

**ВЛИЯНИЕ МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ НА ХАРАКТЕР ИХ ПЕРЕНОСА
ПРИЛИВНЫМ ТЕЧЕНИЕМ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ РЕЧНОГО СТОКА**© 2008 г. К. А. Коротенко¹, А. В. Сенчев²¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Университет дю Литтораль, Вимеро, Франция

e-mail: kkorotenko(a).mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2007 г., после доработки 03.10.2007 г.

С помощью комплексной модели, включающую в себя трехмерную модель циркуляции океана, модель приливов и модель переноса частиц, исследованы структура поля скорости приливного течения и перенос мигрирующих по вертикали частиц в зоне влияния речного стока в восточной части пролива Ла-Манш. Обнаружено, что взаимодействие приливного течения с бароклинным потоком, сформированным стоком рек вдоль северо-восточного побережья Франции, порождает устойчивое интенсивное (~0.3 м/с) остаточное течение в зоне влияния речного стока. Для исследования влияния разных типов миграции частиц, имитирующих ихтиопланктон, на процессы их переноса в исследуемом районе были проведены численные эксперименты с кластерами частиц, для которых параметризация их миграции задавалась на основе натурных наблюдений за собственным вертикальным перемещением различных типов ихтиопланктона. Эксперименты показали, что распределения полей концентрации частиц и скорость их горизонтального перемещения зависят не только от фоновых гидрофизических условий, но и от характера вертикальной миграции частиц. В работе приводится сравнение результатов моделирования и натурных наблюдений в исследуемом районе.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе исследуются механизмы адвективно-турбулентного переноса вещества в поле скорости течения, сформированного в результате взаимодействия приливного течения с бароклинным потоком, порождаемым речным стоком. Внутри зоны влияния речного стока (ЗВРС¹), которая также является предметом исследования в настоящей работе, процессы обмена между открытым океаном и прибрежными водами контролируются структурой и устойчивостью ЗВРС. Дело в том, что растекание речных вод под влиянием вращения Земли создает вдольбереговое течение и фронтальную зону, которая отделяет соленые воды открытого океана от распресненных прибрежных вод. Значительные градиенты плотности, создаваемые речным стоком, подавляют турбулентный обмен в самой ЗВРС и препятствует водообмену между открытым океаном и прибрежной зоной. Интенсификация такого водообмена происходит во время разрушения структуры ЗВРС за счет интенсивного перемешивания под воздействием внешних факторов, либо, например, за счет внутренней неустойчивости стратифицированного потока, которая приводит к периодической генерации мезомасштабных структур: поперечных струй, меандров, вихрей и т.п. [13]. Среди внешних факторов, способствующих разрушению стратификации, следует выделить, напри-

мер, сильные приливные течения и ветровое воздействие. Последнее, порождая такие явления как апвеллинг и даунвеллинг, а также усиливая перемешивание, может в значительной степени ослаблять контрасты плотности в ЗВРС [8, 22]. Генерация сдвиговой турбулентности по всей толще приливного течения и, особенно, в придонном погранслое в определенных фазы прилива также способствует перемешиванию в ЗВРС [4, 25].

В последние годы изучению зон влияния речного стока уделяется особое внимание в связи с тем, что понимание процессов, происходящих в ЗВРС, является ключом к пониманию процессов самоочищения/загрязнения прибрежных вод, воспроизводства биоресурсов и др. Известно, что со стоком рек выносятся большое количество как загрязняющих, так и питательных веществ. Последние, в свою очередь, могут оказывать как положительный эффект, например, в воспроизводстве популяций рыб, так и отрицательный: приводить к усиленному цветению фитопланктона, способствующему подавлению вертикального обмена кислородом, в результате чего возникают т.н. заморы рыб.

Взаимодействие приливного течения со стратифицированным вдольбереговым потоком, являющимся неотъемлемой структурой ЗВРС, может приводить в ряде районов к специфическим условиям, благоприятствующим выживанию популяций рыб и других морских организмов. Так, в численных экспериментах авторов [4, 25] показано, что в восточной части пролива Ла-Манш в результате такого взаи-

¹ В английской терминологии – “Region Of Freshwater Influence” (ROFI).

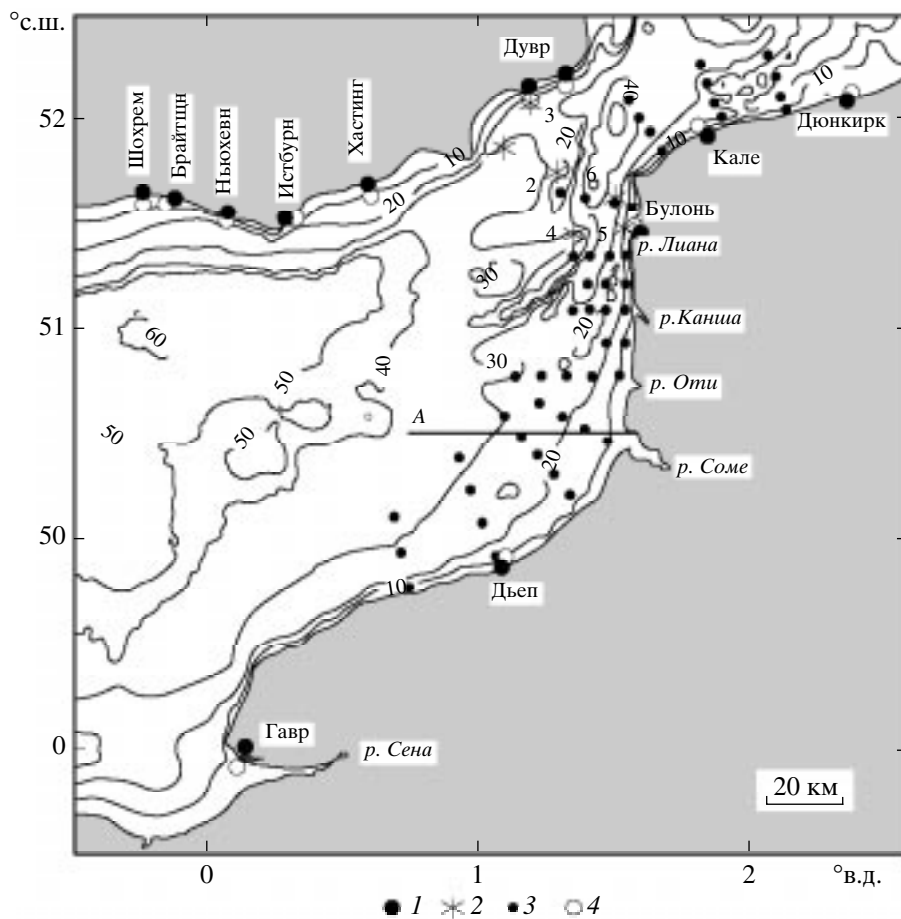


Рис. 1. Район исследования и расположение станций наблюдения за уровнем моря (1), радарных измерений скорости течения (2) и отбора проб ихтиопланктона (3). Символами (4) обозначены ближайшие узлы расчетной сетки к станциям (1). Тонкие линии с числами – изобаты (м). Горизонтальная линия – положение разреза А.

модействия в определенных областях ЗВРС могут возникать зоны конвергенции, в которых удерживаются модельные частицы. Координаты областей аккумуляции частиц довольно хорошо совпадают с зонами скопления некоторых видов ихтиопланктона [17], находящегося на ранних стадиях своего развития. Это является свидетельством того, что физические механизмы на ранних стадиях эволюции, по-видимому, играют основную роль в процессах пространственно-временного перераспределения массы ихтиопланктона. В то же время некоторые собственные свойства ихтиопланктона могут также оказывать влияние на характер этих процессов.

В настоящей работе мы рассмотрим особенности адвективно-турбулентного переноса частиц, которые имеют собственную вертикальную скорость, т.е. могут мигрировать² по определенным законам. Это позволит интерпретировать данные прямых

наблюдений для более широкого класса морских организмов, которые, как правило, имеют способность к миграции в зависимости от различных внешних факторов.

2. МЕТОДИКА

Район исследования представлен на рис. 1. Он включает в себя восточную часть пролива Ла-Манш, Дуврский пролив и южную часть Северного моря. Для этого района характерны малые глубины (<60 м), сильные приливные течения, высокие значения колебания уровня (до ± 4 м), интенсивная турбулентность в определенные периоды приливного цикла [29], а также значительный пресноводный сток, приводящий к формированию ярко выраженного гидрологического фронта вдоль побережья Франции [17, 20, 26].

Комплексная модель, применяемая для решения задачи, была подробно описана в работах авторов [4, 20, 26]. Напомним, что в состав модели входят 3 основных блока: σ – координатная модель циркуля-

² Обычно под миграцией в морской биологии понимается именно собственное движение организмов по вертикали, поэтому далее мы будем использовать лишь слово миграция, опуская уточнение направления движения.

ции океана (РОМ³), спектральная модель приливов и модель переноса частиц. Поскольку комплексная модель детально описана в работе авторов [25], здесь мы кратко остановимся лишь на ключевых моментах инициализации модели, взаимодействия ее блоков и модификации модели переноса частиц.

Модель циркуляции имеет разрешение 2 км по долготе (Δx) и широте (Δy). Расчетная область 100×100 ячеек охватывала район восточной части пролива Ла-Манш, показанный на рис. 1. В вертикальном направлении модель имела 21 σ -уровень. Они были распределены таким образом, чтобы обеспечить максимальное разрешение у поверхности и у дна. Расчетные шаги по времени для внешней моды DTE и для внутренней моды DTI выбирались из критерия устойчивости К-Ф-Л [9] и имели значения 6 с и 120 с, соответственно. Для потоков импульса в придонном слое $(1 + \sigma_{kb-1}) H/z_0$ использовалась квадрати

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = C_z [U^2 + V^2]^{1/2} (U, V), \sigma \rightarrow -1,$$

$$\text{где } C_z = \text{MAX} \left[\frac{k^2}{[\ln \{ (1 + \sigma_{kb-1}) H/z_0 \}]^2}, 0.0025 \right],$$

$k = 0.4$ – постоянная Кармана, z_0 – параметр шероховатости, $H(x, y)$ – глубина, $D = H + \eta$, $\eta(x, y)$ – возвышение свободной поверхности K_M – коэффициент турбулентной вязкости, U и V – компоненты средней скорости течения.

Инициализация модели проводилась с однородными по температуре (10°C) и солености (35.0‰) начальными данными, характерными для апреля, и нулевой начальной скорости течения. Среднемесячный речной сток задавался для 8-ми основных рек на побережье Франции, при этом сток Сены представлялся в виде 5 рукавов.

На открытых (западной и северной) границах расчетной области для температуры и солености использовались два типа граничных условий: условие на втекание и условие на вытекание. В случае вытекания за пределы расчетной области использовались значения T и S на соответствующей открытой границе. В случае втекания потока внутрь расчетной области решалось радиационное уравнение $\frac{\partial}{\partial t}(T, S) + U_n \frac{\partial}{\partial n}(T, S) = 0$ [4, 25], где индекс и представляет нормальную к открытой границе координату.

Трение ветра во всех численных экспериментах задавалось нулевым, чтобы получить чистый эффект от взаимодействия прилива и речного стока на структуру гидрофизических полей (ГФП).

Радиационные граничные условия, основанные на принципе распространения длинной гравитацион-

ной волны, использовались для задания колебаний уровня моря как комбинации известных по наблюдениям значений амплитуды уровня и нормального компонента скорости течения на открытых границах [14]. Эти параметры, в свою очередь, были получены из конечно-элементной модели приливов [27], которая настраивалась по методу сравнения рассчитанных амплитуд и фаз прилива [15], а также возвышения водной поверхности с имевшимися данными наблюдений в 12 точках на побережьях Франции и Англии (рис. 1). Детально этот метод описан в [25].

Приливной сигнал включал три основные для Ла-Манша астрономические приливные гармоники M_2 , S_2 , N_2 и одну нелинейную второстепенную составляющую M_4 .

Настройка РОМ проводилась по сравнению расчетного и наблюдаемого уровней моря, а также путем сравнения расчетных течений на поверхности и данных, полученных с помощью высокочастотного радарного измерителя поверхностного течения [24, 25]. Точки установки радаров показаны на рис. 1. Компоненты средней скорости, коэффициенты турбулентной диффузии на каждом расчетном шаге поступают в модель переноса частиц.

Метод блуждающих частиц (МБЧ), на основе которого построена модель переноса частиц, часто применяется для исследования адвективно-турбулентного переноса различных примесей в океане и, как было показано во многих работах [1–4, 7, 19, 28, 31, 32], он часто бывает значительно эффективнее метода конечных разностей. МБЧ особенно эффективен, когда решаются многомерные задачи со сложной конфигурацией граничных условий. Кроме того, такие биосообщества как фито-, ихтио- и зоопланктон, со свойственной им значительной пространственной неоднородностью распределения и перемежаемостью естественно представлять в виде совокупности частиц, нежели описывать некой сглаженной функцией средней концентрации.

Основные идеи МБЧ применительно к излагаемой проблеме были детально описаны в работах авторов [4, 25, 26]. Здесь же мы остановимся на двух использованных в данной работе принципах, которые легли в основу модификации МБЧ.

Известно, что в РОМ расчетный шаг по времени для внутренней моды DTI [9], на котором рассчитываются компоненты средней скорости U_m , V_m , $W_m(x, y, z)$, выбирается порядка нескольких десятков или сотен секунд. В нашем случае этот шаг равен 120 с. и такой же шаг используется в МБЧ для расчета приращения координат Лагранжевых частиц, x, y, z . С учетом того, что для мелкомасштабной турбулентности характерное время T_{turb} составляет порядка 1–10 с [5], Лагранжево время $T_{Lagr} \ll DTI$, и поэтому вертикальные пульсации скорости, разнесенные на DTI , будут статистически независимыми величинами. В этом случае для перемещения частиц по вертикали справедливо выражение

³ РОМ – Princeton Ocean Model [9].

$$z_n^{j+1} = z_n^j + W_m \cdot DTI + \sigma_z A_n^j \quad (n = 1, 2, \dots, N_p), \quad (1)$$

где z_n^j и z_n^{j+1} – значения вертикальной координаты n -ой частицы в моменты времени t и $t + DTI$ соответственно, A_n^j – нормально распределенные случайные значения с нулевым средним значением и единичной дисперсией, а σ_z – случайное среднеквадратическое отклонение, которое связано с коэффициентом турбулентной диффузии K_V выражением $\sigma_z = \sqrt{2K_V DTI}$ [4, 6].

В случае расчета горизонтальных компонентов перемещения частицы ситуация несколько усложняется, т.к. типичные значения T_{Lagr} составляют порядка 1–10 дней [23] и, следовательно, $T_{Lagr} \gg DTI$. Последнее означает, что случайные пульсации и перемещение лагранжевых частиц при сдвиге по времени на DTI не являются статистически независимыми величинами, и поэтому изменение горизонтальных координат частиц является линейным Марковским процессом. В этом случае приращения $x_{i,n}^{j+1}$ будут описываться уравнением [6]:

$$x_{i,n}^{j+1} = x_{i,n}^j + U_i^j(x_{i,n}^j, z_n^j) \cdot DTI + (u_{i,n}^{j+1}, u_{i,n}^j) \cdot DTI/2 \quad (i = 1, 2), \quad (2)$$

в котором компоненты горизонтальной скорости движения частицы $u_{i,n}^{j+1}$ и $u_{i,n}^j$, соответственно, в моменты t и $t + DTI$ определяются из конечно-разностного аналога уравнения Ланжевена:

$$u_{i,n}^{j+1} = u_{i,n}^j (1 - DTI/T_{Lagr}) + \sigma_a A_{i,n}^j \cdot DTI, \quad (3)$$

где σ_a – среднеквадратическое случайное ускорение частицы, $A_{i,n}^j$ – нормально распределенные случайные значения с нулевым средним значением и единичной дисперсией,

Уравнения (2) и (3) непосредственно использовались для расчета горизонтального перемещения частиц. При этом неизвестные величины σ_a и T_{Lagr} находятся из формулы Смагоринского [21], которая используется в РОМ для определения коэффициента горизонтальной диффузии:

$$K_H = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Поскольку $K_H \approx \Delta x \Delta y$, то T_{Lagr} можно определить как $T_{Lagr} = \Delta x \Delta y / K_H$. В свою очередь можно легко показать, что $\sigma_a = (2K_H / T_{Lagr}^2 DTI)^{1/2}$.

Что касается описания перемещений лагранжевых частиц по вертикали, то для этого мы использовали модифицированную форму уравнения (1) по следующей причине. Дело в том, что в отличие от горизонтальных коэффициентов диффузии гради-

енты вертикального коэффициента могут значительно варьироваться по вертикали, а это, как показали численные расчеты по формуле (1), приводит к накоплению частиц с нейтральной плавучестью на горизонтах с меньшими значениями K_V , что противоречит наблюдениям [18, 30]. Поэтому предпринимались попытки ввести поправки, чтобы избавиться от этого “артефакта”. Наиболее удачная на наш взгляд модификация (1) была предложена в работе [30]. В ней вместо последнего члена в (1) вводится следующее выражение:

$$\left(\frac{\partial K_V(z)}{\partial z} \right) DTI + A_n^j (2K_V(\hat{z}) DTI)^{1/2}, \quad (4)$$

в котором $\hat{z} = z + 1/2 \left(\frac{\partial K_V(z)}{\partial z} \right) DTI$. В (4) первый детерминистский член отвечает за перенос частиц из областей с пониженным коэффициентом K_V в области, где он высокий. Во втором члене (4) K_V берется в смещенной точке z .

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты проводились в два этапа. На первом этапе модель работала до установления структуры течений и формирования ЗВРС, соответствующих периоду апрель-май 1995 г. Этот этап занимал около 3-х расчетных месяцев. Затем, в течение 35 дней проводились численные опыты с пассивными и мигрирующими частицами. Ниже приводятся результаты моделирования гидрофизических полей и переноса частиц в восточной части пролива Ла-Манш.

Зона влияния речного стока. Изучение структуры ГФП и их изменчивости имеет ключевое значение для понимания процессов переноса вещества в ЗВРС. Как было показано в [4], распределение солёности отражает присутствие характерного вдольберегового фронта, отделяющего атлантические воды от распресненных прибрежных вод. При этом на внешней границе ЗВРС вертикальная скорость течения меняет знак. Было также обнаружено, что непосредственно у берега периодически возникает зона апвеллинга или даунвеллинга, за которой мористее часто появляется вдольбереговая зона конвергенции, которая и обуславливает скопление там частиц.

Важным фактором в перераспределении вещества в системе “открытый океан-ЗВРС” является резкий контраст в интенсивности вертикального турбулентного обмена, связанный с тем, что силы плавучести в ЗВРС значительно подавляют турбулентный обмен в зоне. На рис. 2 даны расчетные вертикальные распределения солёности S , сдвига скорости $P = [(\partial U / \partial z)^2 + (\partial V / \partial z)^2]^{1/2}$ и коэффициента вертикального турбулентного обмена K_V на зональном 50-км разрезе A , идущего от устья р. Со-

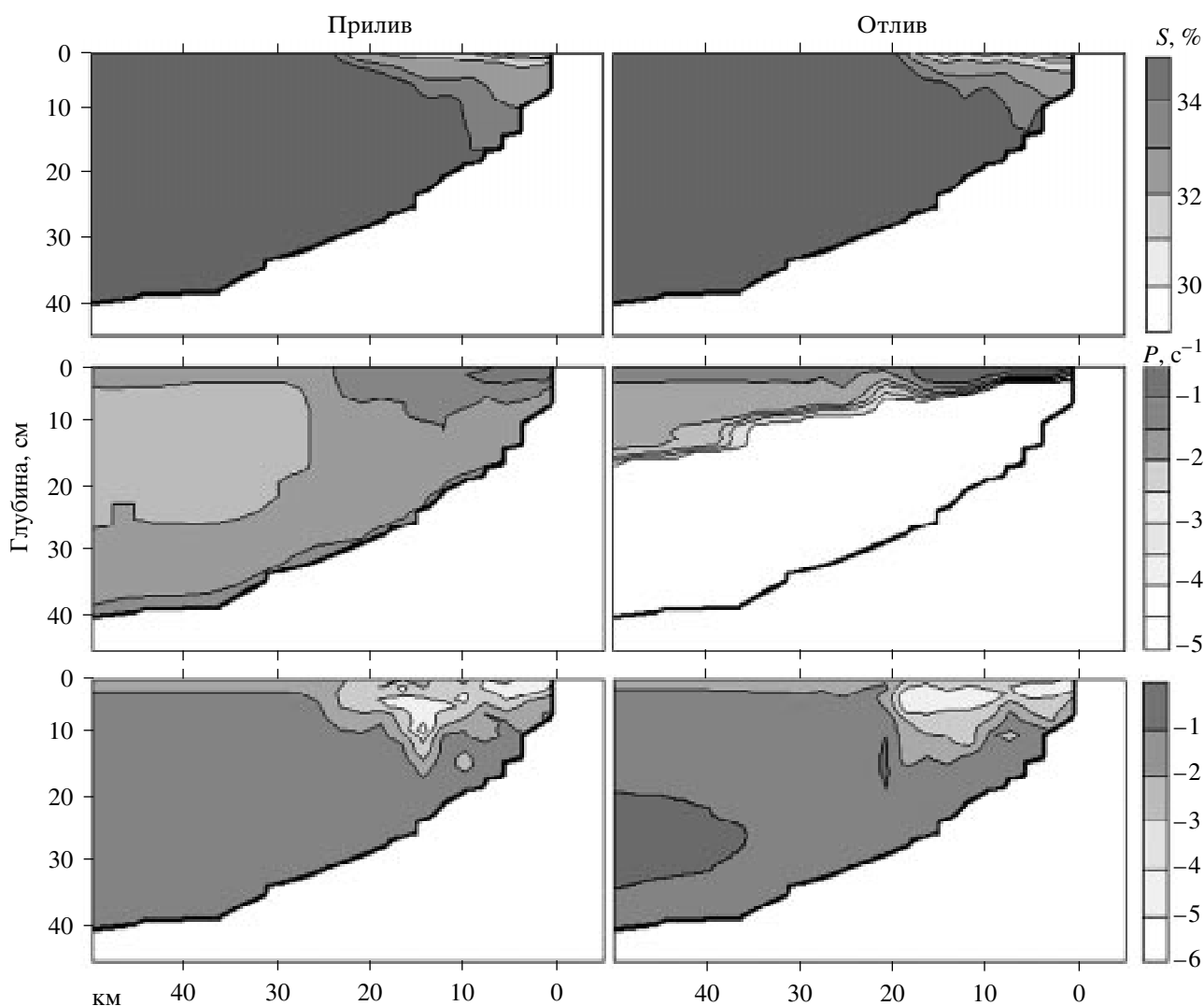


Рис. 2. Вертикальные распределения солёности S , логарифмов сдвига скорости $P^* = \lg[P/\text{с}^{-1}]$ и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии $K_V^* = \lg[K_V/\text{м}^2\text{с}^{-1}]$ на разрезе А (рис. 1) в зависимости от фазы прилива.

мме на запад (рис. 1). Распределения даны для фаз прилива и отлива. Изменение уровня моря на разрезе составляло ± 3.5 м, а средняя скорость течения составляла ~ 0.5 м с^{-1} . Отметим, что случае прилива течение было направлено на северо-восток, а в случае отлива – на юго-запад. Из рис. 2 видно, что для прилива область распресненной воды ($S = 32\%$) занимает большой объем, а на поверхности распространяется на 30 км от берега. Параметр сдвига скорости P претерпевает значительные изменения в течение приливного цикла. Для полной воды он весьма высок во всем слое, а для отлива значимые величины ($P > 10^{-3}$ с^{-1}), которые, в общем случае, достаточны для турбулизации стратифицированного слоя, находятся в весьма узкой подповерхностной прослойке порядка 10 м толщиной. Однако, в обоих случаях, влияние плавучести настолько велико, что верти-

кальный турбулентный обмен в ЗВРС практически подавлен (K_V не превышает величину 10^{-4} $\text{м}^2/\text{с}$). Отметим также, что несоответствие распределений члена P , отвечающего за продукцию локальной сдвиговой турбулентности, и K_V (рис. 2) говорит о том, что турбулентность на разрезе А носит нелокальный характер, т.е. она могла быть сгенерирована в каком-либо другом районе пролива и затем оказаться на разрезе А за счет адвективно-турбулентного переноса. В этой связи, важным является то, что в выбранную нами модель циркуляции (РОМ) заложена возможность моделирования трехмерного адвективно-турбулентного переноса кинетической энергии турбулентности, что является несомненным преимуществом данной модели. Обычно во многих других моделях предусмотрена параметризация лишь вертикального турбулентного обмена.

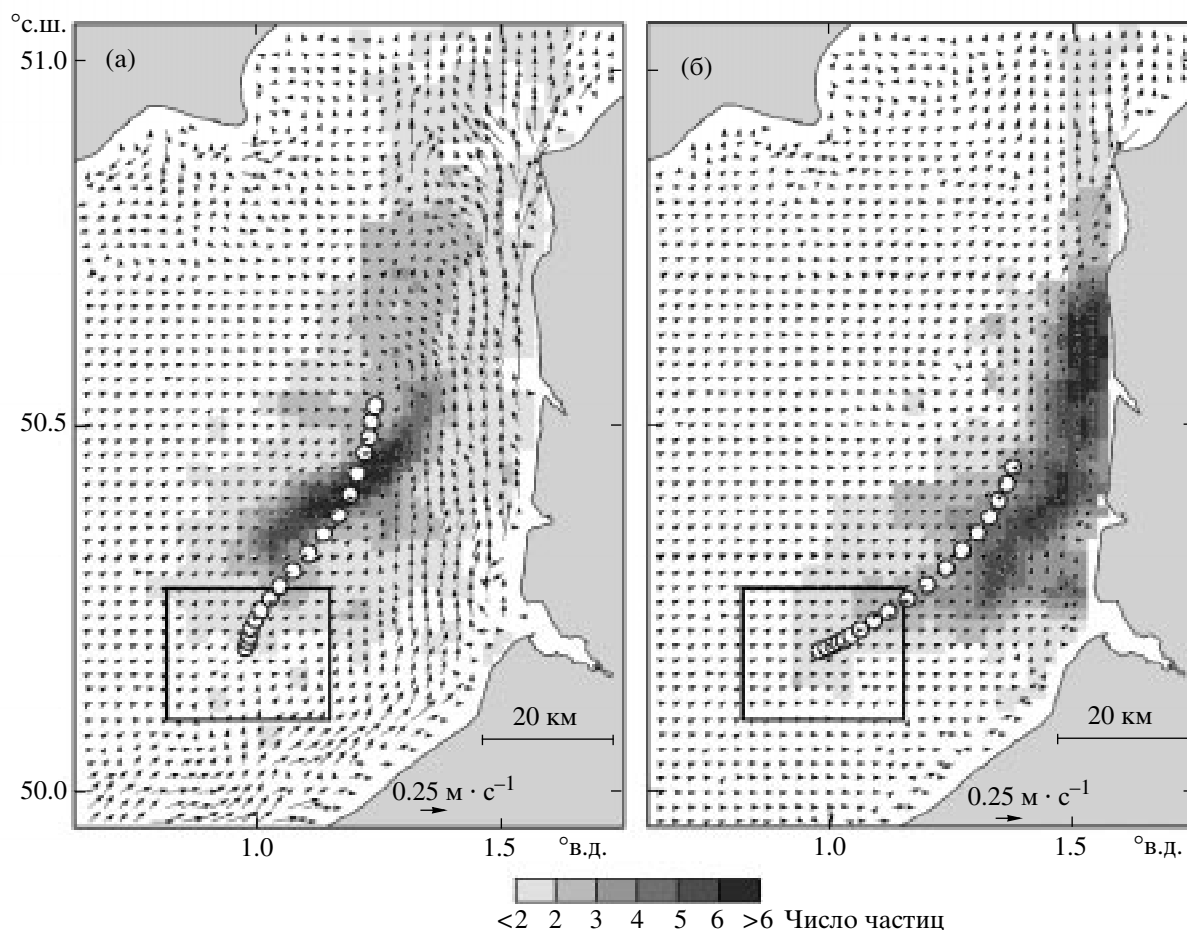


Рис. 3. Остаточные скорости течения и концентрация пассивных частиц (число частиц/расчетный объем) спустя 18 дней с момента выпуска при совместном воздействии прилива и пресноводного стока (а) и при воздействии только прилива (б). Квадратами показаны начальная форма и положение выпущенных частиц, окружностями показаны положения центра масс пятна через 24.8 часов, т.е. через 2 приливных периода. Оттенками серого цвета показана концентрация частиц.

Лагранжева скорость течения и перенос пассивных частиц. Поле Эйлеровых скоростей (как горизонтальных, так и вертикальных) подробно обсуждалось в работе авторов [26], поэтому здесь мы обсудим поле Лагранжевых скоростей, полученных с помощью модельных частиц, выпущенных в исследуемую часть пролива Ла-Манш. Остаточная⁴ Лагранжева скорость (ОЛС) является наиболее показательной характеристикой для оценок переноса частиц в приливном течении. Она оценивается как результирующее перемещение частиц за приливный период [33]. Поле ОЛС показано на рис. 3а и 3б. Результаты были получены следующим образом. В начальный момент частицы распределялись равномерно (по одной частице в ячейке) по всей показанной акватории на глубине 1 м, затем за приливный период (12.42 час) проводился расчет полного перемещения каждой частицы. Поскольку из-за диффу-

зии частицы проникали до глубины 4 м, то ОЛС следует считать как среднюю скорость в слое 0–4 м. Из рис. 3а видно, что расчетные ОЛС не превышает 0.05 м/с, в основной части акватории, кроме прибрежной зоны. В последней скорость достигает 0.3 м/с и течение направлено на север. Рассмотренный случай относился к моделированию перемещения частиц при включении в модель и приливов, и речного стока. Напротив, при исключении из рассмотрения речного стока ОЛС по всей акватории не превышает 0.05 м с⁻¹ (рис. 3б). Таким образом, в переносе частиц речной сток играет чрезвычайно важную роль. Ясно, что при локализованном источнике частиц, выпущенных в ЗВРС, горизонтальная неоднородность поля ОЛС будет деформировать пятно и, как показано в [4], приводить к его переносу на север и формированию зон аккумуляции частиц вдоль внешнего фронта ЗВРС.

⁴ В английской терминологии “Residual Lagrangian velocity”.

Для сравнения эффекта пресноводного стока на распространение частиц на рис. 3а и 3б показаны также интегральные распределения концентрации частиц⁵ на 18-й день после выпуска. Главные отличия этих распределения в том, что при отсутствии ЗВРС частицы подходят непосредственно к берегу, а область максимальных концентраций, превышающая 6 единиц, принимает более вытянутую форму и примыкает к берегу. Заметим, что размеры областей, занятых частицами, примерно одинаковы в обоих случаях, не смотря на то, что максимальные значения ОЛС, получаемые с учетом рек и их отсутствием отличаются, как было сказано выше, почти в 10 раз. Объясняется это тем, что внешняя фронтальная область ЗВРС препятствует проникновению большого количества частиц в зону, где значения остаточной скорости максимальны. Поэтому основная масса частиц будет переноситься горизонтальным потоком со скоростью, сравнимой с той, что мы получили в случае инициализации модели без речного стока, т.е. порядка 0.05 м/с.

Моделирование переноса мигрирующих частиц.

Необходимость введения в численную модель собственных свойств частиц диктуется тем, что попытки проанализировать процессы переноса таких организмов как икринки и личинки рыб и др. с помощью пассивных частиц дают заметные расхождения с наблюдениями, а часто и ошибочные результаты [4, 16]. Известно, что ихтиопланктон на определенных стадиях развития имеет способность мигрировать (по вертикали). При этом для разных семейств ихтиопланктона миграция может зависеть от различных физических, биологических и и др. факторов. Непосредственные наблюдения влияния миграции на движение сообществ ихтиопланктона немногочисленны, и поэтому любое такое наблюдение представляет особую ценность. Для нашего района приведем несколько таких работ. Так, в Северном море [10–12] наблюдение за поведением личинок камбалы (*Pleuronectes flesus*) показало, что скорость и направление их миграции зависела от высоты уровня моря (иначе – давления). Это проявлялось в том, что во время прилива личинки распределялись во всей толще воды, в то время как при отливе их удалось обнаружить только в придонном слое. Такой тип миграции в данной акватории, как отмечается в [12], приводит к тому, что личинки, несмотря на вдольбереговой поток приливного характера, имели тенденцию смещения к берегу.

Другой тип миграции – суточный – для личинок того же типа был обнаружен южнее, в проливе Ла-Манш [16]. Здесь удалось проанализировать поведение личинок в течение нескольких недель и показать, что миграция *Pleuronectes flesus* коррелирована с наступлением дня и ночи: личинки движутся вниз после восхода солнца и всплывают к по-

верхности моря после его захода. Такое поведение, как известно, позволяет избежать хищников. Известны также зависимости скорости миграции от фазы прилива [12].

Основываясь на наблюдениях, описанных выше, для моделирования эффекта миграции на распространение активных частиц, таких как ихтиопланктон, мы можем ввести определенные типы параметризации скорости миграции. Однако такая параметризация будет несколько идеализированная, т.к. имеющихся наблюдений не достаточно, чтобы установить точную зависимость скорости миграции, например, от фазы и высоты прилива, от времени суток и др.

На рис. 4 представлены три типа параметризации: зависимости миграции от времени суток (рис. 4а), от высоты уровня моря (рис. 4б) и от фазы прилива/отлива (рис. 4в). В первом случае мы задаем постоянные скорости всплытия частиц в ночное время и опускания – в дневное время (на рис. 4а показана продолжительность светового дня в мае). Если в первом случае рассматривается полный суточный цикл, то во втором и третьем случаях мы задаем полусуточный цикл, связанный с приливами (12.8 час). Во втором случае (рис. 4б) мы задаем опускание частиц в период падения уровня моря и их всплытие – в период подъема уровня. Для третьего случая (рис. 4в) мы ввели сдвиг фаз между миграцией и колебанием уровня моря, т.е. относительно рис. 4б миграция опережает изменение уровня на два часа.

На рис. 5 представлены распределения интегральной концентрации мигрирующих частиц спустя 18 дней после их выпуска. Заметны отличия в распределениях концентрации для разных типов параметризации миграции частиц. Кроме того, существенные отличия мы видим также при сравнении распределений концентрации мигрирующих частиц с распределениями концентрации пассивных частиц, представленными на рис. 3. Более или менее близко к распределению концентрации пассивных частиц подходит распределение для частиц, мигрирующих в зависимости от освещенности (рис. 5а). Видно, что при такой зависимости миграции большая часть частиц сосредоточена за границей ЗВРС, при этом максимум концентрации частиц (порядка 6) находится ниже р. Лиана и расположен на расстоянии около 20 км от берега, и только очень малая часть мигрирующих частиц попадает в зону, близкую к берегу. Из сравнения характера движения центров масс мигрирующих в зависимости от освещенности частиц и пассивных частиц (рис. 3в) видно, что, хотя траектории центров масс схожи, центр масс активных частиц движется быстрее. Кроме того, формы областей повышенной концентрации для тех и других частиц заметно отличаются. Если ось области высоких концентраций пассивных частиц направлена к берегу, то для мигрирующих частиц зона мак-

⁵ Здесь и далее концентрация частиц будет дана как количество частиц в расчетном объеме $\Delta x \Delta y$, где H – глубина.

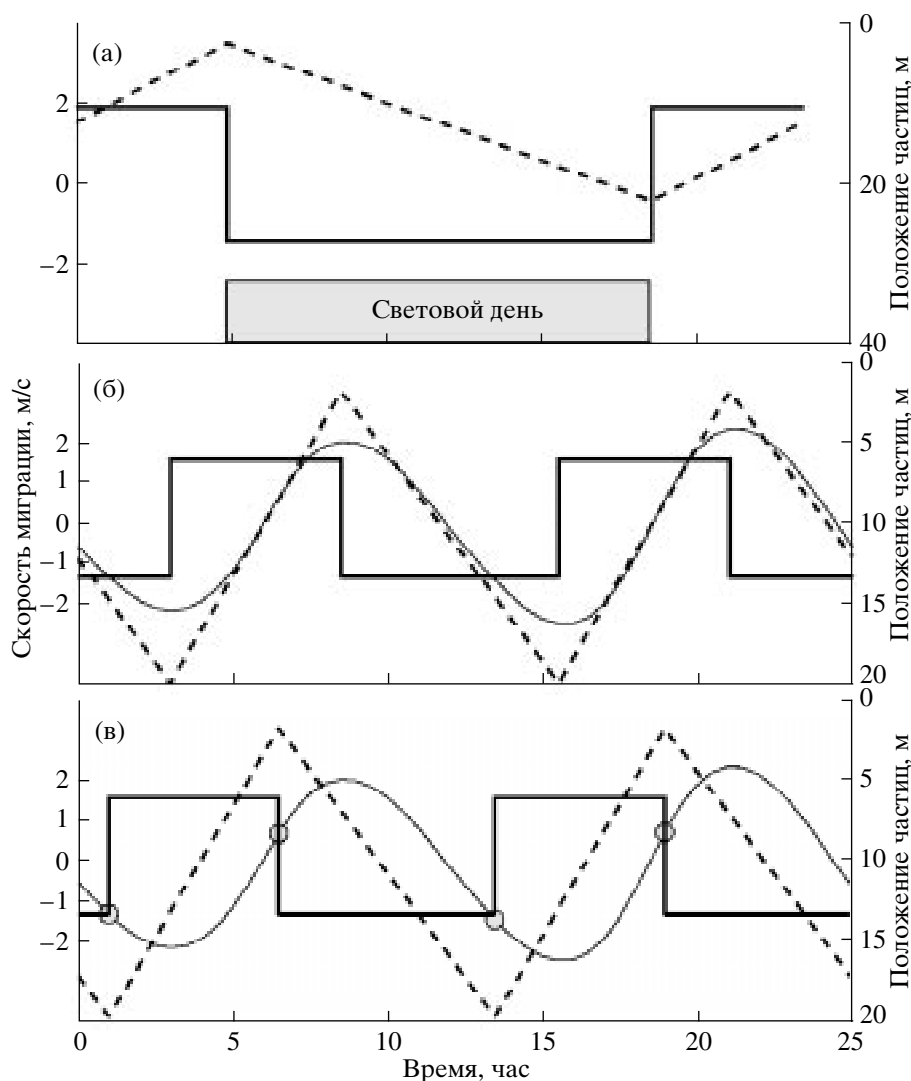


Рис. 4. Различные параметризации скорости миграции (СМ). Непрерывной линией обозначена СМ, используемая в численных расчетах, а пунктирной – вертикальное перемещение частиц относительно поверхности. Тонкая непрерывная линия – изменение уровня поверхности моря. Зависимость СМ от времени суток (а), зависимость СМ от уровня моря (б), СМ синхронна с направлением приливного течения (в).

симальных концентрации вытянута вдоль берега, и, как было сказано выше, эти частицы имеют тенденцию держаться дальше от берега.

Другой интересный результат получен для частиц, мигрирующих в зависимости от уровня прилива (рис. 5б). Для этой параметризации мигрирующие частицы концентрировались в пятне, вытянутом вдоль берега, а центр масс пятна двигался значительно быстрее по сравнению с предыдущим случаем. Максимальное значение концентрации (равное 6) находилось выше р. Лиана на расстоянии около 20 км от берега, примерно в 80-ти км от места выпуска.

В сценарии, когда скорость миграции синхронна с приливным течением (см. рис. 4в) и при этом она опережает наступление прилива и отлива на 2 часа,

адвективный перенос частиц значительно слабее по сравнению с рассмотренными выше сценариями. Частицы, если можно так выразиться, предпочитают держаться вместе, при этом большая их часть находится вдали от берега, а концентрация частиц довольно слабо падает в течение всего периода расчета. Максимум концентрации, равный 8, находится так же, как и в первых двух опытах, на расстоянии 20 км от берега.

Последний опыт был сделан по предыдущему сценарию, но в параметризации миграции скорость частиц бралась с противоположным знаком, т.е. во время наступления прилива (течение направлено на юг) частицы опускались, а во время отлива – поднимались. Заметим, что при этой параметризации на-

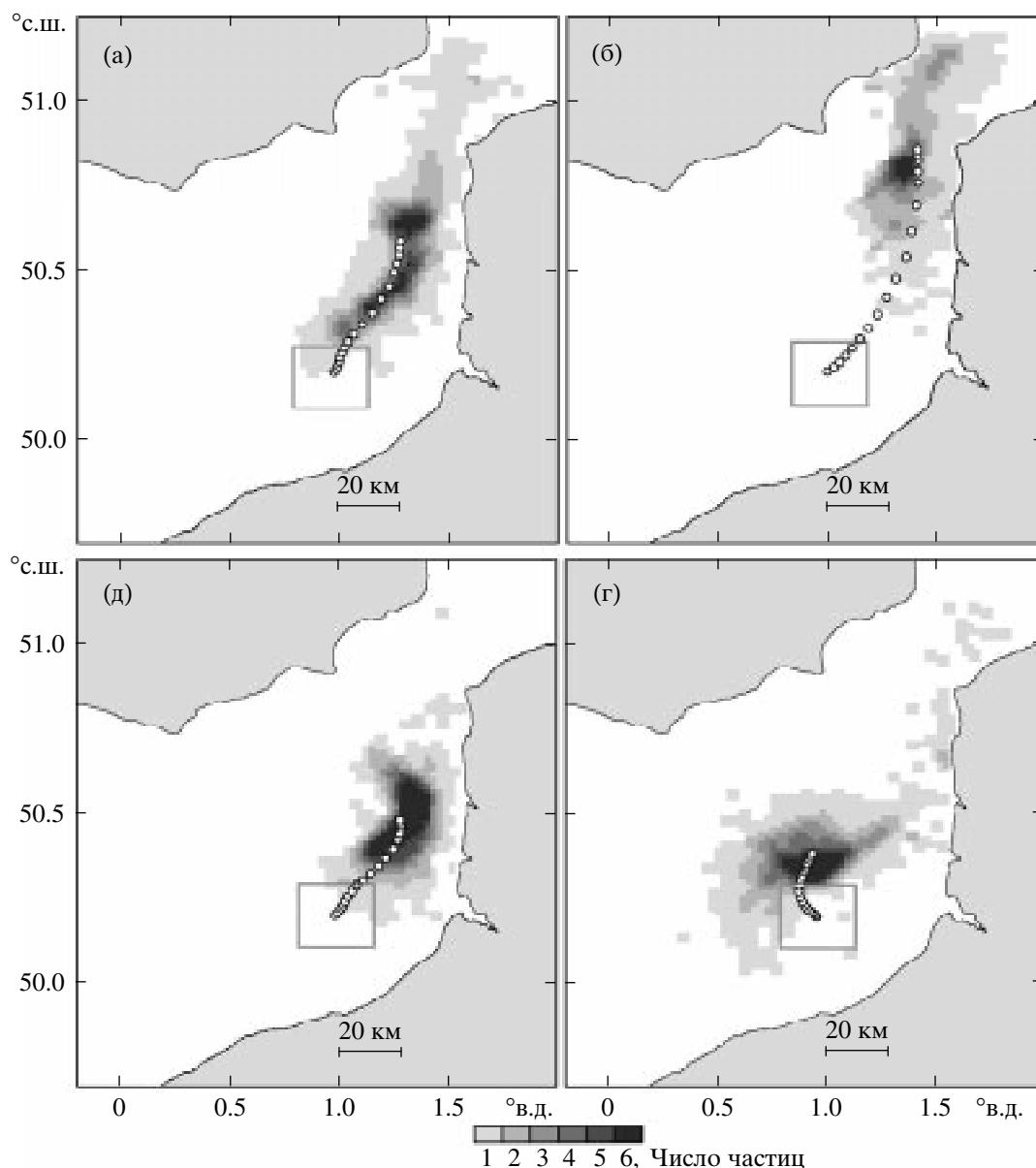


Рис. 5. Концентрация активных частиц (число частиц/расчетный объем) спустя 18 дней с момента выпуска для разных параметризаций СМ: зависимость от времени суток (а), уровня моря (б), направления приливного течения (в), направления приливного течения, но с обратным (см. рис. 4в) знаком скорости миграции (г). бозначения те же, что на рис. 3.

чало миграции также опережало приливный цикл на два часа.

Результат опыта представлен на рис. 5г. Распределение концентрации и, особенно, траектория центра масс значительно отличаются от всех предыдущих сценариев. Во-первых, основная масса частиц вначале двигалась на северо-запад и только спустя 8 дней в средней части пролива направление движения центра масс поменялось на северо-восточное. Характерно, что некоторая часть частиц перемещалась даже к юго-востоку, т.е. против остаточного течения (рис. 3а). Из рис. 5г также видно, что некоторые частицы попали в зону оста-

точного течения вблизи берега и вышли в южную часть Северного моря.

Для сравнения с полученными численными результатами на рис. 6 показаны данные измерений численности икринок и личинок камбалы (*Pleuronectes flesus*) в восточной части пролива Ла-Манш, детально проанализированные в [4, 25, 26]. Измерения проводились в апреле-мае 1995г. в Северном море и в проливе Ла-Манш и охватывали 3 разные стадии развития икринок и личинок. Величины даны в безразмерном виде $(N/V_{100})N_{\max}$, где N – число частиц, V_{100} – объем 100 м³ и $N_{\max}$ – максимальное количество особей в объеме.

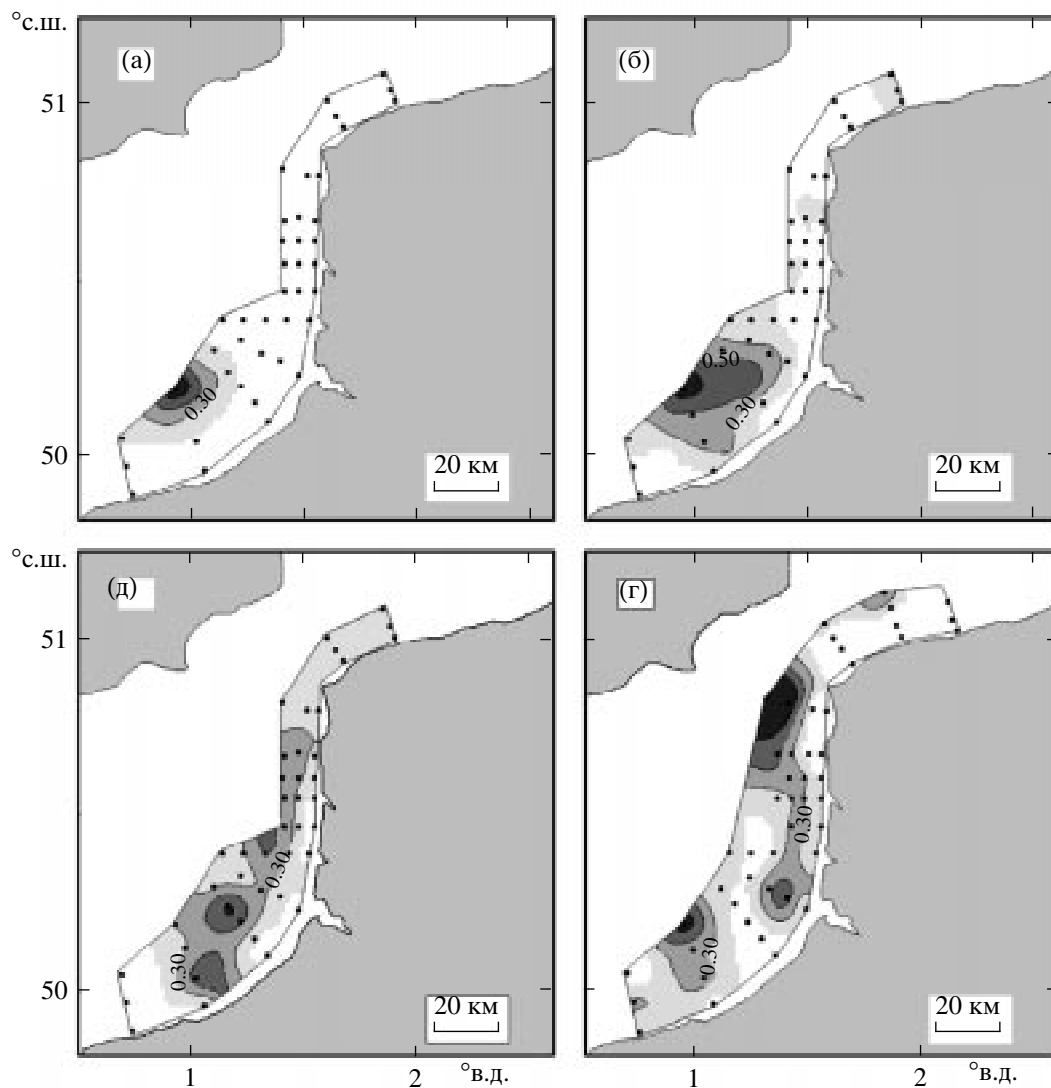


Рис. 6. Распределение численности камбалы (величины см. в тексте) для различных стадий развития: стадия икры (а), стадия личинок 2 (б) и стадия личинок 3 (в) в течение первого этапа наблюдений (апрель 1995 г.), а также стадия личинок 2 (г) в течение второго этапа наблюдений (май 1995 г.). Точками указаны места отбора проб.

На рис. 6а видно, что в начале измерений, в апреле 1995 г. икра камбалы (первая стадия развития)⁶ находилась только в одном пятне, расположенном в 40 км от устья реки Соме в зоне нереста. Максимум концентрации при этом был равен 10 икринок на 100 м³. Личинки второй стадии развития (недельного возраста) находились также в одном пятне, но уже вытянутом на северо-восток (рис. 6б). Максимум концентрации повысился до 30 икринок на 100 м³. Значительные изменения в распределении в поле концентрации отмечаются для личинок на третьей стадии развития (возраста двух недель). Концентра-

ции более 10 икринок на 100 м были обнаружены уже в трех пятнах (рис. 6в), расположенных в 20–25 км от побережья, что соответствует выводам о влиянии ЗВРС, сделанным выше. Взаимное расположение пятен показывает, что основное направление переноса личинок было северо-восточным вдоль берега, что соответствует направлению остаточного течения (рис. 3а), образующегося при взаимодействии приливного течения и пресноводного стока. Следует отметить, что, что в период наблюдений ветер был северо-западный, поэтому его влияние на перемещение ихтиопланктона к северу можно исключить.

На рис. 6г показано распределение личинок камбалы, находящихся на стадии 2 своего развития. Данные получены в мае 1995 г. спустя 3 недели по-

⁶ *Pleuronectes flesus* от икры (1 стадия) проходит еще 5 стадий своего развития в виде личинок. Стадии 1–3 при анализе динамики можно считать пассивным трассером.

сле начала апрельского эксперимента. Распределение концентрации личинок свидетельствует также о существовании аномалий в этом распределении и дальнейшем продвижении ихтиопланктона к северу вдоль побережья Франции.

Из приведенных наблюдений можно сделать вывод, что икринки и личинки *Pleuronectes flesus*, проходя разные стадии своего развития, могут быть представлены в виде примеси с различной собственной динамикой: от пассивной до активно мигрирующей. Сравнение рис. 5 и рис. 6 показывает, что на поздних стадиях эволюции личинок *Pleuronectes flesus* параметризация, в которой скорость миграции зависит от освещенности или от уровня прилива, позволяет добиться лучшего согласия расчетной концентрации с наблюдениями [16].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением серии исследований авторов [4, 25, 26] по взаимодействию приливов с бароклинным течением, сформированным речным стоком, и их совместному влиянию на распространение вещества в ЗВРС. В качестве вещества выбраны частицы, которые могут быть либо пассивными, либо им задается способность мигрировать, что характерно для большинства видов ихтиопланктона, находящихся на стадиях икры и личинок. Объектом исследования выбрана восточная часть пролива Ла-Манш, хотя фундаментальные вопросы, рассмотренные в работе, выходят за рамки региональной проблемы. Эти вопросы в первую очередь касаются ЗВРС – зоны, в которой речной сток существенным образом меняет структуру приливного течения и, как следствие – характер процессов переноса вещества. Выше было показано, что северное довольно сильное остаточное течение (~0.3 м/с) вдоль восточного берега Франции является результатом взаимодействия приливного течения и речного стока, а изменчивость коэффициента вертикальной диффузии зависит как от локальных факторов, так и от процессов адвективного переноса турбулентной энергии.

Как показали численные опыты, и пассивные, и активные частицы, попадая в ЗВРС, в целом, перемещаются вдоль берега в северном направлении. Однако распределение частиц в пятне существенно зависит от выбора параметризации для миграции частиц. В работе принимались 4 типа параметризации: 1 – зависимость собственной вертикальной скорости от освещенности (суточный ход), 2 – от высоты прилива (давления), 3, 4 – от направления скорости приливного течения. Эти параметризации введены по данным наблюдений за некоторыми видами ихтиопланктона. Они позволяют описать характер их переноса в прибрежной зоне под влиянием приливов и речного стока.

Представление скорости миграции в виде функциональной зависимости от освещенности или от уровня прилива позволили добиться хорошего согласия результатов моделирования с имеющимися наблюдениями за пространственным распределением личинок на поздних стадиях эволюции в восточной части пролива Ла-Манш.

7. ВЫВОДЫ

С помощью комплексной численной модели, включающей в себя модели циркуляции, приливов и блуждающих частиц на примере восточной части пролива Ла-Манш, удалось показать, что:

1. Взаимодействие сильного приливного течения с бароклинным вдольбереговым потоком, формируемым речным стоком, существенно меняет структуру поля скорости течения в ЗВРС, приводя к усилению остаточного течения в этой зоне.

2. Вертикальный турбулентный обмен в ЗВРС значительно подавляется силами плавучести, однако там могут наблюдаться зоны повышенного уровня турбулентности, не связанные с ее локальной генерацией.

3. Распределение пассивных частиц и характер их горизонтального переноса при наличии ЗВРС и в ее отсутствие значительно отличаются друг от друга. Так, частицы, выпущенные вдали от берега, в первом случае концентрируются вдоль фронта, отделяющего ЗВРС от открытых вод пролива, в то время как при отсутствии ЗВРС частицы подходят непосредственно к берегу.

4. В приливном течении при наличии ЗВРС пространственно-временное распределение поля концентрации и характер горизонтального движения мигрирующих (имеющих собственную вертикальную скорость) частиц существенно зависит от параметризации миграции, т.е. зависимости вертикальной скорости от внешних факторов, таких как освещенность, уровень или фаза прилива. Во всех случаях происходит формирование зон аккумуляции частиц на границе ЗВРС, аналогичных тем, что наблюдаются для определенных видов ихтиопланктона.

Дальнейшее развитие исследований представляется в направлении углубления знаний об изменчивости ГФП, включая турбулентность, в исследуемом районе. Для этого планируются прямые измерения течений, температуры, солёности и турбулентных параметров, что позволит сделать более детальное сопоставление натурных и модельных результатов, а также более точно подобрать параметры модели циркуляции для более адекватного описания исследуемых процессов.

Авторы благодарят Научный совет Universite du Littoral, Wimereux, France за финансовую поддержку исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротенко К.А.* К формированию мезомасштабных аномалий концентрации вещества в зонах локальных апвеллингов в океане // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 3. С. 330–338.
2. *Коротенко К.А.* Химические отравляющие вещества, затопленные в Балтийском море: моделирование процессов переноса загрязнений в результате возможных утечек // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 1. С. 21–34.
3. *Коротенко К.А., Боуман М.Д., Дитрих Д.Е.* Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 3. С. 367–378.
4. *Коротенко К.А., Сенчев А.В.* К вопросу о формировании аномалий в поле концентрации ихтиопланктона вдоль французского побережья восточной части пролива ла-Манш // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 5. С. 686–696.
5. *Монин А.С., Озмидов Р.В.* Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
6. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 640 с.
7. *Bartsch J.* Numerical simulation of the advection of vertically migrating herring larvae in the North Sea // *Meeresforsch.* 1988. V. 32. № 1. P. 30–45.
8. *Blanton J.* Reinforcement of gravitational circulation by wind // *Coastal and Estuarine Studies*. 1996. V. 53. № LP. 47–58.
9. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional hydrodynamic model of New York harbour region // *J. Hydraulic Engineering*. 1987. V. 125. № 8. P. 799–816.
10. *Boss A., Thiel R., Nellen W.* Distribution and transport mechanisms of the upstream migrating flounder larvae, *Pleuronectes flesus* Linnaeus 1758, in the tidal Elbe river, Germany // *ICES CM*. 1995. V. M41. № 1. P. 1–10.
11. *Burke J.S., Tanakab M., Seikai S.* Influence of light and salinity on behaviour of larval Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) and implications for inshore migration // *Neth J. Sea Res.* 1995. V. 34. № 1. P. 59–69.
12. *Campos W.L., Kloppmann M., Westemhagen H.* Inferences from the horizontal distribution of dab *Limanda limanda* and flounder *Platichthys flesus* larvae in the south-eastern North Sea // *Neth. J. Sea Res.* 1994. V. 32. № 3. P. 277–286.
13. *Cushman-Roisin B., Korotenko K.A., Galos C.E., Dietrich D.E.* Simulation and characterization of the Adriatic Sea mesoscale variability // *J. Geoph. Res.* 2007. V. 112. № C3. P. 1–13.
14. *Flather R.A.* A tidal model of the north-west European continental shelf // *Memoires Soc. Roy. des Sciences de Liege*. 1976. V. 10. № 6. P. 141–164.
15. *Foreman M.G.G.* Manual for tidal heights analysis and prediction // *Pacific Mar. Sci.* 1977. Rep. № 77–10. 66 p.
16. *Grieco A., Harlay X., Koubbi P., Fraga Lago L.* Vertical migration offish larvae: Eulerian and Lagrangian observations in the eastern English Channel // *J. Plankton Res.* 2000. V. 22. № 8. P. 1813–1828.
17. *Grieco A., Koubbi P., Sautour B.* Ontogenic migration of *Pleuronectes flesus* larvae in the eastern English Channel // *J. Fish Biol.* 1997. V. 51 (Suppl. A). P. 385–396.
18. *Hunter J., Craig P., Phillips H.* On the use of random-walk models with spatially-variable diffusivity // *J. Corp. Phys.* 1993. V. 106. № 4. P. 366–376.
19. *Korotenko K.A., Mamedov R.M., Mooers C.N.K.* Prediction of the Dispersal of Oil Transport in the Caspian Sea Resulting from a Continuous Release // *Spill. Sci. Technol. Bull.* 2001. V. 5/6. № 6. P. 323–339.
20. *Lagadeuc Y., Brylinski J.M., Aelbrecht D.* Temporal variability of the vertical stratification on a front in a tidal Region Of Freshwater Influence (ROFI) system // *J. Mar. Systems*. 1997. V. 12. № 2. P. 147–155.
21. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. V. 20. № 7. P. 851–875.
22. *Miinchow A., Garvine R.W.* Dynamical properties of a buoyancy driven coastal current // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № C11. P. 20063–20078.
23. *Ozgokmen T.N., Griffa A., Mariano A.L., Piterbarg L.I.* On predictability of lagrangian trajectories in the ocean // *J. Atmosph. Ocean Technology*. 1999. V. 17. № 3. P. 366–383.
24. *Prandle D., Loch S.G., Player R.* Tidal flow through the Strait of Dover // *J. of Physical Oceanogr.* 1993. V. 23. № 1. P. 23–37.
25. *Sentchev A., Korotenko K.A.* Stratification and tidal current effects on larval transport in the eastern English Channel: Observations and 3D modeling // *Environ. Fluid Mech.* 2004. V. 4. № 3. P. 305–331.
26. *Sentchev Korotenko K.A.* Dispersion processes and transport patterns in the ROFI of eastern English Channel derived from a particle tracking method // *Continent. Shelf Res.* 2005. V. 25. № 4. P. 2293–2308.
27. *Sentchev Yaremchuk M., Lyard F.* Residual circulation in the English Channel as a dynamically consistent synthesis of shore-based observations of sea level and currents // *Continent. Shelf Res.* 2006. V. 26. № 3. P. 1884–2004.
28. *Signell R.P., Geyer W.R.* Numerical simulation of tidal dispersion around a coastal headland // *Coastal Estuarine Studies*. 1990. V. 38. № 4. P. 210–222.
29. *Simpson J.M.* Physical processes in the ROFI regime // *J. Marine Systems*. 1997. V. 12. № 1. P. 3–15.
30. *Visser A.* Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1997. V. 158. № 3. P. 275–281.
31. *Werner F.E., Perry R.I., Lough R.G., Namie C.E.* Trophodynamic and advective influences on Georges Bank larval cod and haddock. Fish // *Deep-Sea Res.* 1996. Part II. V. 43. № 5. P. 1793–1822.
32. *Xie L., Eggleston D.B.* Computer simulations of wind-induced estuarine circulation patterns and estuary-shelf exchange processes: The potential role of wind forcing on larval transport // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1999. V. 49. № 3. P. 221–234.
33. *Zimmerman, J.T.F.* On the Euler-Lagrange transformation and Stokes drift in the presence of oscillatory and residual currents // *Deep-Sea Res.* 1979. V. 26. № 2. P. 505–520.

Effects of the Particle Migration on the Features of their Transport by Tidal Currents in the Region of Freshwater Influence

K. A. Korotenko, A. V. Sentchev

Study of tidal currents and transport of migrating particle in the region of freshwater influence (ROFI) of the eastern English Channel was performed using a complex 3-D numerical model built up on the basis of a particle-tracking model coupled with hydrodynamic and finite-element tidal models. It was found that the interaction of tidal current with the baroclinic flow formed by riverine inflow along the French coast produces intensive steady residual current ($\sim 0.3 \text{ m s}^{-1}$). Numerical experiments with particle clusters were carried out to examine effect of different types of vertical migration of particles imitating on processes of their horizontal transport. In the experiments, the specification of migration parameterizations was inferred from observations of vertical motion of different types of ichthyoplankton. The experiments showed that the concentrations of particles and their horizontal velocity essentially depended on the type of migration. Details of the comparison of numerical results with observation performed in the region of interest are given.