

УДК 551.465.52

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ С ДАННЫМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТОВ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДЛЯ АКВАТОРИИ ОХОТСКОГО МОРЯ У СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ

© 2018 г. В. В. Коломейцев<sup>1</sup>, \*, О. Б. Тепнин<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Камчатский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Петропавловск-Камчатский, Россия

\*e-mail: kolomeytsev.v.v@mail.ru

\*\*e-mail: tepnin.o.b@kamniro.ru

Поступила в редакцию 03.11.2016 г.

После доработки 27.09.2017 г.

Представлены схемы течений на поверхности у Северо-Западной Камчатки, построенные по данным прямым наблюдений, спутниковых альтиметрических измерений, численного моделирования и рассчитанных стандартным динамическим методом. Сопоставлены значения характеристик течений, полученные разными методами. Между скоростями абсолютных и геострофических течений статистически значимые линейные связи не выявлены. Прослеживалась линейная зависимость между направлениями геострофического переноса, рассчитанными стандартным динамическим методом и по данным спутниковой альтиметрии, а также между направлениями, измеренными посредством Argonaut MD и рассчитанными моделью. Проведена оценка доли агеострофической составляющей течений. По данным расчетов геострофических течений разными методами, она составила от 86 до 93%. Существенным минусом данных прямых измерений является сложность их интерпретации. Также они далеко не всегда могут дать представление о пространственной схеме устойчивой циркуляции вод в исследуемом районе.

DOI: 10.1134/S0030157418050040

### ВВЕДЕНИЕ

Исследуемая в настоящей работе восточная часть Охотского моря имеет большое значение в развитии Дальневосточного региона. В настоящее время, по-прежнему, главным направлением хозяйственной деятельности здесь является промысел биологических ресурсов. Кроме того, в последние годы особый интерес этот район представляет и для нефтегазодобывающей отрасли. Безусловно, любое направление хозяйственной деятельности нуждается в решении большого комплекса природоохранных проблем, в том числе путем научных исследований, включая исследование гидрологических условий.

Течения являются важнейшим свойством морской среды. Их роль в формировании гидрологического режима чрезвычайно велика. В частности, течения перераспределяют гидрологические характеристики и переносят на огромные расстояния колоссальные запасы воды, тепла, солей и т.д. Но также они могут и служить транспортной артерией загрязняющих веществ в слу-

чае 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 [4, 6].

История исследований течений Охотского моря подробно изложена в [14]. Современные представления о течениях в Охотском море получены, главным образом, на основе расчетных методов. При этом некоторые результаты несут собой довольно противоречивые сведения, что связано с объемом использованных гидрологических данных, модификацией применяемого метода расчетов и т.д. С расширением возможностей непосредственных наблюдений за течениями и развитием спутниковой альтиметрии началась новая эпоха исследований динамики вод моря, что, вероятно, позволит уточнить существующую схему циркуляции вод.

Генеральная схема течений, рассчитанная на основе многолетних данных о температуре и солености воды, приводится в “Атласе по океано-

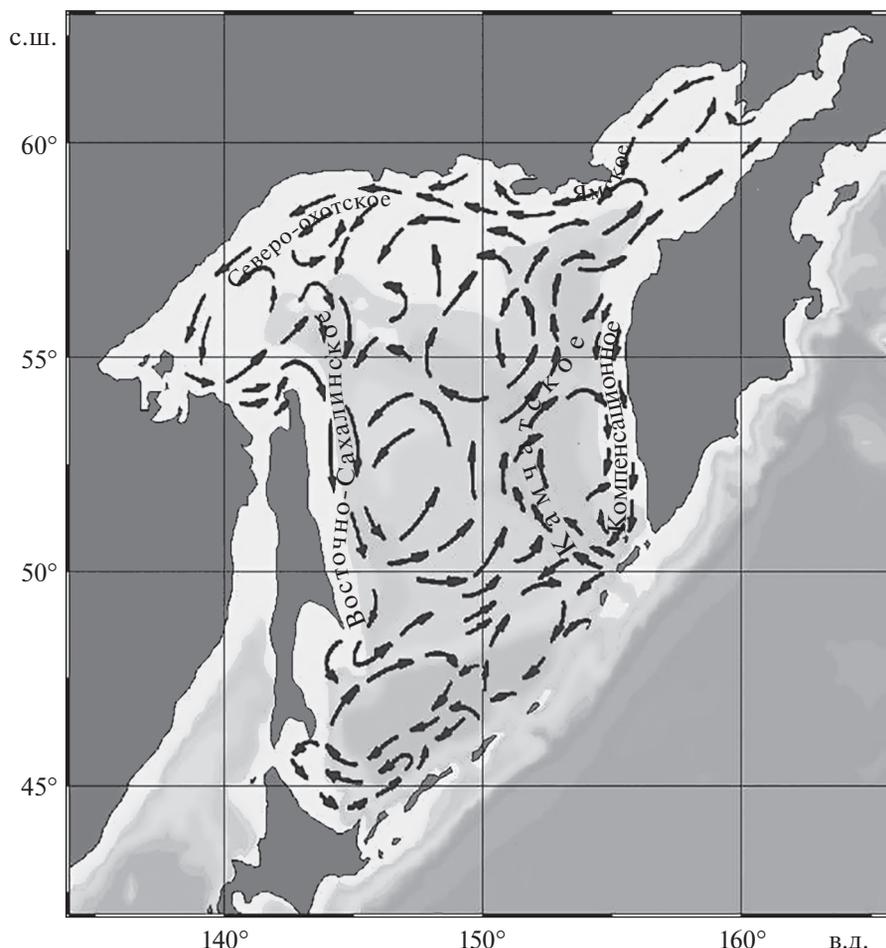


Рис. 1. Генеральная схема течений Охотского моря.

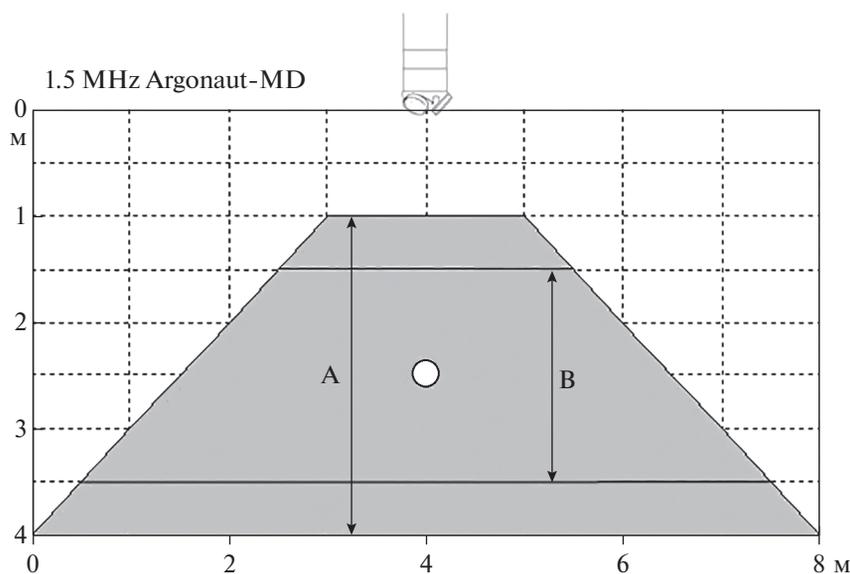
графии Берингова, Охотского и Японского морей” [12] и представлена на рис. 1. Главными элементами циркуляционной системы Охотского моря в его восточной части являются Западно-Камчатское (на схеме отмечено как Камчатское течение) и Компенсационное течения. При этом многие исследователи отмечают непостоянство существования Компенсационного течения. 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 сезонной изменчивостью атмосферной циркуляции [8, 11, 13–15].

По данным диагностических расчетов, общая схема циркуляции вод в деятельном слое претерпевает значительные изменения от сезона к сезону. Осенью скорости течений несколько возрастают. В зимнее время на свободных ото льда участках в основном наблюдаются течения южного и юго-западного направлений. Скорости непериодических течений в поверхностном слое достигают наибольших значений в прибрежной полосе. Скорость Западно-Камчатского течения на

поверхности при обычных синоптических ситуациях оценивается в 10–15 см/с, в то время как на горизонте 100 м ее оценочные значения в 2–3 раза меньше. На фоне общей циркуляции вод на поверхности моря прослеживаются более мелкие элементы – квазистационарные вихревые образования и меандры течений [12].

В Охотском море хорошо выражены периодические приливные течения, которые в мелководных прибрежных районах имеют реверсивный характер. Вдали от берегов скорости этих течений относительно невелики – 5–10 см/с, а у берегов они достигают экстремально высоких значений. В частности, на северном и северо-восточном побережьях – ~300 см/с [12].

С другой стороны, основным генерирующим механизмом течений в поверхностном слое служит воздействие ветра, особенно это выражено в районах Мирового океана с интенсивной атмосферной циркуляцией (зоны пассатов, муссонов, субарктические районы и т.п.) [23]. Охотское море находится в зоне муссонного климата умеренных широт, что дает возможность с большой вероятностью



**Рис. 2.** Размеры ячейки объема воды, в которой измерялась скорость течений: маленьким белым кругом отмечен центр измеряемого объема. А — вертикальный размер общего измеряемого объема (серая область; должна оставаться свободной от каких-либо механических помех и больших искажений потока во время измерений), В — вертикальный размер собственно ячейки измерения скорости.

предполагать существенную роль дрейфовой составляющей течений в формировании общей картины переноса вод поверхностного слоя.

Предлагаемая работа посвящена исследованию поверхностного переноса водных масс на акватории Охотского моря у северо-западного побережья Камчатки. В работе впервые для этого района сделана попытка сравнить результаты прямых измерений течений акустическим измерителем с данными расчетов геострофических течений по полю плотности и спутниковыми альтиметрическими измерениями, а также данными численного моделирования, и на основе этого сравнения оценить вклад агеострофической и геострофической составляющих течений в общем переносе вод.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прямые измерения характеристик течений проводили в июне–июле 2015 г. с борта научно-исследовательского судна “Профессор Кизеветтер” с помощью трехлучевого акустического измерителя течений ADCM (Acoustic Doppler Current Meter) Argonaut MD 1.5 МГц (SonTek/YSI

Inc., США). Принцип измерения скорости течений водной среды основан на эффекте Доплера, т.е. на определении смещения частоты акустического сигнала, характеризующего скорость движения рассеивателей в объеме измерения вдоль направления луча.

Спецификации датчиков приведены в табл. 1, а размеры ячейки, в которой измерялась скорость, — на рис. 2. Рабочая частота измерителя равна 1.5 МГц, частота повторения пингов составляет 1 Гц.

На каждой гидрологической станции в дрейфе прибор выдерживали по 2–3 мин в поверхностном слое. Объем воды, в котором измеряли течения, находился ниже киля судна (не более 3.5 м), как правило, в слое 5–10 м. Схема расположения станций, на которых проводили прямые измерения скорости и направления течений, представлена на рис. 3.

После поднятия прибора на борт судна полученную информацию переносили по кабелю на персональный компьютер и обрабатывали с помощью программного обеспечения от производителя прибора ViewArgonaut. Несомненным плюсом обработки является включение в выход-

**Таблица 1.** Характеристики датчиков SonTek Argonaut MD

	Скорость	Компас, датчик наклона
Диапазон	$\pm 6$ м/с	Направление течений: 0–360°
Разрешение	0.1 см/с	0.1°
Точность	$\pm 1\%$ от измеренной скорости	Курс: $\pm 2^\circ$ , наклон: $\pm 1^\circ$ при допустимом крене прибора $\pm 50^\circ$

ной файл, помимо значений направления и скорости течений, значений стандартных отклонений, позволяющих провести первичную оценку качества данных.

Выходные данные представляют собой значения усредненных за 10-секундный интервал (настраивается пользователем) пространственных характеристик течений, привязанных к географическому пространству (E/N/U – East/North/Up). Процесс привязки осуществляется посредством встроенного компаса Precision Navigation TCM2, разработанного SonTek/YSI. Во время рейса перед измерениями регулярно проводили рекомендованную изготовителем процедуру тестирования и калибровки компаса для компенсации шумов магнитных полей, которые возникают при нахождении вблизи прибора металлических конструкций (например, корпуса судна), которые деформируют естественное магнитное поле Земли.

Для получения профиля течения из данных L-ADCP применяется довольно сложный математический алгоритм, подробно изложенный в таких работах, как [1, 24]. Мы же в рейсе имели акустический доплеровский измеритель несколько иной рабочей спецификации, чем в этих работах, и перед нами стояли, собственно, другие задачи. Поэтому каждый цикл измерений Argonaut MD (среднее значение за 10-секундный интервал) мы будем рассматривать в виде следующего простого выражения:

$$V_{\text{arg}} = V_{\text{water}} + V_{\text{drift}} + V_{\text{noise}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{arg}}$  представляет индивидуальные данные Argonaut MD,  $V_{\text{water}}$  – движение воды относительно датчиков Argonaut MD без учета собственного его движения,  $V_{\text{drift}}$  – собственное горизонтальное перемещение Argonaut MD (вместе с судном при дрейфе),  $V_{\text{noise}}$  – шум. Слагаемым  $V_{\text{noise}}$ , в принципе, можно пренебречь в предположении, что шум не имеет систематических ошибок и при интегрировании по времени его величина достаточно мала [24]. Кроме этого, согласно руководству по эксплуатации Argonaut MD, стандартные отклонения, входящие в выходные данные, включают в себя генерируемый инструментом шум и естественные вариации скорости воды. Данные о дрейфе  $V_{\text{drift}}$  регистрировались во время выполнения гидрологических станций с судовой навигационной системы.

Основой для расчета геострофических течений по полю плотности послужили данные вертикального зондирования CTD-зондом SBE 19plus V2 (Sea Bird Electronics, США), выполненные параллельно измерениям течений. Спецификации датчиков приведены в табл. 2. Расчет производили с помощью специализированной программы OBZerver 3.1 [3], в которой реализован стандартный динамический метод расчета [5, 9]. За отчет-

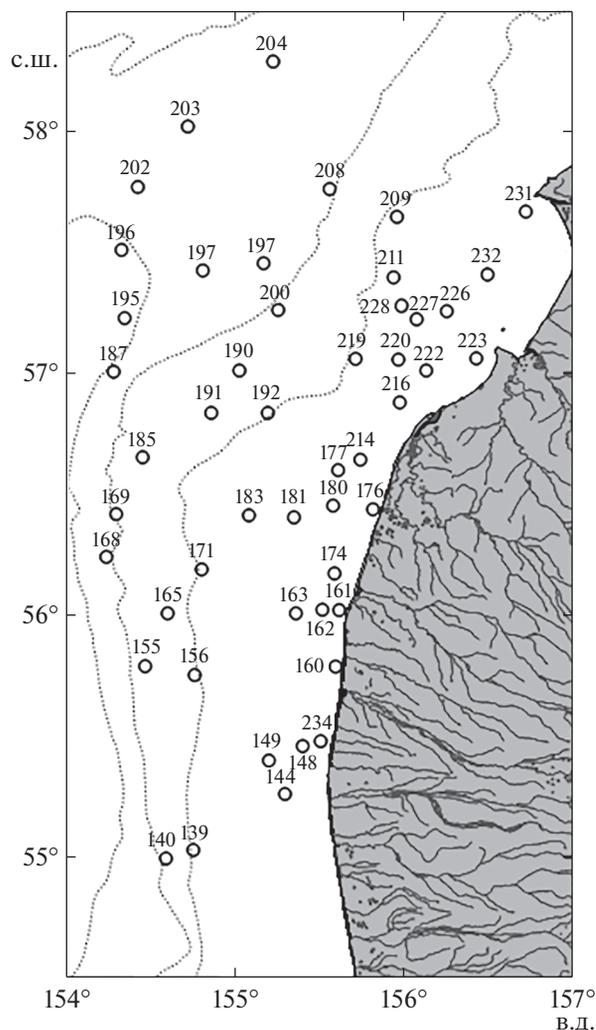


Рис. 3. Схема расположения станций у северо-западного побережья Камчатки, на которых были выполнены прямые измерения течений с помощью Argonaut MD с борта НИС “Профессор Кизеветтер” в июне–июле 2015 г.

ную поверхность был выбран горизонт 200 дбар, что является стандартной процедурой для западнокамчатского шельфа.

Данные модельных расчетов течений получены с веб-портала европейской исследовательской программы Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) [16]. Из широкого ряда предлагаемых продуктов был выбран смоделированный набор данных GLOBAL\_ANALYSIS\_FORECAST\_PHYS\_001\_024, в котором для расчетов значений характеристик циркуляции реализована глобальная численная модель океана NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) [17]. Данные расчетов модели ассимилируются с данными альтиметров со всех доступных спутников. Выходные данные имеют высокое пространственное и временное разрешение –  $1/12^\circ$  по широте и долготе и временную дискрет-

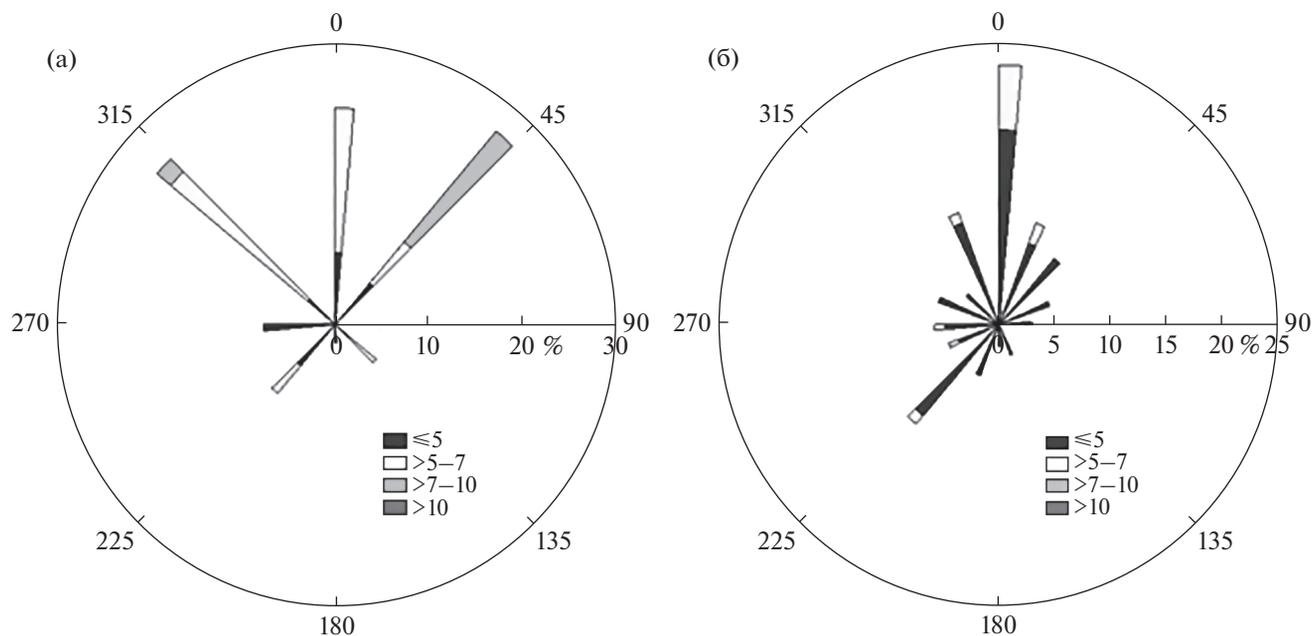


Рис. 4. Повторяемость направления ветра в период проведения работ (22.06–06.07.2015 г.) по судовым данным (а) и по данным метеостанции в пос. Ича (б).

ность 1 сутки. Подробное описание методов оценки точности, валидации и модельных расчетов данных находится в Руководстве пользователя и Руководстве по качеству данных, доступных по ссылкам [18, 20]. Для настоящей работы мы провели пространственную и временную выборку данных о проекциях скоростей на горизонте 0 м для периода исследования в пределах рассматриваемой акватории с 22 июня по 09 июля 2015 г.

Ежедневные данные о геострофических течениях на поверхности, рассчитанные по альтиметрической информации со спутников, также получены с веб-портала Copernicus [14]. Эти данные находятся в составе продукта SEALEVEL\_GLO\_PHY\_L4\_REP\_OBSERVATIONS\_008\_047 и представляют собой зональную и меридиональную компоненты скорости течений в узлах регулярной сетки с шагом  $1/4$  градуса по широте и долготе, что соответствует четвертому уровню обработки данных дистанционного зондирования Земли. Руководство пользователя и Руководство по качеству данных находятся по ссылкам [19, 21].

Для характеристики ветрового режима в период проведения работ использовали данные судовых наблюдений и данные измерений на метеорологической станции в пос. Ича (55°35' с.ш.; 155°35' в.д.; 4 м над уровнем моря) [10]. Эти данные находятся в общем доступе и предоставляются компанией ООО «Расписание Погоды» по договору с Росгидрометом.

Картографическую визуализацию всех данных проводили с помощью программ Surfer 10 (Golden Software, Inc.) и Ocean Data View 4.7.4 [22].

Статистический анализ данных осуществлялся с помощью специализированного программного пакета Statistica 8.0 (StatSoft, Inc.). Расчет статистических характеристик (стандартного отклонения  $s$ , ошибки среднего  $m$  и т.д.), реализованный в данной программе, выполняется по стандартным формулам [2, 7].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В период проведения работ у Северо-Западной Камчатки преобладали ветры северных направлений. Об этом наглядно свидетельствуют графики повторяемости направлений ветра, полученные по данным судовых наблюдений и по данным измерений на метеорологической станции в пос. Ича (рис. 4). По данным с метеостанции, повторяемость ветров северных румбов (от северо-запада

Таблица 2. Характеристики датчиков SBE 19plus

	Температура, °С	Электропроводность, См/м	Давление, дбар
Диапазон	–5...+35	0–9	0–3500
Разрешение	0.0001	0.00005	0.02% от диапазона шкалы
Точность	±0.005	±0.0005	0.1% от диапазона шкалы

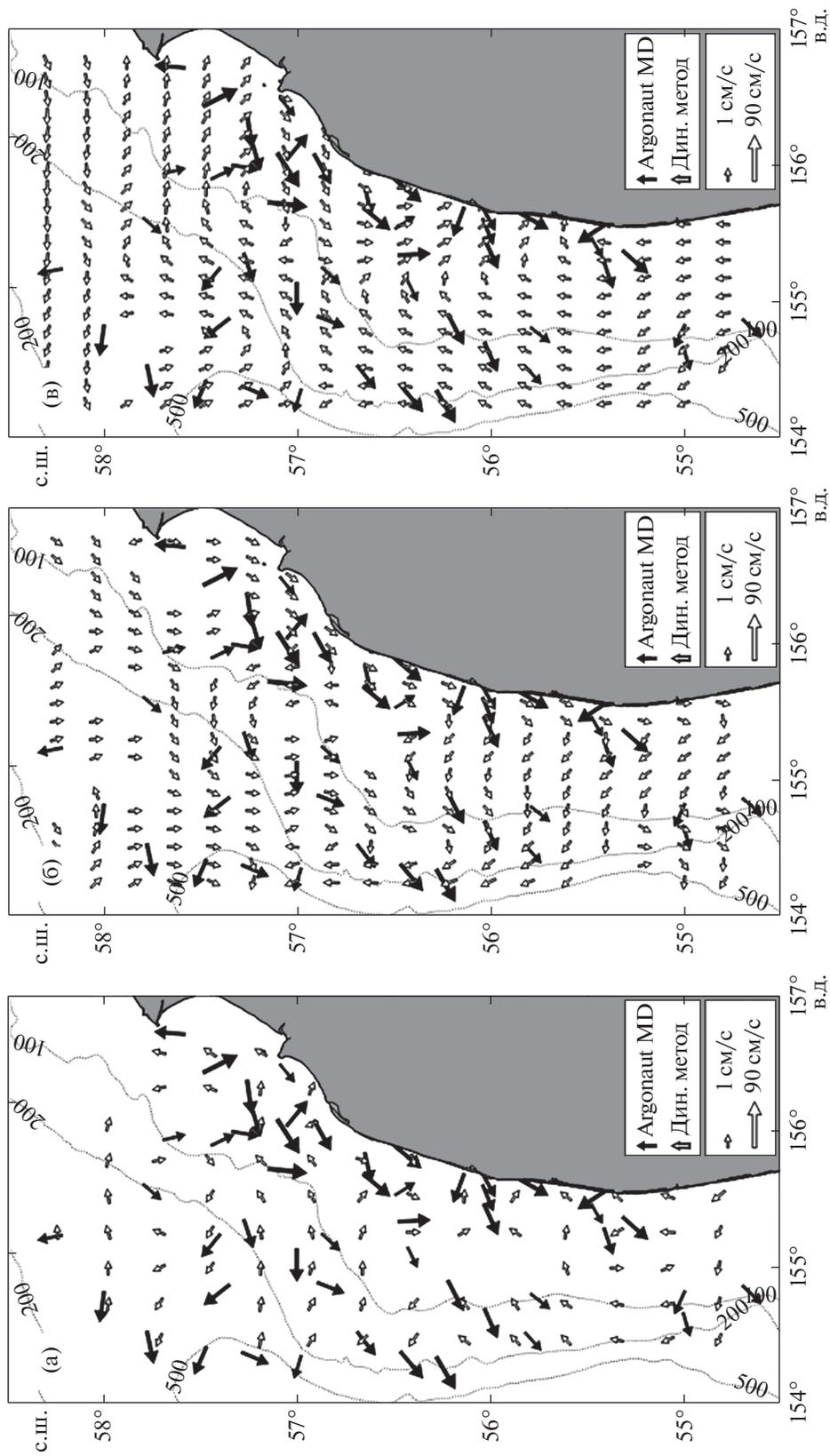


Рис. 5. Комбинированные схемы переноса вод на поверхности у северо-западного побережья Камчатки: а — по данным прямых измерений и расчетов стандартным динамическим методом относительно 200 дбар, б — по данным прямым измерениям и численного моделирования, в — по данным прямых измерений и спутниковых альтиметрических измерений. Тонкие линии — изобаты (м).

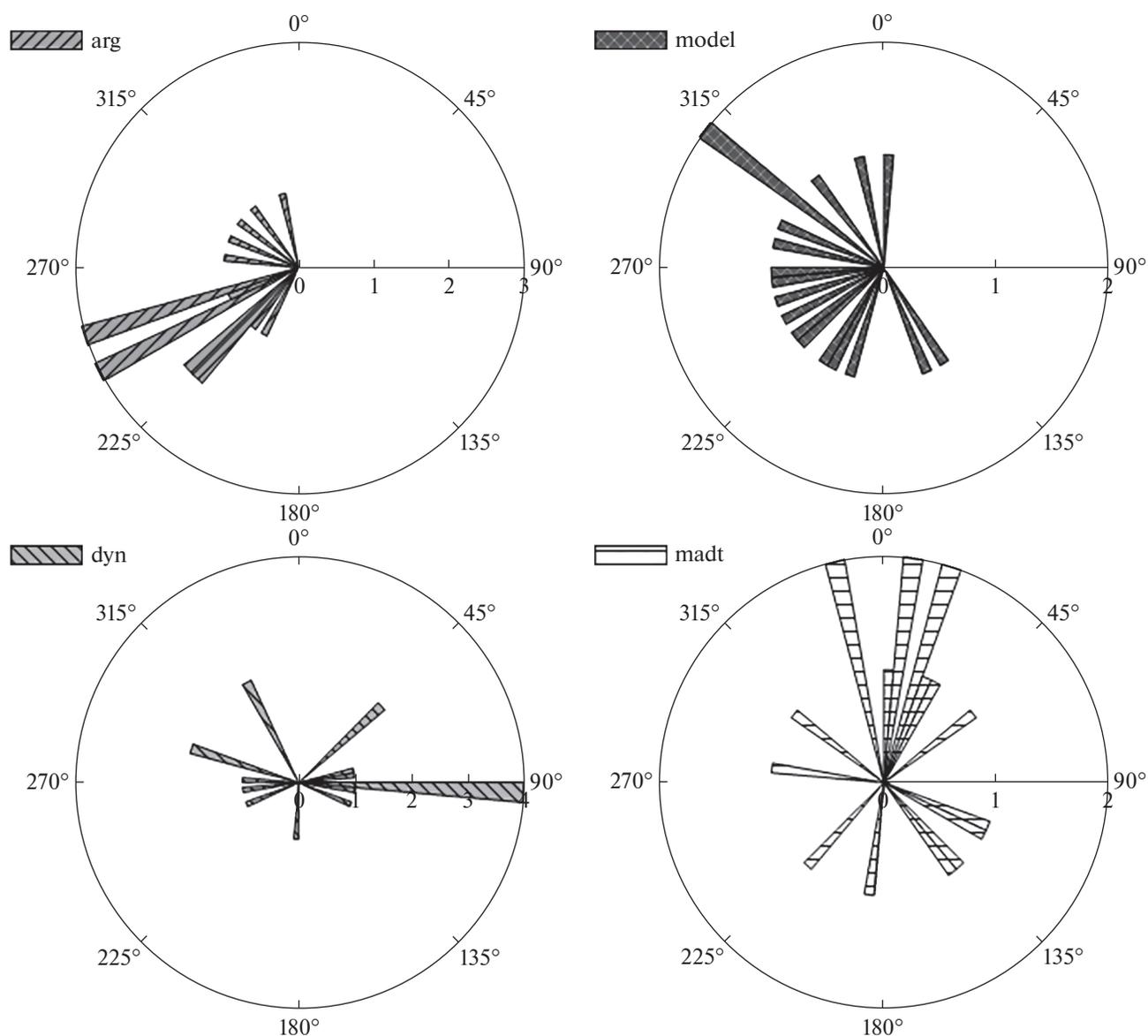
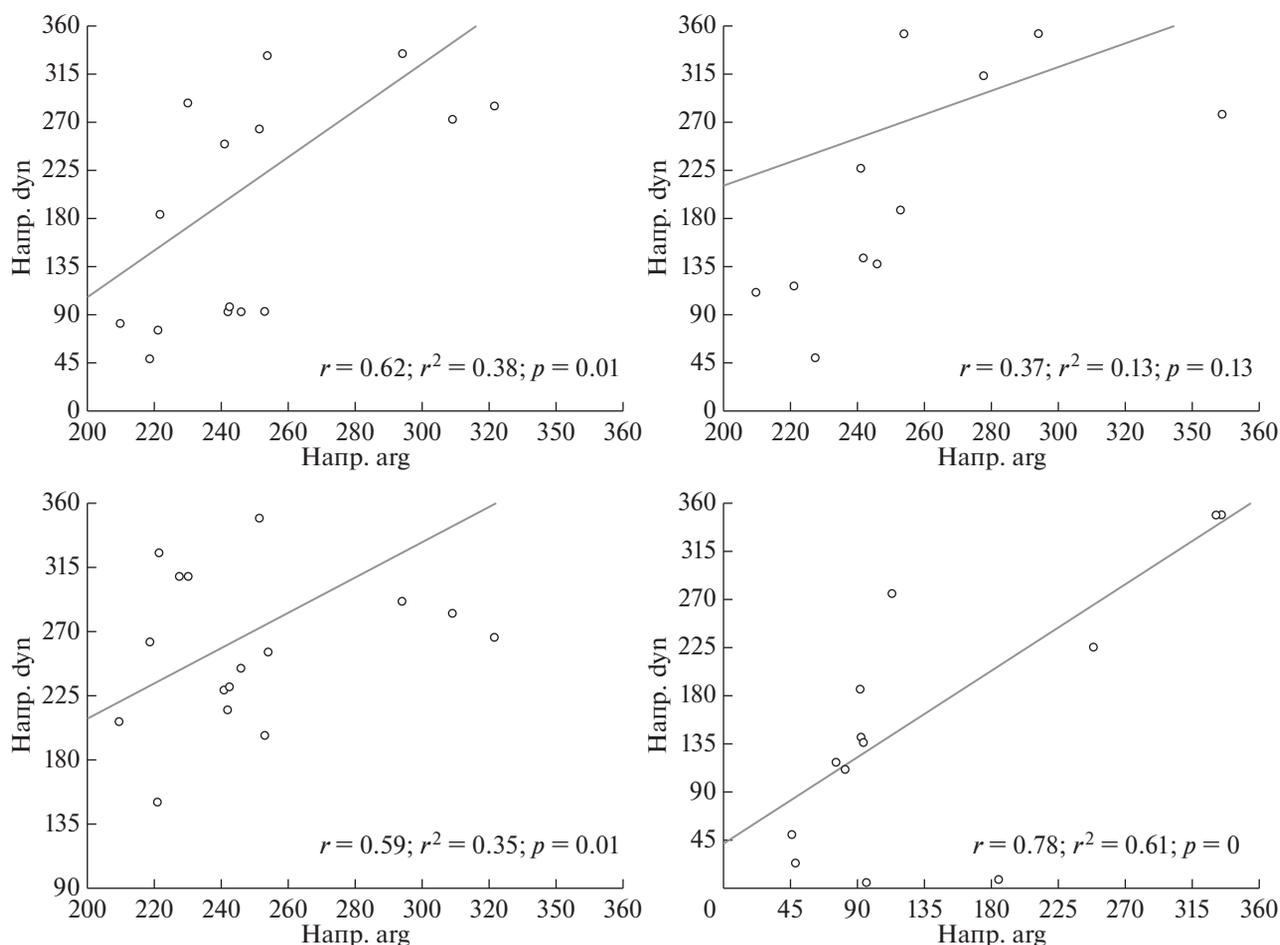


Рис. 6. Повторяемость направления течений: arg — прямые измерения, model — модель, dyn — динамический метод, madt — альтиметрические измерения.

до северо-востока) составила 60%, в то время как по судовым наблюдениям она была заметно выше и соответствовала 80%. В первом случае значения скорости и направления осредненного переноса воздуха составили 1.6 м/с и 338°, во втором — 2.0 м/с и 358°.

На рисунке 5 представлено картографическое отображение направления и скорости течений на поверхности по данным прямых измерений на гидрологических станциях. На картах выполнено наложение на схемы переноса, построенные по данным расчетов стандартным динамическим методом (рис. 5а), численного моделирования (рис. 5б) и спутниковых альтиметрических измерений (рис. 5в).

По данным контактных измерений, среднее направление потока вод поверхностного слоя, в целом, хорошо согласуется с направлением ветрового воздействия. Так, практически на всей обследованной акватории наблюдались течения западного и юго-западного направлений, а значение среднего направления переноса составило 239° (рис. 6). Лишь в мелководной прибрежной зоне наблюдались заметные отклонения от общего переноса. Вероятно, их причина связана с приливо-отливными явлениями или изменчивостью ветрового воздействия. Измеренная скорость течений на поверхности изменялась от 25.1 до 73.9 см/с, в среднем по акватории составила 46.5 см/с ( $N = 49$ ,  $s = 12.8$  см/с,  $N$  здесь и ниже по



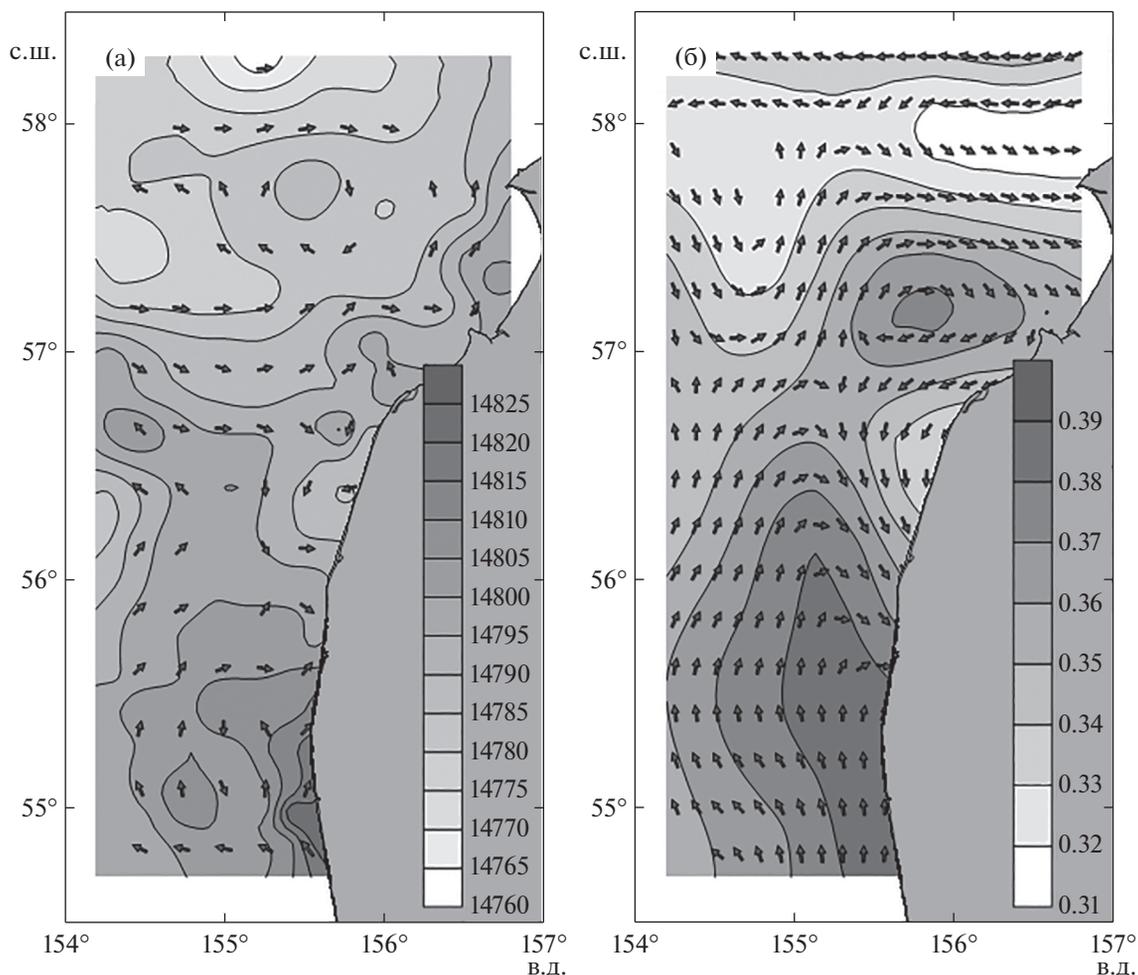
**Рис. 7.** Двухмерные диаграммы рассеяния и линии регрессии для данных направления течений (в градусах): arg – прямые измерения, model – модель, dyn – динамический метод, madt – альтиметрические измерения.

тексту – величина выборки). При этом наибольшие значения были отмечены на разных участках акватории и были связаны с локальным усилением ветров в сроки выполнения гидрологических станций (или предшествующий им некоторый период времени).

Перенос вод на поверхности по данным численного моделирования так же, как и по данным прямых наблюдений, достаточно хорошо отражал направление преобладающих ветров (рис. 5б), что связано с учетом в модели передачи импульса потока от приповерхностных ветров на поверхность моря [20]. На большей части обследованного района наблюдался южный и юго-западный перенос вод, а среднее направление потока соответствовало 241 градусу (рис. 6). В результате статистического анализа была выявлена значимая линейная связь между направлениями течений, вычисленными моделью и измеренными напрямую посредством Argonaut MD (рис. 7). Коэффициент корреляции соответствует 0.53 при уровне значимости  $p = 0.01$ . Значения скорости течений

варьировали в пределах рассматриваемой акватории от 0.1 см/с до 13.8 см/с, в среднем –  $2.8 \pm s$  см/с ( $N = 285, s = 2.1$  см/с). Такие расхождения в значениях модуля скорости между данными модельных расчетов и контактных измерений обусловлены недооценкой скорости в моделях. В частности, разработчики модельного набора данных GLOBAL\_ANALYSIS\_FORECAST\_PHYS\_001\_024 отмечают, что недооценки скорости течений колеблются от 20% в сильных потоках до 60% в слабых потоках [20], что установлено путем сопоставления спутниковой альтиметрической информации с данными дрейфующих буев. Причиной тому является сложность учета и поэтому невключение в модели высокочастотных колебаний уровня океана, в особенности таких, как эффекты атмосферного давления и приливотливные явления.

Для более наглядного рассмотрения схем геострофических течений на рис. 8 представлены карты динамической топографии, построенные по данным спутниковых альтиметрических изме-



**Рис. 8.** Динамическая топография у северо-западного побережья Камчатки: (а) — по данным расчетов стандартным динамическим методом относительно 200 дбар (дин. мм), (б) — по данным спутниковых альтиметрических измерений (м).

рений и расчетов стандартным динамическим методом. Среди общих особенностей распределения отметим повышенные значения уровня на участке вдоль центрального побережья Западной Камчатки и пониженные — на западе и на севере рассматриваемого района. В результате сопоставления углов направления геострофического переноса выявлена статистически значимая линейная связь. Коэффициент корреляции составил 0.78 при уровне значимости  $p = 0.00$  (рис. 7). Однако, несмотря на то, что динамическая топография и направление переноса хорошо согласовывались, линейная связь при сопоставлении модулей скорости не прослеживалась (рис. 9). По всей видимости, это связано с рассогласованием измерений по времени.

В схеме геострофического переноса вод на поверхности, построенной по результатам расчетов стандартным динамическим методом относительно изобарической поверхности 200 дбар, в большей степени, чем по другим данным, просле-

живалась вихревая структура (рис. 5а, 8а). Один ярко выраженный вихрь наблюдался в южной части района, другой — на его севере в горле залива Шелихова. Оба имели антициклоническую направленность. Кроме этого, относительно мощные потоки были отмечены в южной прибрежной части района, где скорость геострофического течения достигала 10–11 см/с за счет динамических градиентов, обусловленных материковым стоком. Значения скорости течений в пределах всей рассматриваемой акватории изменялись от 0.4 см/с до 11.0 см/с, среднее значение составило  $3.0 \pm s$  см/с ( $N = 85$ ,  $s = 1.8$  см/с). При этом среднее по району исследований направление переноса соответствовало 54 градусам, что практически противоположно направлению осредненного переноса по данным прямых измерений.

Скорость геострофических течений, рассчитанных по данным спутниковых измерений уровня океана, изменялась от 0.1 до 11.2 см/с, в среднем составив  $4.3 \pm s$  см/с ( $N = 130$ ,  $s = 2.3$  см/с)

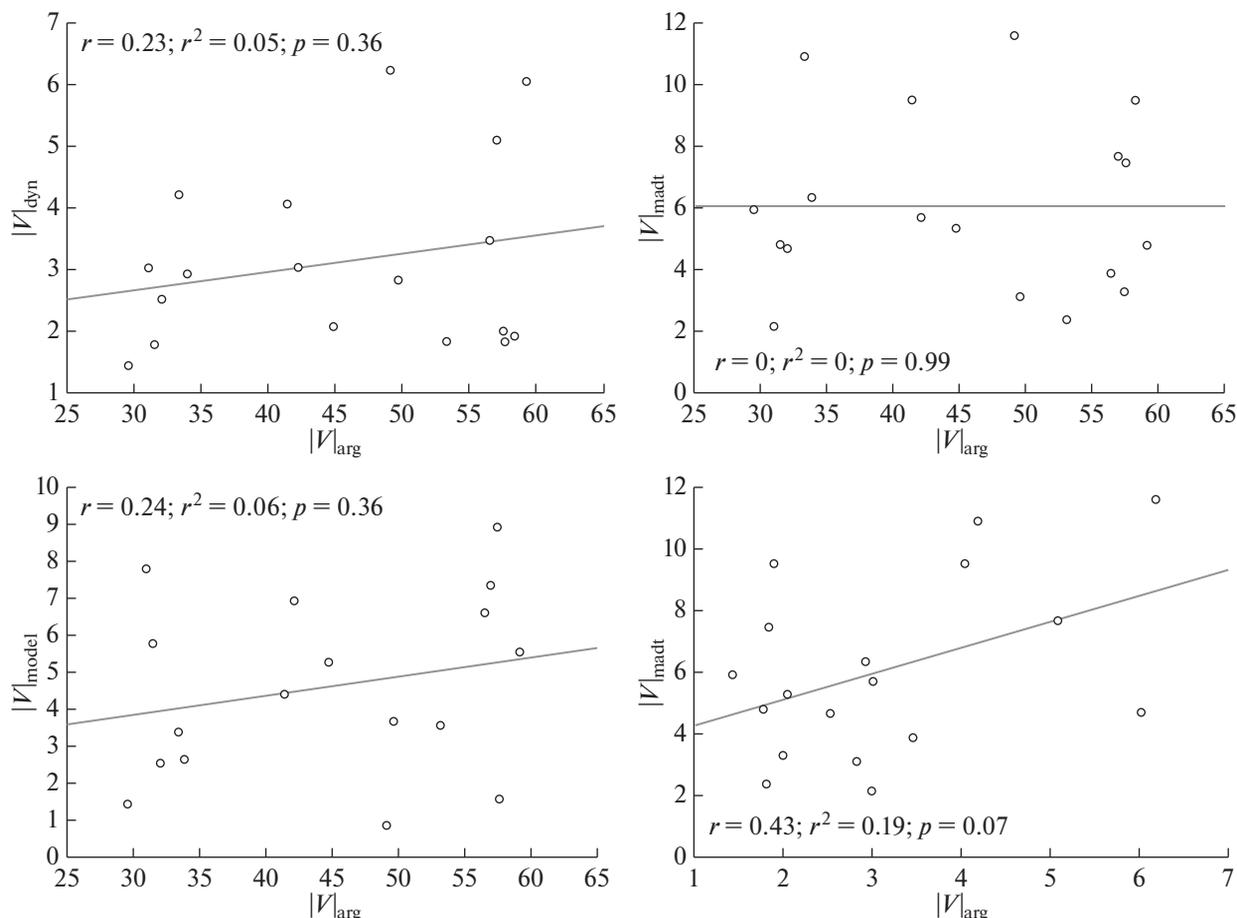


Рис. 9. Двухмерные диаграммы рассеяния и линии регрессии для данных модуля скорости течений (в см/с):  $|V|_{\text{arg}}$  – прямые измерения,  $|V|_{\text{dyn}}$  – динамический метод,  $|V|_{\text{model}}$  – модель,  $|V|_{\text{imadt}}$  – альтиметрические измерения.

(рис. 5в). При этом скорость среднего переноса на поверхности составила 0.6 см/с, а его направление – 360 град. Согласно схеме пространственного распределения течений, всю южную половину исследованной акватории охватывал поток северного направления. В северной части района так же, как и по данным, рассчитанным динамическим методом, наблюдался круговорот антициклонической направленности, однако по пространственному положению он находился несколько южнее. К западу от этого круговорота наблюдался сопряженный с ним циклонический вихрь.

В соответствии с приведенными схемами течений очевидны существенные различия между данными прямых измерений и данными расчетов различными диагностическими методами. Особенно это прослеживается между значениями модуля скорости.

В табл. 3 приведены характеристики течений на некоторых станциях ( $N = 18$ ). Для ежедневных данных, полученных с веб-портала исследовательской программы Copernicus, значения при-

водили по дате и координатам станций, на которых выполняли прямые измерения. Превышение скоростей течений, измеренных посредством Argonaut MD, в среднем по выборке станций составило:  $39.4 \pm s$  см/с ( $s = 11.6$  см/с) относительно данных расчетов по спутниковым альтиметрическим измерениям,  $39.9 \pm s$  см/с ( $s = 10.5$  см/с) по сравнению с данными модели и  $42.3 \pm s$  см/с ( $s = 11.0$  см/с) по сравнению с данными расчетов динамическим методом.

В относительных величинах абсолютные скорости превышали геострофические, рассчитанные динамическим методом, в среднем в 17 раз и в 9 раз – с данными спутниковой альтиметрии. Относительно данных численного моделирования, скорость течений по инструментальным измерениям превышала в 14 раз. В процентном отношении доля переноса на поверхности по модельным расчетам в среднем составила 12% от измеренных, по расчетам динамическим методом – 7%, а по данным спутниковых альтиметрических измерений – 14%.

**Таблица 3.** Скорость и направление течений в поверхностном слое: данные прямых измерений Argonaut MD, данные спутниковых альтиметрических измерений, данные, рассчитанные численной моделью и стандартным динамическим методом на некоторых станциях, а также данные о скорости и направлении дрейфа НИС “Профессор Кизеветтер”

№ ст.	Данные о сносе судна по GPS		Данные Argonaut MD		Данные численного моделирования		Данные, рассчитанные стандартным динамическим методом		Данные, рассчитанные по спутниковым альтиметрическим измерениям	
	$ I_{ship}$ , см/с	Напр., град	$ I_{arg}$ , см/с	Напр., град	$ I_{model}$ , см/с	Напр., град	$ I_{dyn}$ , см/с	Напр., град	$ I_{madr}$ , см/с	Напр., град
139	16.2	280	33.9	294	2.6	291	2.9	335	6.3	349
140	21.6	280	32.0	254	2.5	255	2.5	332	4.7	349
144	64.9	210	57.0	222	7.3	324	5.1	185	7.7	8
149	37.9	230	41.5	251	4.4	349	4.1	264	9.5	17
155	21.6	210	31.0	228	7.8	308	3.0	46	2.2	51
156	27.1	250	31.5	218	5.8	263	1.8	49	4.8	24
160	48.7	180	56.5	210	6.6	207	3.5	82	3.9	111
161	43.3	210	42.2	242	6.9	215	3.0	92	5.7	142
163	48.7	230	57.5	246	8.9	244	2.0	94	3.3	137
169	54.1	240	59.2	230	5.5	308	6.0	289	4.7	8
171	48.7	220	57.6	243	1.6	231	1.9	97	7.5	5
197	27.1	345	53.3	322	3.6	265	1.8	286	2.4	17
199	37.9	300	44.7	309	5.3	282	2.1	273	5.3	25
203	43.3	330	49.7	278	3.7	5	2.9	91	3.1	310
204	5.1	—	33.4	349	3.4	159	4.2	114	10.9	275
208	21.6	250	29.5	221	1.5	149	1.4	76	5.9	118
216	48.7	220	58.3	241	21.2	228	1.9	249	9.5	225
227	32.5	230	49.1	253	0.8	197	6.2	92	11.6	186

## ВЫВОДЫ

В результате сопоставления рядов данных скорости течений, полученных посредством прямых измерений и различными расчетными методами, статистически значимых линейных связей обнаружено не было. Значительное занижение скоростей геострофических течений на поверхности относительно абсолютных свидетельствует о доминирующей роли агеострофической составляющей в общей картине циркуляции. Ее доля соответствовала 93% по данным расчетов динамическим методом и 86% — по данным спутниковых альтиметрических измерений. По сравнению с данными расчетов моделью, измеренные значения скорости были выше на 88%, что обусловлено недооценкой скоростей в модели.

В результате сопоставления рядов данных углов направления, напротив, были выявлены зна-

чимые корреляции между геострофическими течениями, рассчитанными динамическим методом и по данным альтиметрических измерений, а также между данными контактных измерений и данными модели. Так, в первом случае коэффициент линейной корреляции составил 0.78 ( $p = 0.00$ ), а во втором — 0.53 ( $p = 0.01$ ).

Существенным минусом данных прямых измерений течений является их сложная интерпретация, связанная с учетом метеорологических условий и фазы приливно-отливных волн в момент наблюдений. Также необходим учет ошибки, возникающей при определении дрейфа измерителя (например, вместе с судном, при выполнении станции), если измерения выполняются не заякоренным способом. Получаемые таким образом данные на разных участках акватории далеко не всегда могут дать представление о простран-

ственной схеме циркуляции вод в исследуемом районе. Для получения режимных характеристик течений возникает необходимость длительных наблюдений с покрытием значительной акватории, используя большое количество измерителей течений. Однако такого рода измерения могут быть весьма ценными при решении других важных океанологических проблем, например, изучении вертикальной структуры скорости течений и т.п.

Положительным качеством рассмотренных в работе наборов данных, полученных через веб-портал Copernicus, следует признать хорошее пространственное и временное разрешение, доступность и небольшое количество времени, требуемое на обработку. Эта информация может использоваться в целях оперативного гидрологического мониторинга при решении различных рыбохозяйственных и экологических задач. Однако для района северо-восточной части Охотского моря необходимо принимать во внимание дрейфовую составляющую и приливно-отливные течения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алейник Д.Л., Шапиро Г.И., Ми Л.Д., Лемешко Е.М.* Опыт измерения скорости течений в Черном море с помощью опускаемого акустического профилографа // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 1. С. 141–149.
2. *Афифи А., Эйзен С.* Статистический анализ: подход с использованием ЭВМ. М.: Мир, 1982. 488 с.
3. *Бережинский О.А., Зимин А.В., Шнар В.Н.* Программный комплекс для обработки, хранения и анализа океанологических данных, получаемых с помощью различных СТД-зондов // Тез. докл. научно-практической конференции “Перспективы развития рыбохозяйственного комплекса России – XXI век”. М.: ВНИРО, 2002. С. 34–35.
4. *Берникова Т.А.* Гидрология и промысловая океанология. М.: Пищевая промышленность, 1980. 240 с.
5. *Зубов Н.Н., Мамаев О.И.* Динамический метод вычисления элементов морских течений. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 116 с.
6. *Левасту Т., Хела И.* Промысловая океанография. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 295 с.
7. *Леонов В.П.* Обработка экспериментальных данных на программируемых микрокалькуляторах. (Прикладная статистика на БЗ-34, МК-52, МК-54, МК-56, МК-61). Томск: Изд-во Томского ун-та, 1990. 376 с.
8. *Лучин В.А.* Циркуляции вод Охотского моря и особенности ее внутригодовой изменчивости по результатам диагностических расчетов // Тр. ДВНИИ. 1987. Вып. 36. С. 3–11.
9. *Мамаев О.И.* Физическая океанография. Избранные труды. М.: Изд. ВНИРО, 2000. 364 с.
10. ООО “Расписание Погоды”: <http://gp5.ru>; информация о сайте и источниках данных: <http://gp5.ru/docs/about/gu>.
11. *Помазанова Н.П.* Поверхностные течения в северных и восточных промысловых районах Охотского моря в летние месяцы // Тр. ДВНИГМИ. 1970. Вып. 30. С. 94–104.
12. *Ростов И.Д., Юрасов Г.И., Рудых Н.И. и др.* Атлас по океанографии Берингова, Охотского и Японского морей. Владивосток: ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2001. 106 с.
13. *Фигуркин А.Л.* Циркуляция вод западнокамчатского шельфа // Комплексные исследования экосистем Охотского моря. М.: ВНИРО, 1997. С. 25–29.
14. *Хен Г.В., Фигуркин А.Л., Ванин Н.С. и др.* Исследование пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических условий восточной части Охотского моря (Западно-Камчатский район) // Отчет по х/д 07-01 от 19.01.2001 г. Владивосток: ТИПРО-центр, 2001. 85 с.
15. *Чернявский В.И.* Циркуляционные системы Охотского моря // Изв. ТИПРО. 1981. Т. 105. С. 13–19.
16. Copernicus Marine Environment Monitoring Service: <http://marine.copernicus.eu/>.
17. *Madec G.* NEMO ocean engine. Note du P<sup>o</sup>le de mod<sup>e</sup>lisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No 27, ISSN No 1288–1619, 2016. 386 p.
18. Product User Manual (CMEMS-GLO-PUM-001-024). URL: <http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-GLO-PUM-001-024.pdf> [Электронный ресурс].
19. Product User Manual (CMEMS-SL-PUM-008-032-051). URL: <http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SL-PUM-008-032-051.pdf> [Электронный ресурс].
20. Quality Information Document (CMEMS-GLO-QUID-001-024). URL: <http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf> [Электронный ресурс].
21. Quality Information Document (CMEMS-SL-QUID-008-032-051). URL: <http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-SL-QUID-008-032-051.pdf> [Электронный ресурс].
22. *Schlitzer R.* Ocean Data View, <http://odv.awi.de>, 2015.
23. *Stewart R.* Introduction to physical oceanography. Department of Oceanography Texas A & M University. 2008. 353 p.
24. *Visbeck M.* Deep velocity profiling using lowered acoustic Doppler current profiler: Bottom track and inverse solutions // J. Atmos. Oceanic Technol. 2002. V. 19. № 5. P. 794–807.

**A Comparison of the Surface Currents Data from In Situ Observations with Data Derived of Numerical Model, Data of Satellite Altimetric Measurements and Results of Calculations by the Dynamic Method for the Sea of Okhotsk near the North-Western Coast of Kamchatka**

**V. V. Kolomeytsev, O. B. Tepnin**

The schemes of the surface flows at the North-West of Kamchatka, built on the basis of the in situ observations data, data derived by numerical model, data of satellite altimetric measurements and calculated by the dynamic method are shown. Characteristics of the flows obtained by various methods have been compared. Between the velocities of absolute and geostrophic currents, no statistically significant linear bonds were detected. A linear dependence was observed between the directions of geostrophic flows calculated by the standard dynamic method and from satellite altimetry data, as well as between directions measured by Argonaut MD and the calculated model. The proportion of the ageostrophic and geostrophic components of the currents have been estimated. According to the calculations of geostrophic currents by different methods, it was 86 to 93%. A significant limitation of this data is the difficulty of interpreting them. They may not always give a perfect presentation of stable water circulation in the researched area.