

УДК 551.465.5(265.53)

В.В. Коломейцев*

Камчатский филиал ВНИРО (КамчатНИРО),
683000, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, 18

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗАПАДНО-КАМЧАТСКОГО ТЕЧЕНИЯ ЗИМОЙ 1994–2019 ГГ. ПО АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Представлены среднеголетние схемы геострофического переноса вод на поверхности восточной части Охотского моря (район западной Камчатки) для зимних месяцев, построенные по данным спутниковых альтиметрических измерений. Впервые для этого района использован весь накопленный на настоящее время (1994–2019 гг.) объем альтиметрических данных о геострофических течениях. Анализируются вариации переноса поверхностных вод Западно-Камчатским течением по широте 54° с.ш. между 153° в.д. и побережьем Камчатки. Выделены зимы с мощным, нормальным и слабым течением. Поток был усиленным зимой 1996, 1997, 2009, 2010 и 2013 гг. и относительно слабым в зимний период 2002 и 2007 гг. Получены статистические зависимости температуры поверхности моря и ледовитости от изменчивости потока Западно-Камчатского течения отдельно по месяцам и в среднем для всего зимнего сезона. Выявлены значимые связи практически для всех месяцев зимнего сезона. Наибольшая доля потока Западно-Камчатского течения, объясняющая вариабельность этих характеристик, составила 33–36 %.

Ключевые слова: Охотское море, геострофическая циркуляция, Западно-Камчатское течение, спутниковые альтиметрические данные, ледовитость.

DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-412-426.

Kolomeytssev V.V. Variability of the West Kamchatka Current in winters of 1994–2019, by altimetry data // *Izv. TINRO*. — 2020. — Vol. 200, Iss. 2. — P. 412–426.

Averaged schemes of the geostrophic circulation on surface of the eastern Okhotsk Sea in winter months are plotted using the data of satellite altimetry measurements. Variations of the surface water transport by the West Kamchatka Current through the latitude of 54° N, between 153° E and the coast of Kamchatka, are analyzed. The current was strengthened in the winters of 1996, 1997, 2009, 2010, and 2013; it was relatively weak in the winters of 2002, and 2007. Statistical dependences of the sea surface temperature and ice cover on the West-Kamchatka Current intensity are calculated for entire winter season and by months; they are statistically significant for all winter months. The West Kamchatka Current variation determines up to 33–36 % of these indices variability.

Key words: Okhotsk Sea, geostrophic circulation, West Kamchatka Current, satellite altimetry data, ice cover.

Введение

Восточная часть Охотского моря имеет большое значение в экономическом развитии как Камчатского края, так и Дальневосточного региона в целом. В настоящее

* Коломейцев Владимир Викторович, ведущий специалист, e-mail: kolomeytssev.v.v@kamniro.ru.

Kolomeytssev Vladimir V., leading researcher, Kamchatka branch of VNIRO (KamchatNIRO), Naberezhnaya, 18, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000, Russia, e-mail: kolomeytssev.v.v@kamniro.ru.

время по-прежнему главным направлением хозяйственной деятельности здесь является промысел биологических ресурсов — лососей, минтая, трески, камчатского краба и многих других ценных видов рыб и беспозвоночных. Кроме того, в последние годы особый интерес этот район представляет и для нефтегазодобывающей отрасли. Любое направление хозяйственной деятельности нуждается в решении большого комплекса природоохранных проблем, в том числе путем научных изысканий, включая исследование гидрологических условий и их пространственно-временной изменчивости.

Роль течений в формировании гидрологического режима чрезвычайно велика. В частности, они влияют на распределение термохалинных и гидрохимических характеристик, так как переносят на огромные расстояния колоссальные запасы воды, тепла, солей и т.д. Также они могут служить транспортной артерией загрязняющих веществ в случае их попадания в окружающую среду. Течения оказывают большое влияние на живые организмы как через изменения свойств среды, так и непосредственно, перенося сами организмы или являясь ориентиром при их миграциях [Левасту, Хела, 1974; Берникова, 1980; Варкентин и др., 2001].

Существующие представления о течениях в Охотском море получены главным образом на основе расчетных методов по данным измерений температуры и солености [Чернявский, 1981; Лучин, 1987, 1998; Верхунов, 1997; Дарницкий, Лучин, 1997; Фигуркин, 2003; Жигалов, 2012]. Основные различия в полученных схемах течений связаны с объемом использованных гидрологических данных, модификацией применяемого метода расчетов и пространственно-временными масштабами осреднения. С развитием спутниковой альтиметрии началась новая эпоха исследований динамики вод моря, что в последующем, безусловно, позволит уточнить известную схему циркуляции вод, а также более детально исследовать внутри- и межгодовую изменчивость.

Главной особенностью циркуляционной системы Охотского моря является общее циклоническое движение вод вдоль границ всего бассейна (рис. 1) [Лучин, 1998]. На фоне общего круговорота в различных районах моря прослеживаются локальные области с антициклонической и циклонической циркуляцией, занимающие обширные участки акватории, и вихревые образования более мелкого масштаба. К областям с устойчивой антициклонической циркуляцией относятся круговороты, расположенные над впадиной ТИНРО, к западу от южной оконечности Камчатки и в районе Курильской котловины. Относительно устойчивые звенья общего круговорота вод Охотского моря получили названия самостоятельных течений с соответствующей географической привязкой. На востоке Охотского моря таким звеном являются Западно-Камчатское (на схеме отмечено как Камчатское течение) течение (ЗКТ). Вдоль берега западной Камчатки исследователи отмечают течение южного направления (Компенсационное течение, КТ), при этом они сообщают о непостоянстве его существования [Помазанова, 1970; Чернявский, 1981; Лучин, 1987, 1998; Фигуркин, 1997; Самко и др., 2004]. Их мнения на счет причин формирования течения разделяются: одни утверждают, что оно обусловлено самой компенсационной природой этого переноса, другие связывают его с суровостью зимнего периода или с сезонной изменчивостью атмосферной циркуляции.

Циркуляция вод на востоке Охотского моря претерпевает значительные изменения от сезона к сезону [Лучин, 1998; Жигалов, 2012]. В частности, исследователи отмечают увеличение скорости течений осенью и достижение наибольших значений зимой. При этом в прибрежной полосе у западной Камчатки на свободных ото льда участках в основном наблюдаются течения южного и юго-западного направлений. На фоне общей циклонической циркуляции вод на поверхности моря прослеживаются более мелкие элементы — квазистационарные вихревые образования и меандры течений. При обычных синоптических ситуациях скорость Западно-Камчатского течения на поверхности оценивается в 10–15 см/с, в то время как на горизонте 100 м ее оценочные значения в 2–3 раза меньше [Лучин, 1998].

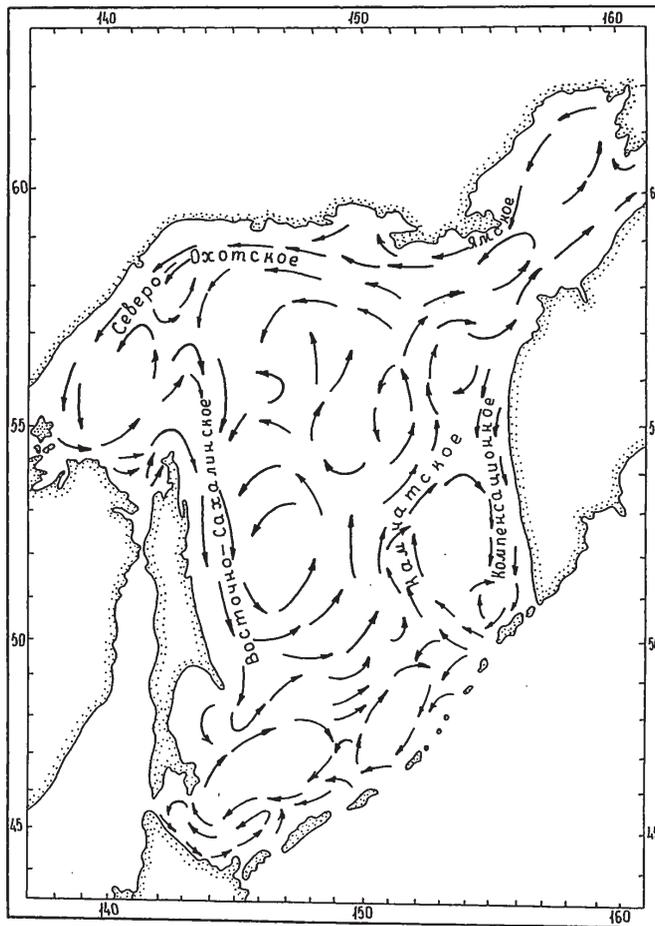


Рис. 1. Генеральная схема течений Охотского моря [Лучин, 1998]
Fig. 1. General scheme of the surface currents in the Okhotsk Sea [from: Лучин, 1998]

Благодаря развитию и совершенствованию дистанционных методов наблюдений за поверхностью океана с искусственных спутников Земли появилось гораздо больше возможностей исследования пространственно-временной изменчивости морских и океанских течений. Однако вместе с тем возник целый ряд проблем, связанных с методическим обеспечением обработки и анализа колоссального количества информации со спутниковых измерителей, которые, впрочем, в настоящее время достаточно успешно решаются. В последние 20 лет опубликовано много работ, представляющих результаты исследования циркуляции вод на основе спутниковых альтиметрических данных, накопленных за соответствующий период. В том числе немало таких работ и для северо-западной части Тихого океана, и Охотского моря в частности [Шевченко, Романов, 2006; Атлас..., 2011; Белоненко, 2013; Андреев, Жабин, 2015; Андреев, 2017].

Предлагаемая работа посвящена исследованию поверхностного геострофического переноса водных масс в восточной части Охотского моря в зимний период года. В работе впервые для этого района использован весь накопленный на настоящее время (1993–2019 гг.) объем данных о геострофических течениях, рассчитанных по изменению уровня поверхности на основе спутниковой альтиметрической информации. Предпринята попытка оценить интенсивность потока Западно-Камчатского течения и ее межгодовую динамику, а также статистическую связь с температурой поверхности моря и ледовитостью. Выбор зимнего сезона и данного района обусловлен, во-первых,

проведением здесь крупномасштабной Охотоморской минтаевой экспедиции. Вторых, существующие общие схемы циркуляции вод Охотского моря в преобладающем большинстве относятся к теплому периоду года, а зимний сезон при этом практически не охвачен наблюдениями. Поэтому спутниковые альтиметрические данные являются единственным объективным источником для оценки геострофического переноса вод.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужил массив ежедневных данных альтиметрических измерений в узлах регулярной сетки с шагом $\frac{1}{4}$ градуса по широте и долготе, полученных со всех доступных спутников за период с 1993 по 2019 г. Эти данные предоставлены Французским космическим агентством (CNES) в рамках проекта DUACS (Data Unification and Altimeter Combination System) и находятся в свободном доступе на сайте международной исследовательской программы Copernicus [Copernicus Marine Environment Monitoring Service: <http://marine.copernicus.eu/>]. Методы получения, обработки и корректировки данных подробно изложены в Руководстве пользователя продукта [<http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SL-PUM-008-032-062.pdf>], а также в ряде работ [Arbic et al., 2012; Pujol et al., 2016].

В предложенном продукте применены поправки на изменение уровня моря, вызванные различными гидрометеорологическими явлениями (приливы, изменение атмосферного давления и т.д.) [Arbic et al., 2012], однако в отношении Охотского моря не учитывается должным образом наличие ледяного покрова. Ввиду этого нами дополнительно для ежедневных данных применялась «маска льда», т.е. из расчетов исключались альтиметрические данные для районов, где распространялся лед. Процедура проводилась на основе данных по концентрации льда из продукта EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility — Global Sea Ice Concentration Data Record [OSI SAF, www.osi-saf.org]. Расчеты средних месячных значений в узлах регулярной сетки проводили в соответствии с руководящими указаниями ВМО*, согласно которым рекомендуется не рассчитывать месячные значения при наличии любого из следующих критериев:

- отсутствуют наблюдения за 11 сут или более в течение месяца;
- отсутствуют наблюдения за период в пять или более последовательных суток в течение месяца.

В результате такой обработки из расчетов были исключены февраль и март экстремально ледовитой зимы 2001 г., когда на 54° с.ш. у западной Камчатки акватория Охотского моря была полностью покрыта льдом. В остальные зимы ледовые условия позволяли рассчитать интенсивность потока ЗКТ.

Поскольку течения у западной Камчатки носят преимущественно меридиональный характер, в данной работе основное внимание уделялось анализу меридиональной составляющей скорости течений V_0 . Поток Западно-Камчатского течения, а точнее его Северной ветви, оценивали через широтный разрез 54° с.ш. от 153° в.д. до берега Камчатки (рис. 2). В этом районе течение, как правило, имеет ярко выраженную струю меридиональной ориентации с направлением на север. Обычно это одноструйное течение шириной 20–40 миль, которое распространяется от поверхности до придонных горизонтов. В среднем стержень течения расположен вдоль 154° в.д. [Жигалов, 2012]. К югу от этого района ЗКТ может проследиваться в виде широкой полосы слабого северного переноса, поэтому не всегда возможно выделить выраженную струю течения. Кроме того, зачастую в районе юго-западной Камчатки оно разделяется на две ветви, направленные на север (Северная ветвь) и северо-запад моря (Срединная ветвь, Срединное течение) [Чернявский, 1981]. У северо-западного побережья Камчатки поток ЗКТ также далеко не всегда имеет ярко выраженный характер, что, по всей видимости, связано с его существенным ослаблением и во-

* Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. ВМО-№ 1203. Женева, 2017. 21 с.

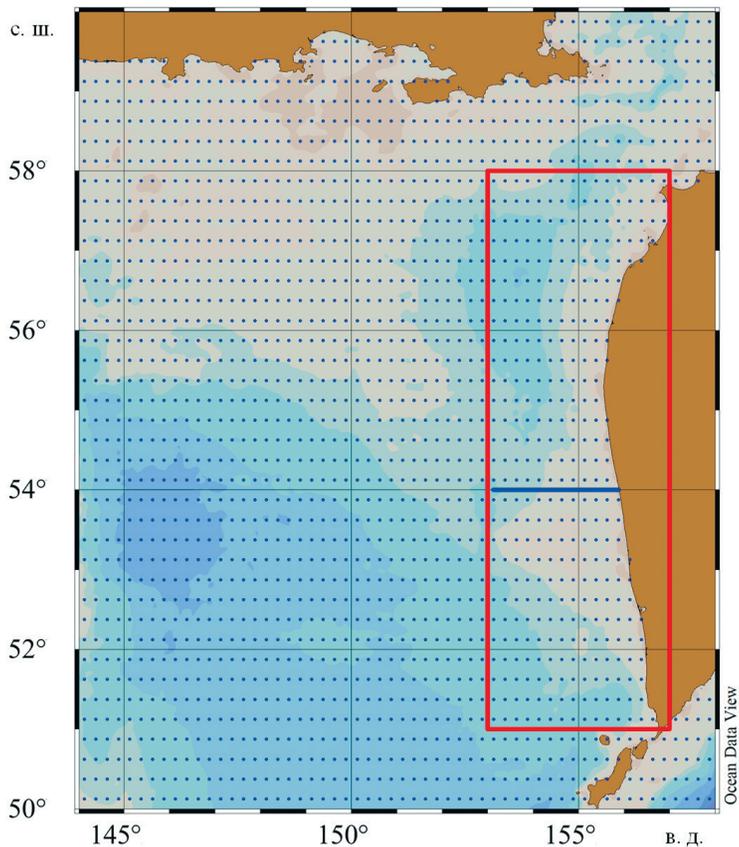


Рис. 2. Район исследуемой части Охотского моря (ограничен *красной линией*) и линия (*синяя*) вдоль 54° с.ш. для расчета поверхностного водного транспорта с Западно-Камчатским течением

Fig. 2. The studied area of the Okhotsk Sea (bordered by *red line*). The line along 54° N for calculation of the surface water transport with the West Kamchatka Current is shown as *blue line*

влечением в вихревые структуры. Кроме этого, в сезонный пик развития ледяного покрова (период с конца февраля по март) этот район обычно полностью или частично занят льдами различной сплоченности.

Оценку потока Западно-Камчатского течения (Северной ветви) проводили путем расчета площади профиля меридиональной скорости северной направленности через поперечное сечение по 54° с.ш. от 153° в.д. до берега Камчатки или кромки ледяного покрова. Для наглядности на рис. 3 представлен пример профиля для декабря 2005 г.; область, для которой производился расчет, красного цвета и заштрихована. Физический смысл данной величины заключается в площади области, которую занимает в указанных границах поток северного направления, проходящий через поперечное сечение в единицу времени (в m^2/c). Подобные меры интенсивности потока применяли в своих работах, например, С.В. Пранц [Prants et al., 2015] и А.Г. Андреев и И.А. Жабин [2015]. Для анализа интенсивности потока ЗКТ по профилю меридиональной скорости также определяли максимальное значение для каждого месяца. Расчеты выполняли в программах MS Excel (Microsoft, Inc.) и Grapher (Golden Software, Inc.).

Среднемесячные значения температуры поверхности моря для восточной части Охотского моря получены из открытого ресурса Met Office [OSTIA SST Monitoring: <http://ghrsst-pp.metoffice.com/>]. Информация представлена ежедневными значениями в узлах регулярной сетки с шагом $0,05^\circ$ по широте и долготе. Район Охотского моря,

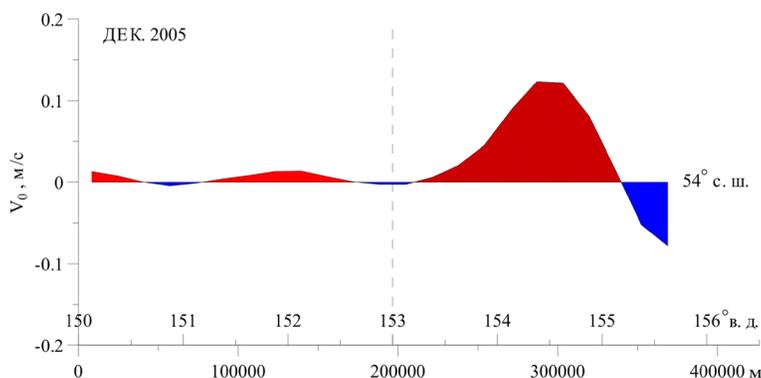


Рис. 3. Профиль меридиональной составляющей скорости геострофического течения на широте 54° с.ш. в декабре 2005 г. (перенос Западно-Камчатского течения рассчитан для красной части профиля)

Fig. 3. Profile of the meridional component of geostrophic current velocity through the latitude of 54° N in December, 2005 (transport of the West Kamchatka Current was calculated for the red-shaded part of the profile)

для которого проводилась выборка данных по температуре поверхности моря, представлен на рис. 2 (ограничен красной линией). На основе этой информации были рассчитаны среднемесячные значения для каждого зимнего месяца и сезона в целом за исследуемый период. При создании продуктов четвертого уровня обработки — интерполирование значений в узлы регулярной географической сетки — во всех используемых продуктах применяли стандартный фильтр «land-sea mask», погрешность которого зависит от точности пространственного разрешения, и в результате были скорректированы некоторые прибрежные узлы сетки.

При расчете средней температуры поверхности для учета льда и сохранения пространственной структуры данных для их корректного сопоставления проводилась следующая процедура. Для каждого из зимних месяцев, например для января, из всего периода исследований находили тот, в котором наблюдалось наибольшее распространение льда. Далее, конвертировав поверхность распространения льда в полигон, получали шаблон «маски льда», по которому проводили выборку значений по участку района исследований, не занятому льдом, и рассчитывали среднее арифметическое значение температуры для каждого месяца отдельно. Исключением явились февраль и март экстремально ледовитой зимы 2001 г., когда практически весь район исследований был занят сплошным льдом, что не позволило произвести расчет. Шаблоном «маски льда» для декабря оказался 1998, для января — 2001, для февраля — 2000 и марта — 2002 гг.

Для расчета ледовитости восточной части Охотского моря использовали данные Национального ледового центра США [NOAA's National Ice Center: <http://www.natice.noaa.gov/>] с временным интервалом в одну неделю и продолжительностью с 1995 по 2019 г., информация предоставляется в векторном географическом формате в shape-файлах в полярной стереографической проекции. Обработку данных из shape-файлов проводили путем перепроецирования в равновеликую проекцию Ламберта и подсчета площадей полигонов со льдом с помощью программ ArcGIS 10 (ESRI, Inc.) и MS Excel (Microsoft, Inc.). Морская граница района, для которого проводили расчет ледовитости, соответствует 150° в.д. на западе и 50° с.ш. на юге [Коломейцев, 2016].

Определение сроков зимнего гидрологического сезона для восточной части Охотского моря основано на гидрологических и биологических исследованиях, результаты которых приводятся в работе В.П. Шунтова [2001]. К этому периоду относятся зимние календарные месяцы и март. При этом в марте в исследуемом районе обычно наблюдаются пик ледовитости и минимум температуры поверхности моря.

Типизация зимних условий по температуре поверхности моря, ледовитости и интенсивности потока ЗКТ была проведена по градациям стандартного отклонения [Фигуркин, 2003] следующим образом. Зима:

- экстремально малоледовитая / экстремально теплая / с экстремально мощным потоком ЗКТ ($X_i > X_{cp} + 1,5s$);
- малоледовитая / теплая / с повышенным потоком ЗКТ ($X_{cp} + 0,5s \leq X_i \leq X_{cp} + 1,5s$);
- нормальная ($X_{cp} - 0,5s \leq X_i \leq X_{cp} + 0,5s$);
- ледовитая / холодная / с пониженным потоком ЗКТ ($X_{cp} - 1,5s \leq X_i \leq X_{cp} - 0,5s$);
- экстремально ледовитая / экстремально холодная / с экстремально слабым потоком ЗКТ ($X_i < X_{cp} - 1,5s$),

где X_i — значение соответствующего показателя в i -м году; X_{cp} — среднееголетнее значение соответствующего показателя за период с 1994 по 2018 г. (для ледовитости — с 1995 г.), s — стандартное отклонение.

Статистический анализ данных осуществлялся с помощью специализированного программного пакета Statistica 8.0 (StatSoft, Inc.) и включал в себя корреляционный и регрессионный анализы [Ферстер, Ренц, 1981]. Линейные уравнения регрессии получали с помощью метода наименьших квадратов.

Картографическую визуализацию данных проводили с помощью программы Ocean Data View 5.2.0*.

Результаты и их обсуждение

Среднеголетний геострофический перенос на поверхности в восточной части Охотского моря в зимний период

В соответствии с полученными среднеголетними схемами в пределах исследуемого района геострофический перенос на поверхности в зимние месяцы инициируется затоком тихоокеанских вод через наиболее широкие и глубокие проливы северной части Курильской гряды. Эти воды разделяются на две ветви: одна из них распространяется в виде относительно мощной струи ЗКТ над свалом глубин западнокамчатского шельфа и желобом Лебеда на север, другая часть уходит в виде широкого и менее выраженного меандрирующего потока на северо-запад (рис. 4). Над западнокамчатским шельфом наблюдаются повышение уровня поверхности моря и соответствующий ему антициклонический круговорот. На восточной периферии этого антициклона вдоль берега проходит южное течение, которое в литературе получило название Компенсационное. Часть этого течения идет по направлению движения в круговороте и соединяется с Западно-Камчатским течением, а другая часть уходит в Тихий океан через Первый Курильский пролив. Также стоит отметить, что в эту схему вовлекаются воды, распространяющиеся из зал. Шелихова вдоль берега Камчатки. В районе входа в зал. Шелихова Западно-Камчатское течение разделяется на Западную ветвь, которая является началом Северо-Охотского течения, и Северную ветвь, воды которой вовлекаются в циркуляционную систему зал. Шелихова.

Во внутригодовой динамике потока и скорости ЗКТ пик приходится на зимние месяцы (рис. 5). Максимальная среднемесячная скорость в струе течения на широтном разрезе через 54° с.ш. наблюдается в январе и составляет 8 см/с, а его поток — около 6 тыс. м²/с. Минимальный поток и скорость в струе ЗКТ приходятся на май и составляют 1,5 тыс. м²/с и 2 см/с, т.е. в 4 раза ниже, чем зимой. В августе и сентябре течение вновь усиливается, и значение скорости достигает 6 см/с, а в ноябре наблюдается еще один локальный минимум скорости, соответствующий 4 см/с. В то же время во внутригодовом изменении потока ЗКТ с мая по октябрь отмечается монотонный рост значений от 1,5 до 2,7 тыс. м²/с, а с октября происходит значительное усиление течения, что, вероятно, обусловлено сезонной интенсификацией атмосферной циркуляции.

* Schlitzer R. Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2019.

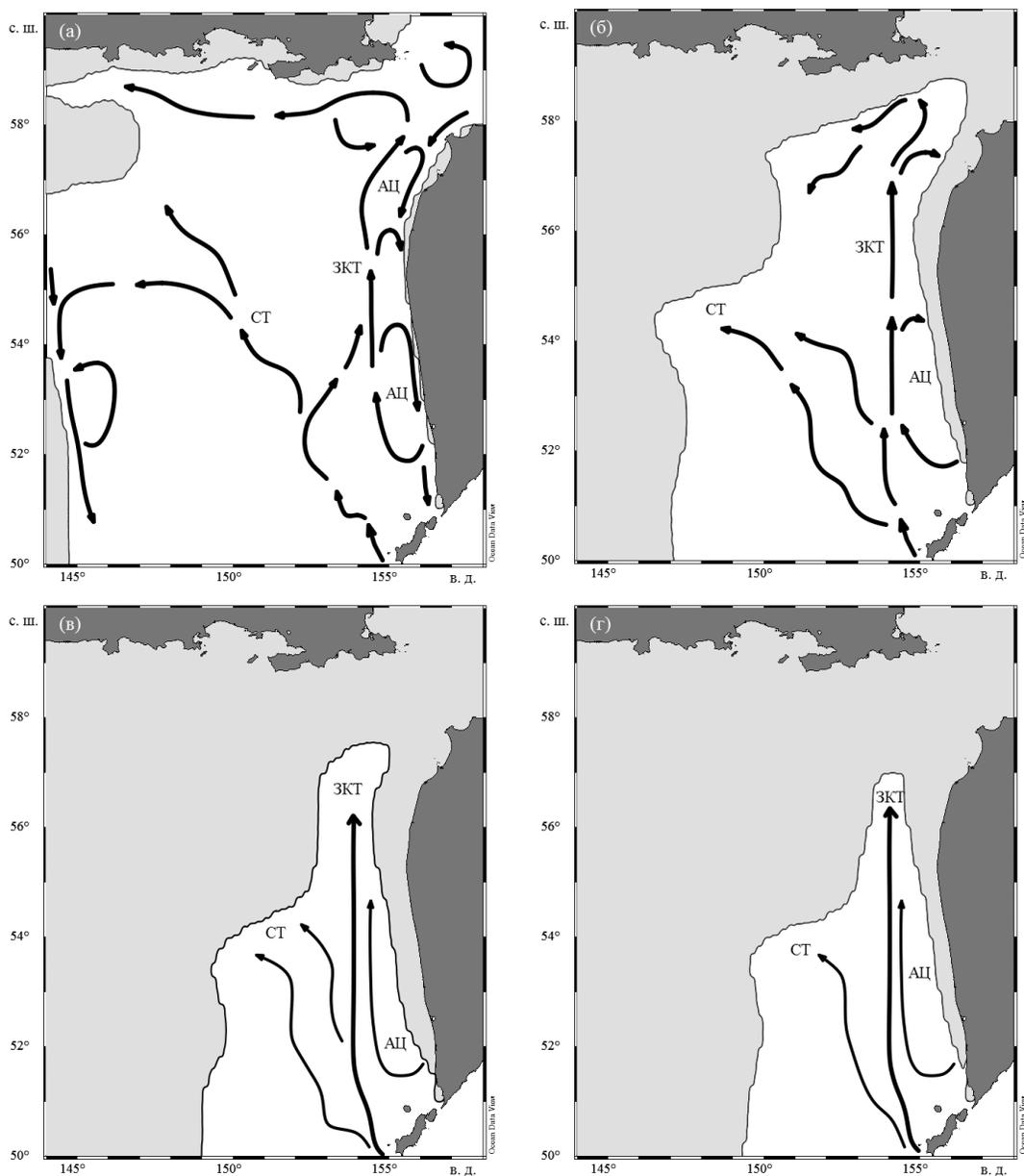


Рис. 4. Среднегодовое схемы геострофического переноса на поверхности в северо-восточной части Охотского моря в декабре (а), январе (б), феврале (в) и марте (г)

Fig. 4. Averaged schemes of the geostrophic circulation on surface of the northeastern Okhotsk Sea for December (а), January (б), February (в), and March (г)

*Особенности межгодовой изменчивости переноса вод на поверхности
Западно-Камчатским течением в зимние месяцы*

Интенсивность переноса поверхностных вод Западно-Камчатским течением претерпевает существенные межгодовые изменения. В разные годы его поток мог распространяться в зал. Шелихова, разделяться на несколько ветвей или практически полностью исчезать.

В декабре экстремально сильный поток Западно-Камчатского течения наблюдался в зимний сезон 1996 г. Тогда скорость в струе ЗКТ составила 16 см/с, а поток — 8–10 тыс. м²/с, что является абсолютным рекордом за весь период исследований (рис. 6, а). Сильное течение, когда поток и меридиональная скорость течения достигали 6–8 тыс. м²/с

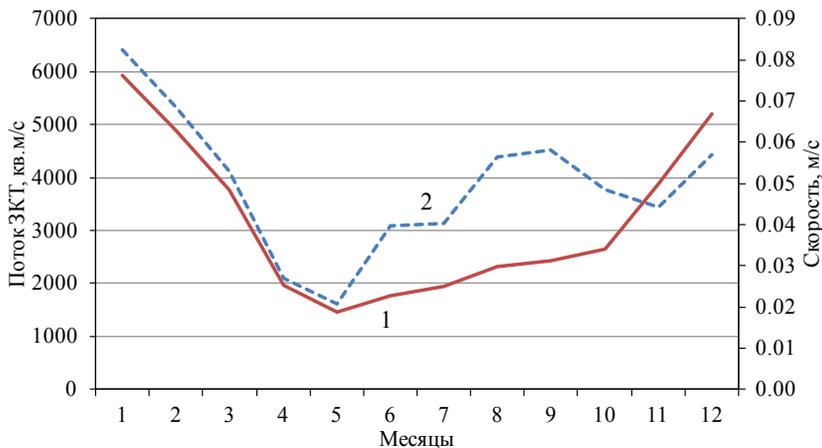


Рис. 5. Внутригодовая динамика среднего многолетнего переноса поверхностных вод Западно-Камчатским течением (1) и скорости в струе течения (2) через широтный разрез 54° с.ш. (от 153° в.д. до берега Камчатки)

Fig. 5. Averaged month-to-month dynamics of meridional transfer of the surface water by the West Kamchatka current through the latitude of 54° N, between 153° E and the coast of Kamchatka (1) and velocity in its main flow (2)

и 8–12 см/с, отмечалось в 1997, 2000, 2002, 2005, 2006, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 и 2019 гг. Слабый северный перенос у западной Камчатки отмечался в зимние сезоны 1994, 1995, 1998, 2001, 2003, 2008 и 2016 гг., когда скорость в струе ЗКТ соответствовала 4–6 см/с, а поток — 3–5 тыс. м³/с. Экстремально слабое течение наблюдалось в 1999, 2004 и 2007 гг., в эти сезоны средний за декабрь поток ЗКТ и скорость в его струе характеризовались 2–3 тыс. м³/с и 3 см/с.

В межгодовой изменчивости потока ЗКТ в январе экстремально сильный поток отмечался в зимы 2013 и 2019 гг., когда его величина достигала 9,8–9,8 тыс. м³/с, а скорость в струе течения составила 12–15 см/с (рис. 6, б). Повышенной интенсивностью характеризовались 1996, 1997, 1999, 2001, 2006, 2010 и 2015 гг. Величина потока в эти сезоны соответствовала 7–9 тыс. м³/с, а скорости — 9–12 см/с. Слабый поток ЗКТ наблюдался в 1994, 2002, 2003, 2004, 2007, 2008, 2012 и 2017 гг. Среднемесячная скорость в струе течения в эти зимы составляла 5–6 см/с, а перенос ЗКТ — 3–5 тыс. м³/с. Отличался в исследуемом периоде январь 2005 г. с экстремально слабым потоком ЗКТ, величина которого составила 2,7 тыс. м³/с.

По интенсивности потока ЗКТ в феврале экстремально высокими значениями характеризовались 1997, 2009, 2010 и 2013 гг. (рис. 6, в). Площадь, покрываемая течением в секунду, превышала 9 тыс. м², а скорости в струе ЗКТ достигали 13–16 см/с. Экстремально слабое течение отмечалось в 2002 г., когда величина потока составила 1,9 тыс. м³/с, а меридиональная скорость — 3–7 см/с. Со слабым потоком ЗКТ в феврале были зимние сезоны 1994, 1998, 1999, 2006, 2007, 2011, 2012 и 2014 гг. — ~3–5 тыс. м³/с.

В марте Западно-Камчатское течение оказалось экстремально сильным в 1997 и 2013 гг., его поток на поверхности в эти годы составил 7,6–7,7 тыс. м³/с, а скорость в струе течения достигала 8–10 см/с (рис. 6, г). Повышенным потоком ЗКТ характеризовался март в 1995, 2004, 2009, 2010, 2014 и 2017 гг., а пониженным — в 1998, 2003, 2005, 2006, 2008, 2011, 2015, 2016, 2018 и 2019 гг. При этом в марте 2001 г., так же как и в феврале этого же года, практически вся восточная часть Охотского моря была покрыта льдом, и оценить интенсивность потока по альтиметрическим данным не оказалось возможным. А экстремально слабый поток отмечался в марте 2002 г., когда его величина составила 0,2 тыс. м³/с, что явилось абсолютным рекордом за весь период исследований. Очевидно, что март в зимнем гидрологическом сезоне характеризуется наименьшей интенсивностью ЗКТ.

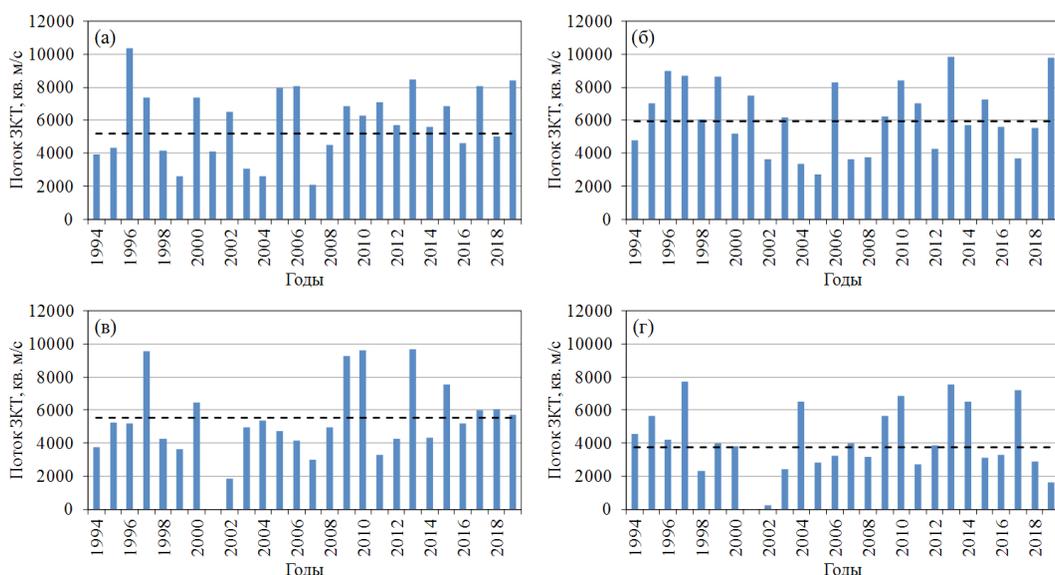


Рис. 6. Межгодовая динамика переноса поверхностных вод Западно-Камчатским течением для декабря (а), января (б), февраля (в) и марта (г) (пунктирная линия — среднее за 1994–2019 гг. для соответствующего месяца)

Fig. 6. Year-to-year variation of monthly mean transport of the surface water by the West Kamchatka Current for December (a), January (б), February (в), and March (г) (dashed line — mean level for 1994–2019, by months)

Таким образом, рассмотрев интенсивность потока Западно-Камчатского течения по отдельности для каждого месяца, можно сделать вывод, что в целом за зимний гидрологический сезон преобладание мощного потока течения наблюдалось в 1996, 1997, 2009, 2010 и 2013 гг. Слабое течение на протяжении большей части сезона было отмечено в 2002 и 2007 гг. Об этом наглядно свидетельствует график межгодовой изменчивости среднего за сезон переноса поверхностных вод ЗКТ (рис. 7). Кроме того, в некоторые годы наблюдалась существенная изменчивость потока течения внутри сезона. Такая ситуация, когда часть сезона Западно-Камчатское течение было интенсивнее обычного, а затем, напротив, относительно слабее, либо обратная ситуация отмечались, например, в 2000, 2004, 2005, 2006, а также в 2019 гг.

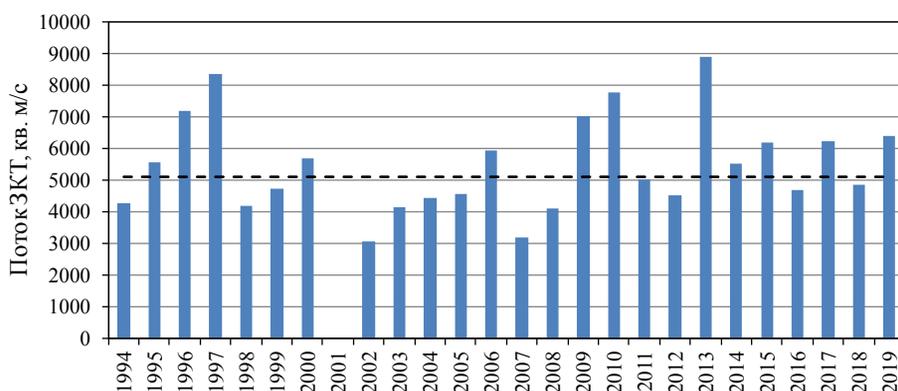


Рис. 7. Межгодовая динамика средней за зимний гидрологический сезон (декабрь-март) интенсивности потока Западно-Камчатского течения (пунктирная линия — среднее за 1994–2019 гг.)

Fig. 7. Year-to-year variation of total winter (December-March) transport of the surface water by the West Kamchatka Current (dashed line — mean level for 1994–2019)

*Статистическая связь интенсивности Западно-Камчатского течения
с температурой поверхности и ледовитости в восточной части Охотского моря*

В холодное время года Западно-Камчатское течение является транспортом тепла из сопряженной акватории Тихого океана. Соответственно, чем интенсивнее течение, тем большее обогревающее влияние оно должно оказывать, что впоследствии может сказаться на условиях нагула и размножения гидробионтов. Однако в результате проведенных исследований оказалось, что данная зависимость прослеживалась не всегда. Так, например, в аномально холодную и ледовитую зиму 2001 г. Западно-Камчатское течение в январе характеризовалось повышенной интенсивностью, хотя по температуре поверхности моря в среднем для восточной части Охотского моря этот месяц относится к холодному типу [Коломейцев, 2016].

Статистическая оценка отклика на изменчивость потока ЗКТ температуры воды на поверхности показала наличие значимой связи (при уровне значимости $p = 0,05$) потока ЗКТ и ТПМ во все зимние месяцы, кроме марта (см. таблицу). Несмотря на это, значения линейного коэффициента корреляции в основном были небольшими и соответствовали 0,41–0,49. Отсутствие значимой статистической связи наблюдалось между ледовитостью и потоком Западно-Камчатского течения по временным рядам данных для декабря, января и февраля, и только в марте между этими характеристиками прослеживалась значимая обратная связь ($r = -0,54$, $p = 0,01$).

Оценки интенсивности Западно-Камчатского течения, сделанные с использованием
корреляционного и регрессионного анализа
Estimations of the West Kamchatka Current intensity made using
correlation and regression analysis

Параметр	Месяц	N	r	R ²	p	Уравнение регрессии
ТПМ	Декабрь	25	0,41	0,16	0,044	$y = 1,02 + 0,00009x$
	Январь	26	0,42	0,18	0,036	$y = 0,39 + 0,00007x$
	Февраль	25	0,49	0,24	0,015	$y = -0,15 + 0,00007x$
	Март	25	0,29	0,08	0,170	$y = -0,25 + 0,00006x$
Ледовитость	Декабрь	24	-0,30	0,09	0,157	$y = 18,82 - 0,0008x$
	Январь	25	-0,03	0,00	0,886	$y = 34,00 - 0,0001x$
	Февраль	24	-0,40	0,16	0,055	$y = 57,91 - 0,002x$
	Март	24	-0,54	0,29	0,006	$y = 61,75 - 0,003x$

Примечание. N — количество наблюдений; r — коэффициент корреляции; R² — коэффициент детерминации, представляющий собой долю варибельности y, которая обусловлена линейным соотношением с x; p — уровень значимости.

В результате проведенного анализа обнаруживается, что изменчивость потока ЗКТ объясняет от 18 до 24 % изменчивости ТПМ в зависимости от месяца. Это может быть связано с влиянием на температуру поверхности ряда других, более значимых, факторов, в первую очередь обмен с атмосферой. Доля дисперсии ледовитости, которая объясняется изменением потока ЗКТ, составила 29 % в марте — единственном месяце, когда она оказалась статистически значимой. Таким образом, изменчивость переноса поверхностных вод Западно-Камчатским течением объясняет всего около 1/5 варибельности температуры поверхности для декабря, января и февраля и около 1/4 варибельности ледовитости для марта.

Проведя анализ отношений тех же самых показателей, но в среднем для сезона, получены более сильные значимые линейные связи (рис. 8). Коэффициент корреляции между потоком ЗКТ и температурой поверхности моря составил 0,56 ($p = 0,00$), а между потоком ЗКТ и ледовитостью — -0,47 ($p = 0,02$). При этом варибельность потока ЗКТ объясняет 31 % изменения сезонной температуры поверхности и 22 % — ледовитости.

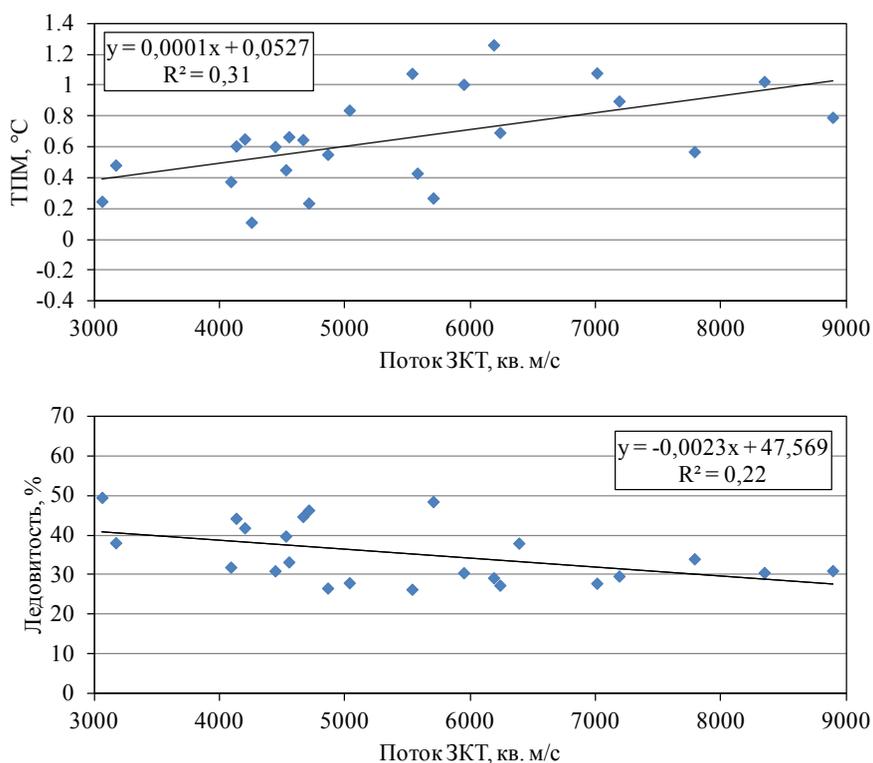


Рис. 8. Двухмерные диаграммы рассеяния и линии регрессии для потока ЗКТ и ТПМ (**вверху**) и потока ЗКТ и ледовитости (**внизу**)

Fig. 8. Scattering plots and regression lines for the relationships between the West Kamchatka Current transport and SST (**upper panel**) and its transport and ice cover (**bottom panel**)

Выводы

Геострофическая циркуляция вод Охотского моря в целом изучена достаточно хорошо. Однако расчеты течений выполнены главным образом по данным измерений температуры и солености для теплого периода года. Эти данные в межгодовом и внутригодовом масштабах времени несут в себе эпизодический характер и практически не охватывают зимний период года, в то время как именно в этот сезон поток Западно-Камчатского течения достигает своего максимума, о чем свидетельствуют результаты исследований, проведенных в настоящей работе.

По результатам статистической обработки данных об интенсивности переноса поверхностных вод Западно-Камчатским течением выделены зимы с мощным, нормальным и слабым течением. Повышенной интенсивностью потока характеризовались зимы 1996, 1997, 2009, 2010 и 2013 гг., а пониженной — 2002 и 2007 гг.

В результате проведенной оценки статистической зависимости температуры поверхности моря от изменчивости потока Западно-Камчатского течения выявлены значимые связи между потоком ЗКТ и ТПМ для всех месяцев зимнего сезона кроме марта. С другой стороны, наибольшая доля изменчивости потока Западно-Камчатского течения, объясняющая вариабельность температуры поверхности, составила всего 24 % ($r = -0,54$ при $p = 0,01$) (для февраля). Единственная значимая связь между потоком ЗКТ и ледовитостью восточной части Охотского моря была обнаружена для марта, коэффициент корреляции составил $-0,54$ при $p = 0,01$.

Характеристики Западно-Камчатского течения, такие как площадь потока или скорость в струе течения, можно использовать в качестве дополнительных индикаторов при исследовании межгодовой изменчивости гидрологического режима восточной части Охотского моря. Информация о геострофических течениях, рассчитанных на

основе спутниковых альтиметрических измерений, вследствие достаточно хорошего пространственно-временного покрытия может применяться в комплексном и промысловом мониторинге.

Благодарности

Автор выражает благодарность международной исследовательской Службе мониторинга морской и окружающей среды (Copernicus Marine and Environment Monitoring Service), Метеорологическому бюро Великобритании (Met Office) и Национального ледового центра США (NOAA's National Ice Center) за регулярно обновляемые океанологические данные на открытых информационных Интернет-ресурсах. Автор искренне признателен анонимному рецензенту за полезные и конструктивные замечания, а В.А. Лучину, помимо замечаний, за обсуждение полученных результатов в формате диалога и ценных советов по улучшению содержания публикации. А.И. Варкентину и Е.В. Лепской за мотивацию к исследованиям, первые отзывы и правки к настоящей публикации.

Финансирование работы

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Камчатского филиала ФГБНУ «ВНИРО» на 2019 г. по теме «Разработка прогноза изменения состояния, распределения, численности и воспроизводства водных биологических ресурсов, а также среды их обитания под воздействием природных и антропогенных факторов».

Соблюдение этических стандартов

Автор заявляет, что настоящая работа не содержит собственных экспериментальных данных, полученных с использованием животных или с участием людей. Библиографические ссылки на все использованные данные других авторов оформлены в соответствии с ГОСТом. Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- Андреев А.Г.** Мезомасштабная циркуляция вод в районе Восточно-Сахалинского течения (Охотское море) // Исслед. Земли из космоса. — 2017. — № 2. — С. 3–12. DOI: 10.7868/S0205961417010031.
- Андреев А.Г., Жабин И.А.** Влияние продолжения Аляскинского течения на динамику вод восточной части Охотского моря // Вестн. ДВО РАН. — 2015. — № 2. — С. 87–92.
- Атлас изменчивости уровня северо-западной части Тихого океана** / Т.В. Белоненко, А.В. Колдунов, В.В. Колдунов и др. — СПб. : СММО-ПРЕСС, 2011. — 304 с.
- Белоненко Т.В.** Спутниковая альтиметрия северо-западной части Тихого океана // Изв. РГПУ им. А.И. Герцена. — 2013. — № 163. — С. 120–128.
- Берникова Т.А.** Гидрология и промысловая океанология : учеб. для вузов. — М. : Пищ. пром-сть, 1980. — 240 с.
- Варкентин А.И., Буслов А.В., Тепнин О.Б.** Некоторые особенности нереста и распределения икры минтая в водах западной Камчатки // Изв. ТИНРО. — 2001. — Т. 128. — С. 177–187.
- Верхунов А.В.** Развитие представлений о крупномасштабной циркуляции Охотского моря // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. — М. : ВНИРО, 1997. — С. 8–19.
- Дарницкий В.Б., Лучин В.А.** Особенности горизонтальной структуры климатических течений Охотского моря с месячной дискретностью // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. — М. : ВНИРО, 1997. — С. 19–25.
- Жигалов И.А.** Сезонная и межгодовая изменчивость геострофических течений в районе западной Камчатки // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 169. — С. 94–99.
- Коломейцев В.В.** Типизация зимних гидрологических условий для всего Охотского моря и для района у Западной Камчатки по данным спутникового мониторинга // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2016. — Вып. 41. — С. 81–88. DOI: 10.15853/2072-8212.2016.41.81-88.

Левасту Т., Хела И. Промысловая океанография : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1974. — 295 с.

Лучин В.А. Непериодические течения // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. — Т. 9 : Охотское море, вып. 1 : Гидрометеорологические условия. — СПб. : Гидрометеиздат, 1998. — С. 233–256.

Лучин В.А. Циркуляция вод Охотского моря и особенности ее внутрigoдовой изменчивости по результатам диагностических расчетов // Тр. ДВНИГМИ. — 1987. — Вып. 36. — С. 3–13.

Помазанова Н.П. Поверхностные течения в северных и восточных промысловых районах Охотского моря в летние месяцы // Тр. ДВНИГМИ. — 1970. — Вып. 30. — С. 94–104.

Самко Е.В., Глебова С.Ю., Петрук В.М. Межгодовая изменчивость циркуляции вод Охотского моря у западного побережья Камчатки в весенний период // Метеорол. и гидрол. — 2004. — № 12. — С. 63–70.

Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа : моногр. — М. : Финансы и статистика, 1981. — 302 с.

Фигуркин А.Л. Океанологические условия шельфа и склона Охотского моря в холодную половину года и их влияние на нерест минтая : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Владивосток : ТИПРО-центр, 2003. — 24 с.

Фигуркин А.Л. Циркуляция вод западнокамчатского шельфа // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. — М. : ВНИРО, 1997. — С. 25–29.

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

Шевченко Г.В., Романов А.А. Сезонная изменчивость циркуляции в верхнем слое Охотского моря по данным спутниковой альтиметрии // Метеорол. и гидрол. — 2006. — № 8. — С. 59–71.

Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России: в 3 томах : моногр. — Владивосток : ТИПРО-центр, 2001. — Т. 1. — 580 с.

Arbic B.K., Scott R.B., Chelton D.B. et al. Effects on stencil width on surface ocean geostrophic velocity and vorticity estimation from gridded satellite altimeter data // J. Geophys. Res. — 2012. — Vol. 117. — C03029. DOI: 10.1029/2011JC007367.

Prants S.V., Andreev A.G., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Impact of the Alaskan Stream flux on the surface water dynamics, temperature, ice extent, plankton biomass, and walleye pollock stocks in the eastern Okhotsk Sea // J. Marine Syst. — 2015. — Vol. 151. — P. 47–58.

Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G. et al. DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years // Ocean Sci. — 2016. — Vol. 12. — P. 1067–1090. DOI: 10.5194/os-12-1067-2016.

References

Andreev, A.G., Mesoscale Circulation in the East Sakhalin Current Region (Okhotsk Sea), *Earth Observation and Remote Sensing*, 2017, no. 2, pp. 3–12. doi 10.7868/S0205961417010031

Andreev, A.G. and Zhabin, I.A., Impact of continuation of the Alaskan Stream flux changes on the water dynamics in the eastern Okhotsk Sea, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2015, no. 2, pp. 87–92.

Belonenko, T.V., Koldunov, A.V., Koldunov, V.V., May, R.I., Rubchenya, A.V., Staritsyn, D.K., and Fuchs, V.R., *Atlas izmenchivosti urovnya severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana* (North-west Pacific Variability Level Atlas), St. Petersburg: SMIO-PRESS, 2011.

Belonenko, T.V., Satellite altimetry of the north-western Pacific, *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*, 2013, no. 163, pp. 120–128.

Bernikova, T.A., *Gidrologiya i promyslovaya okeanologiya* (Hydrology and commercial Oceanology), Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1980.

Varkentin, A.I., Buslov, A.V., and Tepnin, O.B., Some peculiarities of pollock spawning and eggs distribution off western Kamchatka, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2001, vol. 128, pp. 177–187.

Verkhunov, A.V., Development of the Idea of the Large-scale Circulation of the Sea of Okhotsk, in *Complex Studies of Ecosystem of the Sea of Okhotsk*, Moscow: VNIRO, 1997, pp. 8–19.

Darnitskiy, V.B. and Luchin, V.A., Peculiarities of the Horizontal Structure of the Climatic Currents of the Discreteness, in *Complex Studies of Ecosystem of the Sea of Okhotsk*, Moscow: VNIRO, 1997, pp. 19–25.

Zhigalov, I.A., Seasonal and year-to-year variability of geostrophic currents at West Kamchatka, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 169, pp. 94–99.

Kolomeytshev, V.V., Classification of winter hydrological conditions in the Okhotsk Sea and the Western Kamchatka region of the Okhotsk Sea according to satellite monitoring, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki i Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2016, vol. 41, pp. 81–88. doi 10.15853/2072-8212.2016.41.81-88

Levastu, T. and Khela, I., *Promyslovaya okeanografiya* (Commercial oceanography), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974.

Luchin, V.A., Nonperiodical currents, in *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. T. 9: Okhotskoye more* (Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas, vol. 9: Sea of Okhotsk), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998, issue 1, pp. 233–256.

Luchin, V.A., Water circulation in the Sea of Okhotsk and patterns of its intra-annual variations as inferred from the results of diagnostic calculations, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1987, no. 36, pp. 3–13.

Pomazanova, N.P., *Poverkhnostnyye techeniya v severnykh i vostochnykh promyslovykh rayonakh Okhotskogo morya v letniye mesyatsy* (Surface currents in the northern and eastern fishing regions of the Sea of Okhotsk in the summer months), *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1970, no. 30, pp. 94–104.

Samko, E.V., Glebova, S.Yu., and Petruk, V.M., *Mezhhodovaya izmenchivost' tsirkulyatsii vod Okhotskogo morya u zapadnogo poberezh'ya* (Interannual variability in the circulation of the Sea of Okhotsk off the west coast of Kamchatka in the spring), *Meteorol. Hydrol.*, 2004, no. 12, pp. 63–70.

Ferster, E. and Renz, B., *Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza* (Methods of correlation and regression analysis), Moscow: Finance and statistics, 1981.

Figurkin, A.L., Oceanological conditions of the shelf and slope of the Sea of Okhotsk in the cold half of the year and their impact on spawning of pollock, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*, Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2003.

Figurkin, A.L., The Water Circulation on the Western Kamchatka Shelf in Spring, 1983–1995, in *Complex Studies of Ecosystem of the Sea of Okhotsk*, Moscow: VNIRO, 1997, pp. 25–29.

Chernyavsky, V.I., Circulation systems of the Sea of Okhotsk, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1981, vol. 105, pp. 13–19.

Shevchenko, G.V. and Romanov, A.A., *Sezonnaya izmenchivost' tsirkulyatsii v verkhnem sloye Okhotskogo morya po dannym sputnikovoy al'timetrii* (Seasonal variability of circulation in the upper layer of the Sea of Okhotsk according to satellite altimetry), *Meteorol. Hydrol.*, 2006, no. 8, pp. 59–71.

Shuntov, V.P., *Biologiya dal'nevostochnykh morei Rossii* (Biology of the Far Eastern Seas of Russia), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2001, vol. 1.

Arbic, B.K., Scott, R.B., Chelton, D.B., Richman, J.G., and Shriver, J.F., Effects on stencil width on surface ocean geostrophic velocity and vorticity estimation from gridded satellite altimeter data, *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, C03029. doi 10.1029/2011JC007367

Prants, S.V., Andreev, A.G., Budyansky, M.V., and Uleysky, M.Yu., Impact of the Alaskan Stream flux on the surface water dynamics, temperature, ice extent, plankton biomass, and walleye pollock stocks in the eastern Okhotsk Sea, *J. Marine Syst.*, 2015, vol. 151, pp. 47–58.

Pujol, M.-I., Faugère, Y., Taburet, G., Dupuy, S., Pelloquin, C., Ablain, M., and Picot, N., DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years, *Ocean Sci.*, 2016, vol. 12, pp. 1067–1090. doi 10.5194/os-12-1067-2016

Rukovodyashchiye ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm (WMO Guidelines for the calculation of climate standards), WMO-no. 1203, Geneva, 2017.

Schlitzer, R., *Ocean Data View*, <https://odv.awi.de>, 2019.

Поступила в редакцию 7.02.2020 г.

После доработки 17.04.2020 г.

Принята к публикации 20.05.2020 г.