

УДК 551.465(265.54)

**В.Д. Будаева, Ю.И. Зуенко, В.Г. Макаров
(ДВНИГМИ, г. Владивосток; ТИНРО-центр, г. Владивосток;
Межотраслевой центр морских наук Национального
политехнического института, г. Ла Пас, Мексика)**

СТРУКТУРА И ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД БУХТЫ СУХОДОЛ (УССУРИЙСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

Рассмотрены структура и циркуляция вод в бухте Суходол по результатам натурных наблюдений и моделирования течений для типовых ветровых условий. В летне-осенний период в бухте наблюдается двухслойная плотностная структура и развивается двухслойная циркуляция вод, обусловленная действием ветра на морскую поверхность. Водообмен бухты с открытой частью Уссурийского залива усиливается в условиях летнего муссона и ослабевает при северных ветрах.

Budaeva V.D., Zuenko Yu.I., Makarov V.G. Water structure and circulation in the Sukhodol Bay (Ussuri Bay, Japan Sea) // *Izv. TINRO.* — 2006. — Vol. 146. — P. 226–234.

Water structure and circulation in the Sukhodol Bay are considered on the data of oceanographic survey and hydrodynamic numerical modeling for typical wind conditions. In summer-autumn, two-layers density structure is formed in the Bay under influence of river run-off. Wind driven currents prevail in the Bay, which have a two-layers structure, as well, with the currents of approximately the same direction as wind and velocity up to 5–10 cm/s in the upper layer, and countercurrents with velocity 1–3 cm/s at the bottom. Fluctuation of river fresh water discharge doesn't change significantly the patterns of water circulation. Water exchange between the Bay and adjacent waters strengthens in conditions of summer monsoon but is weakened by north winds.

После временного спада хозяйственной активности в 1990-е гг. прибрежная зона южного Приморья вновь становится объектом интенсивного промышленного освоения, причем не только как район с существенными биологическими и другими сырьевыми ресурсами, но и как место реализации крупных гидротехнических проектов, включая строительство новых портов. Для рационального природопользования на морских акваториях необходим учет особенностей режима вод, в частности циркуляции вод. Так, например, знание схемы течений в районах нереста рыб или донных беспозвоночных позволяет судить о направлении переноса их икры и личинок, что, с одной стороны, может быть важно для прогноза их выживаемости, с другой — дает возможность оптимизировать расстановку коллекторов для сбора спата. При гидротехническом строительстве, в ходе которого неизбежно происходит загрязнение вод минеральной взвесью и другими поллютантами, знание режима течений позволяет оценить степень загрязнения, а главное — направление его распространения.

Особенность прибрежной зоны моря состоит в том, что все параметры среды здесь чрезвычайно изменчивы в пространстве и практически каждому эле-

менту орографии (заливу, бухте, мысу) свойственны собственные локальные черты: местные модификации водных масс, местные схемы циркуляции вод и т.п., зачастую не похожие на региональные. Но для практического применения необходимы сведения именно о локальном режиме вод. Поэтому исследователи прибрежной зоны в районах интенсивного освоения сталкиваются с парадоксом: несмотря на то что эти районы наиболее изучены, они же являются одновременно и изученными недостаточно, так как практика требует здесь гораздо более подробной информации об условиях среды, чем для открытого моря или для слабоосваиваемых прибрежных районов.

Ярким примером такого парадокса является район бухты Суходол, расположенной в северо-восточной части Уссурийского залива. Режим вод Уссурийского залива, как и зал. Петра Великого в целом, изучен хорошо, однако имеющиеся сведения малоприменимы для океанологического обеспечения рациональной эксплуатации биоресурсов бухты или гидротехнического строительства в ней. Известно, например, что основным элементом циркуляции вод в восточной части зал. Петра Великого в поверхностном слое является ветвь Приморского течения, которая достигает юго-западной части Уссурийского залива и обуславливает антициклонический круговорот в его южной глубоководной части (Истошин, 1950; Иващенко, 1993). Однако наблюдения над распространением шлейфа распресненных вод из эстуариев рек Суходол (Кангауз) и Петровка (Шитаухэ), впадающих в бухту Суходол, указывают на противоположное, циклоническое, движение вод в бухте (Афейчук и др., 2004). Специальные исследования циркуляции вод в бухте Суходол до сих пор не проводились.

Основной целью работы является моделирование течений в бухте Суходол и прилегающем к ней районе в теплый период года для типичных метеорологических условий.

Описание района исследований

Бухта Суходол расположена на восточном берегу Уссурийского залива между мысом Азарьева и мысом Красным (рис. 1). Осевая протяженность бухты составляет 5–7 км. Глубины в бухте относительно невелики (до 10–15 м). Дно бухты сложено песками, илами, у северного берега имеются выходы коренных пород. Бухта хорошо защищена от господствующих летом южных и юго-восточных ветров (Лоция ..., 1984).



Рис. 1. Батиметрия бухты Суходол и окрестностей

Fig. 1. Bathymetry of the Sukhodol Bay

Бухта Суходол относится к районам, в теплое время года в значительной степени подверженным влиянию материкового стока. Между сильно распресненной северо-восточной частью бухты и ее юго-западной частью, подверженной

влиянию открытых вод Уссурийского залива, формируется эстуарный фронт, хорошо заметный на всех горизонтах от поверхности до дна моря (Афейчук и др., 2004).

Натурные наблюдения над течениями в бухте и ее окрестностях ограничиваются наблюдениями за дрейфом бутылок, выполненными в мае—июне 1938 г. и в мае 1939 г. (Истошин, 1950), и анализом особенностей распределения термохалинных параметров на акватории бухты методом “ядра” в июне и сентябре 2002 г. (Афейчук и др., 2004). Схемы вероятных путей бутылок, выброшенных в зоне Приморского течения у берегов Приморья, указывают на существование ветви Приморского течения, достигающей Уссурийского залива, причем большая часть бутылок была найдена на его восточном побережье, включая бухту Суходол. Однако этот факт никак не помогает в установлении характера циркуляции вод в бухте из-за несоответствия масштабов эксперимента с бутылками и бухты. Результаты анализа методом “ядра” однозначно указывают на наличие циклонической циркуляции вод в поверхностном слое бухты Суходол (рис. 2), что косвенно подтверждается и распределением личинок анадары *Anadara broughtonii*, выносимых с нерестилища у мыса Азарьева. Но в условиях прибрежной зоны этот метод пригоден для исследования циркуляции лишь в тонком приповерхностном слое, где распространяется шлейф эстуарных вод, причем вообще не позволяет оценить скорости течений.

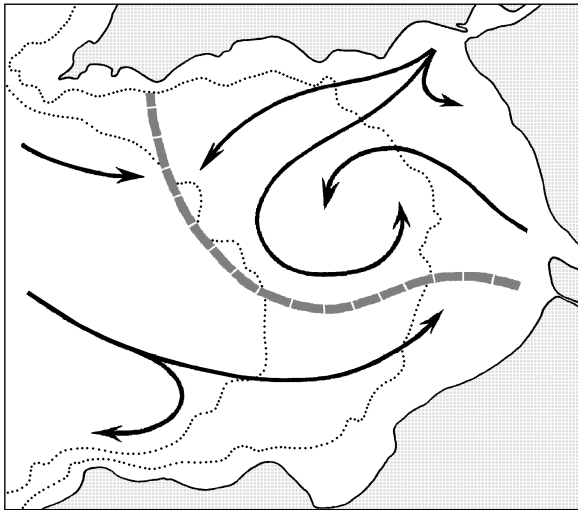


Рис. 2. Схема циркуляции вод на поверхности бухты Суходол, рассчитанная по изменениям термохалинных параметров поступающих в бухту вод (т.е. методом “ядра”). Пунктиром обозначено положение эстуарного фронта на поверхности моря на 11.09.2002 г. (по Афейчук и др., 2004)

Fig. 2. Scheme of water circulation at the sea surface in the Sukhodol Bay determined from features of temperature and salinity distribution (i.e. by “core” method). Estuarine front position at September 11, 2002 is shown by dotted line (after Afeychuk et al. (Афейчук и др., 2004)

Для расчета трехмерных течений в бухте Суходол использована численная бароклинная модель экмановского типа, которая учитывает реальный рельеф дна и конфигурацию берегов, неравномерность распределения плотности воды и приземного ветра, а также расходы воды через жидкие границы (Budaeva, Makarov, 1999). Модель включает параметризацию многослойной вертикальной структуры плотности воды, для аналитического описания которой применяется общая процедура кусочно-криволинейной аппроксимации (Makarov et al., in press). На открытой западной границе используется условие “свободного протекания” для функции полных потоков.

Ранее модель была адаптирована для расчета течений на шельфе восточного Сахалина и в зал. Анива (Budaeva et al., 2004; Будаева и др., 2005).

Положение береговой линии и глубина моря в узлах регулярной сеточной области адаптированы с батиметрической карты Уссурийского залива масштаба 1 : 25000.

Для описания структуры поля плотности использованы данные измерений температуры и солености на 18 станциях, равномерно покрывающих акваторию бухты, выполненных 11 сентября 2002 г. океанографическим зондом-про-

филометром AST-1000p (производство Alec Electronics, Япония) с борта промыслового судна (драгера) РПВ-032, принадлежащего ООО “Уссурийский Казачий Вымпел”.

При расчете дрейфовых течений использованы климатические характеристики ветра на ГМС Владивосток (Климат Владивостока, 1983). По многолетним данным, наиболее типичными для летне-осеннего периода года ветровыми условиями являются южный, юго-восточный ветер со скоростью 6,5 м/с, более обычный в летние месяцы, и северный ветер со скоростью 6,0 м/с, более обычный в осенние месяцы. В сентябре средняя повторяемость ветров с указанными параметрами составляет соответственно 32 и 35 %.

Расходы рек, впадающих в бухту Суходол, оценены косвенным методом — по соотношению площадей их водосборов с площадью водосбора р. Раздольной, среднегодовой расход которой (72 м³/с) известен из наблюдений (Савельева и др., 2005). Из этих соображений среднегодовой расход р. Суходол оценен в 2,0 м³/с, р. Петровка — в 1,7 м³/с. Для рек южного Приморья характерна резкая сезонная изменчивость стока. В период летне-осеннего паводка (август—сентябрь) сбрасывается около 40 % годового стока, т.е. расход в это время в среднем в 2,5 раза выше среднегодового и для рек, впадающих в бухту Суходол, принят в сумме равным 9,1 м³/с. Для учета межгодовой изменчивости стока моделирование выполнено также для условий “водных” и “маловодных” лет, с условно принятыми суммарными расходами соответственно 100 м³/с и 1 м³/с.

Решение строилось на регулярной по горизонтали сетке с разрешением 0,25*0,25 мин. В каждом горизонтальном узле рассчитывали вертикальные профили компонент трехмерного вектора скорости. Течения на заданных горизонтах определяли путем интерполяции каждой компоненты и их последующего векторного сложения.

Структура вод

В сентябре 2002 г. воды бухты Суходол были стратифицированы по всей водной толще и имели двухслойную структуру. На рис. 3 приведены примеры типичных для разных частей бухты вертикальных профилей плотности. В приповерхностном относительно однородном слое толщиной 1–5 м вертикальные градиенты плотности не превышали 0,02–0,13 усл. ед./м. Судя по характерной для этого слоя низкой солености, он был образован местной модификацией поверхностных вод, которую можно отнести к приэстуарным водным массам. Толщина приповерхностного слабо стратифицированного слоя в северной части бухты была заметно (на 1,0–2,5 м) больше, чем в южной, что отражает основное направление распространения вод, поступающих в бухту с материковым стоком. Ниже этого слоя градиенты плотности резко возрастали до 0,23–0,65 усл. ед./м, а затем постепенно уменьшались. Температура придонных вод оставалась высокой (16–19 °С), а соленость умеренной (33,1–33,3 епс), т.е. это не глубинная шельфовая водная масса, в летнее время распространенная у дна зал. Петра Великого (Зуенко, Юрасов, 1995), а поверхностная прибрежная водная масса, оказавшаяся в придонном слое из-за малой глубины места. Сезонный пикноклин в период выполнения съемки находился на глубинах, превышающих максимальную глубину в бухте Суходол.

Горизонтальная структура вод в бухте Суходол формировалась взаимодействием местной поверхностной водной массы приэстуарного типа с поверхностными прибрежными водами, характерными в летнее время для большей части зал. Петра Великого. Более теплые, сильно распресненные приэстуарные воды занимали преимущественно северо-восточную часть бухты, а поверхностные прибрежные воды вторгались в ее юго-западную часть. Водные массы разделялись

эстуарным фронтом, наблюдавшимся в поле всех параметров, причем на всех горизонтах, но наиболее выраженным в поле солености и плотности у дна (рис. 4). Фронт был сильно наклонен и в верхних горизонтах находился значительно мористее, чем у дна. Поскольку речной сток в период проведения съемки оценивается как средний (так как не наблюдалось ни паводка, ни катастрофического осыхания эстуариев), можно полагать, что описанная структура вод бухты Суходол является обычной для летне-осеннего периода, хотя значения термохалинных параметров, разумеется, имеют сезонный ход.

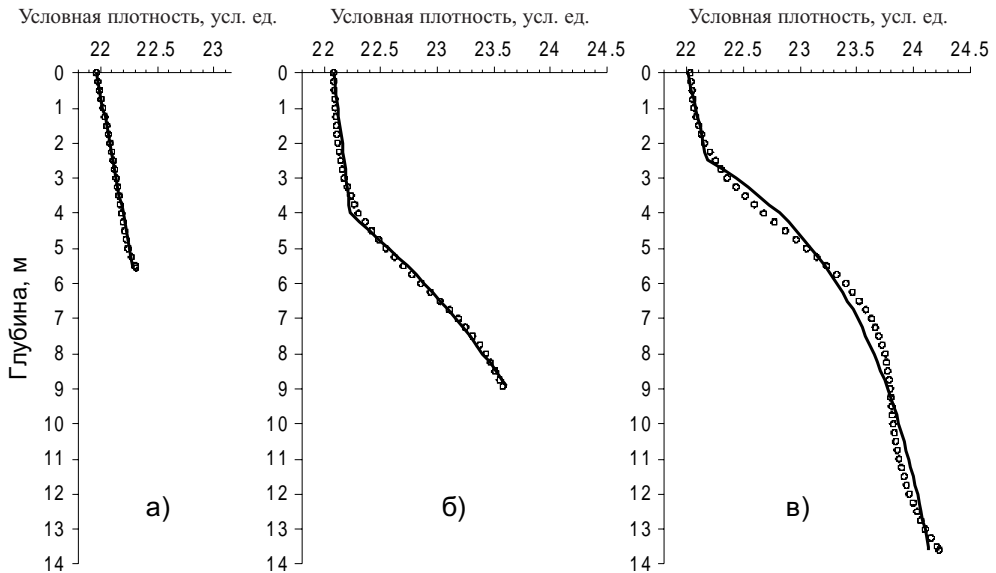


Рис. 3. Типичные вертикальные профили плотности воды в бухте Суходол 11.09.2002 г.: **а** — в вершине бухты, **б** — в северной части, **в** — в юго-западной части бухты. Пунктиром обозначены данные измерений, сплошными линиями — аппроксимация профилей кусочно-криволинейными аналитическими функциями

Fig. 3. Typical vertical profiles of specific density in the Sukhodol Bay in September 11, 2002: **а** — in the top of the Bay, **б** — in the northern part, **в** — in the south-western part. Dotted lines show the measurements, solid lines — results of the profiles approximation by curvilinear analytic functions

Структуру вод бухты Суходол можно рассматривать как типичную для полузакрытых бухт умеренного муссонного климатического пояса с умеренным материковым стоком (как, например, бухта Нарва, зал. Восток, зал. Находка, зал. Ольги).

Динамика вод

Согласно результатам моделирования, в бухте Суходол отсутствуют четко выраженные квазипостоянные морские течения. Поле плотности, формирующееся в результате взаимодействия пресных вод, поступающих с речным стоком, и умеренно соленых вод Уссурийского залива, способствует развитию здесь слабой циркуляции циклонического типа (против часовой стрелки), однако она может быть как угодно трансформирована более сильными воздействиями ветра и стоковых течений.

На рис. 5 и 6 представлены результаты расчета течений, возникающих под действием типичных ветровых условий и среднего материкового стока. Типичный для летнего муссона южный ветер формирует “летний тип” поля поверхностных течений, при котором циклоническая завихренность поля течений в бухте Суходол усиливается, скорости течений достигают 5 см/с (рис. 5). Такой характер циркуляции вод обеспечивает активный водообмен

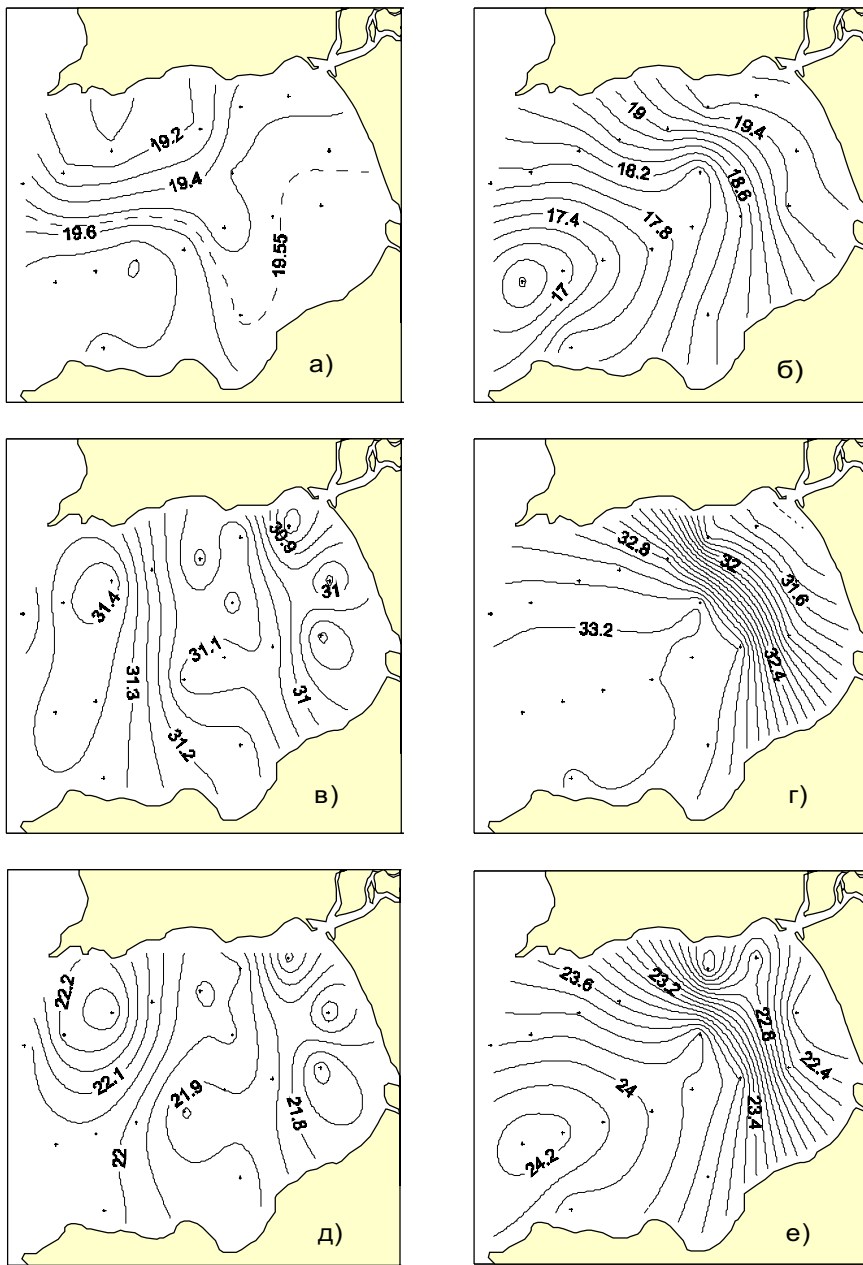


Рис. 4. Распределение термохалинных характеристик в бухте Суходол 11.09.2002 г.: на поверхности моря (а, в, д) и вблизи дна (б, г, е); а, б — температура воды, °С; в, г — соленость, епс; д, е — условная плотность, усл. ед.

Fig. 4. Water parameters at the sea surface (а, в, д) and at the bottom (б, г, е) in September 11, 2002: а, б — temperature, °С; в, г — salinity, psu; д, е — specific density

бухты с прилегающим районом Уссурийского залива. Под действием южного ветра в северной части бухты происходит повышение уровня (нагон) и развивается даунвеллинг. В придонном слое при “летнем типе” развивается слабое компенсационное противотечение с южной составляющей. Изменения величины материкового стока, даже значительные, не оказывают существенного влияния на летнюю динамику вод в бухте. В принципе, увеличение материкового стока приводит к некоторой интенсификации циклонического круговорота, однако из-за доминирования ветровой компоненты цирку-

ляции вод поля течений для условий обычных, маловодных и водных лет практически идентичны.

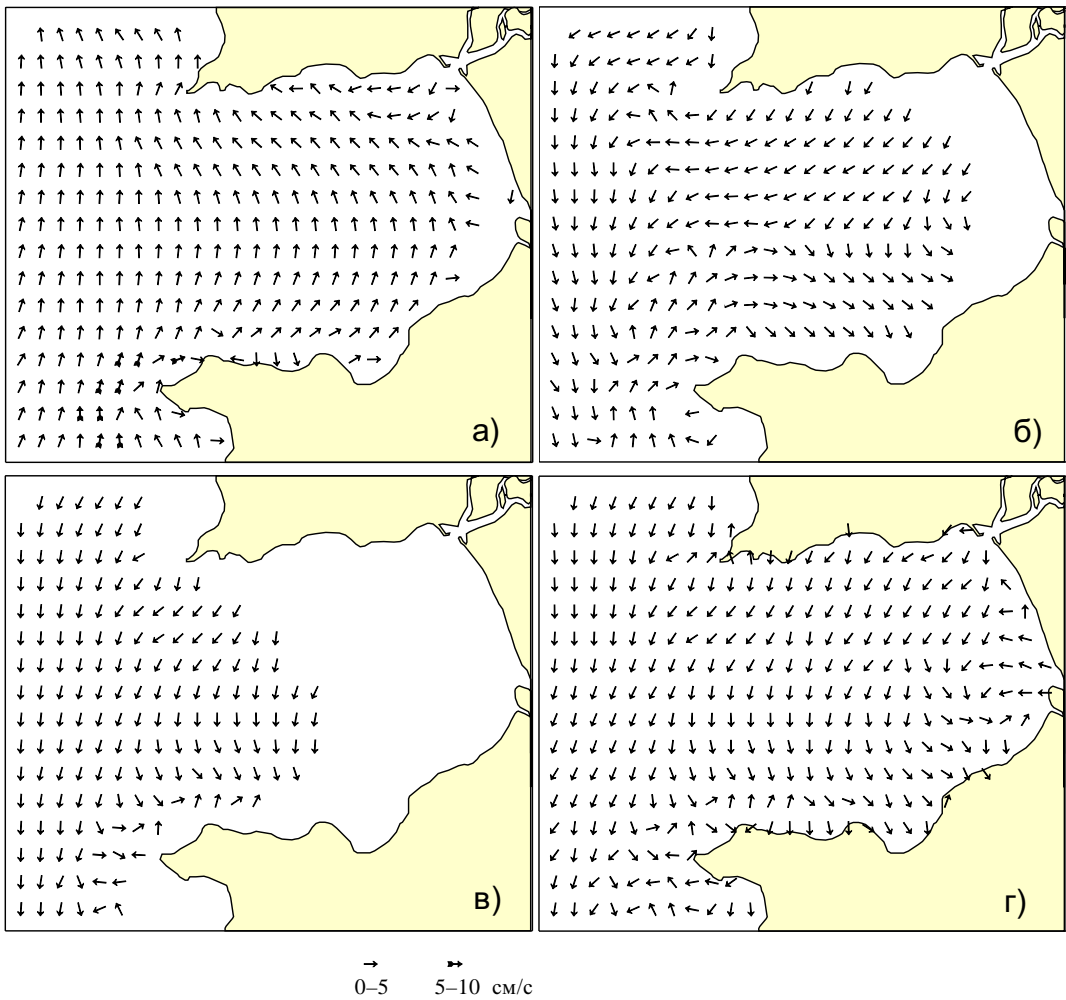


Рис. 5. Расчетные течения в бухте Суходол при южном ветре силой 6,5 м/с и среднем материковом стоке: **а** — на горизонте 1 м, **б** — 5 м, **в** — 10 м, **г** — вблизи дна
 Fig. 5. Modeled currents in the Sukhodol Bay under conditions of south wind 6.5 m/s and medium river discharge: **a** — at 1 m horizon; **б** — 5 m; **в** — 10 m; **г** — at the bottom

Воздействие северных ветров, типичных для зимнего муссона, обуславливает развитие в бухте Суходол южных дрейфовых течений (см. рис. 6). Течения “зимнего типа” отличаются более высокими скоростями (до 5–10 см/с). Сгон поверхностных вод из северной мелководной части бухты вызывает развитие апвеллинга у северного побережья и формирование компенсационного придонного противотечения с северной составляющей у дна бухты. Зимний муссон “раскручивает” в бухте антициклонический вихрь, при этом ее водообмен с Уссурийским заливом ослабевает.

Таким образом, как при южных, так и при северных ветрах в бухте Суходол формируется двухслойная циркуляция, соответствующая двухслойной вертикальной плотностной структуре вод. В приповерхностном слое течения направлены приблизительно по направлению ветра, их скорость может достигать 5–10 см/с. В придонном слое развиваются слабые компенсационные противотечения со скоростями 1–3 см/с. Поле течений определяется прежде всего воздействием вет-

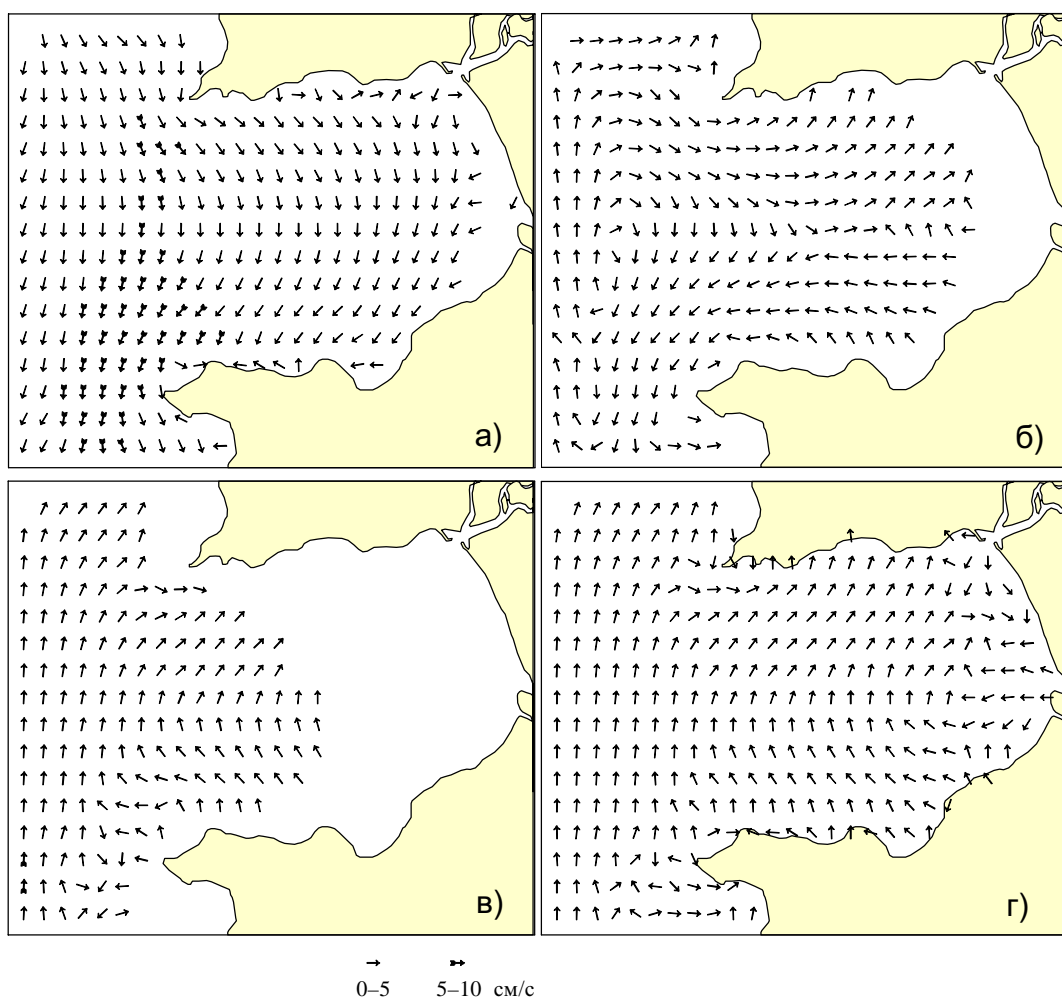


Рис. 6. Расчетные течения в бухте Суходол при северном ветре силой 6,0 м/с и среднем материковом стоке: **а** — на горизонте 1 м, **б** — 5 м, **в** — 10 м, **г** — вблизи дна
 Fig. 6. Modeled currents in the Sukhodol Bay under conditions of north wind 6.0 m/s and medium river discharge: **a** — at 1 m horizon; **b** — 5 m; **v** — 10 m; **г** — at the bottom

ра, остальные факторы (градиенты плотности, материковый сток, приливы) не играют существенной роли. Для условий летнего муссона характерна циклоническая завихренность поверхностных течений в бухте, для условий зимнего муссона — антициклоническая завихренность. Водообмен бухты Суходол с открытой частью Уссурийского залива происходит в основном благодаря зональной компоненте скорости течений, усиливается при южных ветрах, которые индуцируют заток вод Уссурийского залива в южную часть бухты Суходол, и ослабевает при северных ветрах.

Литература

Афейчук Л.С., Зуенко Ю.И., Рачков В.И., Раков В.А. Экологические условия воспроизводства и распределения анадара Броутона (*Anadara broughtonii*) в бухте Суходол (Уссурийский залив, Японское море) // Бюл. Дальневост. малаколог. о-ва. — 2004. — Вып. 8. — С. 43–60.

Будаева В.Д., Макаров В.Г., Частиков В.Н. Результаты гидрологических исследований залива Анива в 2001–2003 гг. (структура и циркуляция вод) // Тр. СахНИРО. — 2005. — Т. 7. — С. 83–110.

Зуенко Ю.И., Юрасов Г.И. Водные массы северо-западной части Японского моря // Метеорол. и гидрол. — 1995. — № 8. — С. 50–57.

Ивашенко Э.А. Циркуляция вод залива Петра Великого // Географические исследования шельфа дальневосточных морей. — Владивосток: ДВГУ, 1993. — С. 31–61.

Истошин Ю.В. Течения Японского моря по данным бутылочной почты // Тр. ЦИП. — 1950. — Вып. 17. — С. 88–131.

Климат Владивостока. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 248 с.

Лощия северо-западного берега Японского моря. — М.: ГУНиО МО, 1984. — 317 с.

Савельева Н.И., Аникиев В.В., Дударев О.В. Изменчивость стратификации вод в северной части Амурского залива Японского моря в летний период // Состояние морских экосистем, находящихся под влиянием речного стока. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — С. 41–52.

Budaeva V.D., Makarov V.G. A peculiar water regime of currents in the area of the Eastern Sakhalin shelf // Proc. 2nd PICES Workshop on the Okhotsk Sea and adjacent areas. — Sidney, Canada, 1999. — P. 131–138.

Budaeva V.D., Shevchenko G.V., Makarov V.G. et al. Specific features of seasonal and interannual variability of water structure and circulation in Aniva Bay during 2001–2003 // PICES Sci. Rep. — 2004. — № 26. — P. 55–63.

Makarov V.G., Zaytsev O.V., Budaeva V.D., Salinas-Gonzalez F. A piecewise curve fitting technique for vertical seawater density distribution // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (in press).

Поступила в редакцию 17.03.06 г.