 \cdot 10^7$ см³/с, а в ноябре $2,3 \cdot 10^7$ см³/с, хотя картина течений остается практически неизменной.

Таким образом, осень — апогей активности гидродинамических структур, что хорошо коррелирует с высокой интенсивностью северо-западного ветра в указанный период.

Все вышеизложенное в обобщенном виде хорошо иллюстрируется сопоставлением графиков сезонной изменчивости гидродинамических и атмосферных процессов, в качестве показателя которых мы выбрали максимум разности функций тока как определителя расходов воды в единицу времени, и интенсивность ветров северо-западного направления (рис. 5).

Рисунок демонстрирует общее сходство этих графиков. Так, в обоих случаях максимум интенсивности гидродинамических процессов и интенсивности ветров северо-западного направления приходится на осенне-зимний период. К весне интенсивность и тех, и других уменьшается. Однако далее наблюдаются заметные различия. Так, минимум интенсивности гидродинамических процессов приходится на период конец зимы (февраль) — большая часть весны (март, апрель), когда в данном регионе все еще преобладает северо-западный ветер, составляя 60—70 % от своего осенне-зимнего максимума. Лишь в июне ветер северо-западного направления ослабевает, достигая своего минимума (см. рис. 5 б), тогда как активность гидродинамических процессов к этому времени уже переходит через минимум и начинает повышаться. Далее тренд развития обоих процессов совпадает: их интенсивность возрастает по мере приближения к осенне-зимнему сезону.

В целом, несмотря на отмеченный двухмесячный фазовый сдвиг динамики сравниваемых процессов в период окончания весны — начала лета, мы видим

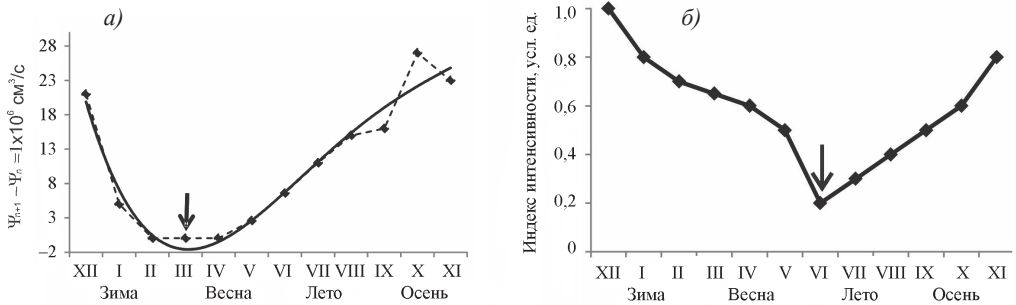


Рис. 5. Сезонная изменчивость максимальных значений разности функций тока при ветре северо-западного направления (а) и нормированный индекс сезонной интенсивности северо-западного ветра (б).

общую корреляцию гидродинамических и синоптических процессов в рассматриваемом районе. Такая корреляция, на наш взгляд, может быть свидетельством их взаимосвязи: формирование и сезонная изменчивость гидродинамических структур находятся под значительным воздействием ветрового режима, отнесенного к типу «северо-западный».

Существование упомянутого фазового сдвига, по мнению автора, может объясняться двумя факторами: наличием порога возникновения рассматриваемой зависимости и различием инерционного сохранения сформированных водных и воздушных структур. В первом случае ветер начинает оказывать влияние на формирование водных структур, по-видимому, при некотором достаточно высоком уровне силы ветра. При более слабом ветре его воздействие на водные массы еще не способно привести к существенному изменению гидродинамики района. Во втором случае сформированные гидродинамические структуры, обладая достаточно большой инерционной массой, должны сохраняться в течение еще некоторого времени после прекращения ветрового воздействия.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что на формирование гидродинамических структур в районе о. Уруп существенное влияние могут оказывать атмосферные процессы, среди которых превалирует ветер северо-западного направления. В целом характер изменчивости гидродинамических и атмосферных процессов хорошо коррелируется по сезонам: их максимум приходится на осенне-зимний период, минимум — на весенне-летний. Выявленный двухмесячный фазовый сдвиг динамики сравниваемых процессов может быть объяснен существованием порога возникновения зависимости формирования гидродинамических структур от силы ветрового воздействия, а также различием инерционного сохранения сформированных водных и воздушных структур.

Список литературы

1. Атлас Курильских островов. М., Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. 516 с.
2. Богданов К.Т., Мороз В.В. Структура, динамика и гидролого-акустические характеристики вод проливов Курильской гряды. Владивосток: Дальнаука, 2000. 152 с.
3. Богданов К.Т., Мороз В.В. Воды Курило-Камчатского течения и течения Ойясио. Владивосток: Дальнаука, 2004. 140 с.
4. Власова Г.А., Васильев А.С., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 2008. 359 с.
5. Власова Г.А. Влияние атмосферных процессов на гидродинамику прикурильского района Охотского моря // Вестник ДВО РАН. 2012. № 3. С. 28—31.
6. Власова Г.А. Сезонный гидродинамический режим вод в слое 0—200 м на акватории Южно-Курильской гряды // Естественные и технические науки. 2013. № 3. С. 152—156.
7. Власова Г.А., Деменок М.Н. Сезонная изменчивость циркуляции вод в верхнем квазиоднородном слое на акватории Южных Курил под влиянием синоптических процессов // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 90—100.
8. Власова Г.А., Деменок М.Н. Сезонная изменчивость циркуляции вод на акватории Северных Курил при «северо-западном» типе атмосферных процессов по результатам численного моделирования / В кн.: Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 116—130.
9. Власова Г.А., Деменок М.Н. Сезонная изменчивость антициклонической циркуляции поверхностных вод под влиянием синоптических процессов в районе острова Уруп // Вестник ДВО РАН. 2017. № 5. С. 150—157.
10. Гидрометеорология и гидрохимия морей. СПб: Гидрометеиздат. 1998. 342 с.
11. Глебова С.Ю. Изменения атмосферного и климатического режимов над дальневосточными морями в 2000—2004 гг. и предполагаемые их изменения на ближайшие годы // Рыбное хозяйство. 2005. № 3. С. 30—33.
12. Глебова С.Ю. Типы атмосферных процессов над дальневосточными морями, межгодовая изменчивость их повторяемости и сопряженность // Изв. ТИНРО. 2003. Т. 134. С. 209—257.
13. Глебова С.Ю. Типы синоптических ситуаций и связанных с ними погодных явлений над Охотским морем // Изв. ТИНРО. 1999. Т. 126. С. 572—586.
14. Ильинский О.К. Опыт выделения основных форм циркуляции атмосферы над Дальним Востоком // Труды ДВНИГМИ. 1965. Вып. 20. С. 26—45.
15. Калачикова В.С., Николаева Е.В. Календарь форм циркуляции и типов синоптических процессов над Восточной Азией за 1949—1979 гг. Владивосток, 1980. 50 с.
16. Полякова А.М. Календарь типов атмосферной циркуляции с учетом нестационарности над северной частью Тихого океана и их характеристика. Владивосток: изд-во ДВГУ, 1999. 114 с.
17. Полякова А.М., Власова Г.А., Васильев А.С. Влияние атмосферы на подстилающую поверхность и гидродинамические процессы Берингова моря. Владивосток: Дальнаука, 2002. 203 с.
18. Соркина А.И. Типы атмосферной циркуляции и связанных с ней ветровых полей над северной частью Тихого океана. М.: Гидрометеиздат, 1963. 248 с.
19. Степанов Д.В. Оценка бароклинного радиуса деформации Россби в Охотском море // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 83—89.
20. Супранович Т.И. Гидрология проливов Курильской островной дуги // Труды ДВНИИГМИ. 1969. Вып. 016. 240 с.
21. Фельзенбаум А.И. Динамика морских течений / В кн.: Гидродинамика. Итоги науки. Сер. Механика. М.: Изд-во ВИНТИ. 1970. С. 97—338.
22. Шапиро Н.Б. Аналитическое исследование связей между ветром и течением в экваториальной зоне океана // Доклады АН СССР. 1965. Т. 164, № 2. С. 319—322.
23. Штокман В.Б. Избранные труды по физике моря. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 335 с.