

М. Н. Голенко

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СКОРОСТИ ПРИДОННОГО ТРЕНИЯ И ПЕРЕНОС ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ВДОЛЬ ТРАССЫ ЗАТОКА СОЛЕННЫХ ВОД В БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ

63

Выполнено численное моделирование циркуляции Балтийского моря для двух временных интервалов, соответствующих затокковой и незатокковой ситуациям. Для рассмотренных временных интервалов выявлены процессы, доминирующие в динамике придонного слоя моря в характерных точках, находящихся на трассе распространения затокковых вод в Балтике. Анализ изменчивости придонной скорости трения позволил оценить вероятность ресуспензии донных осадков в этих точках, а также определить вероятные пути их распространения.

A numerical simulation of the Baltic Sea circulation was carried out for two time intervals corresponding to the inflow and non-inflow cases. For these time intervals, I identified processes prevalent in the bottom layer dynamics at specific points on the pathway of the inflow waters propagation in the Baltic Sea. An analysis of the variability of bottom friction velocity made it possible to estimate the likelihood of bottom sediment resuspension at these points and to predict propagation pathways.

Ключевые слова: придонная скорость трения, ресуспензия осадков, затокки, Балтийское море, численное моделирование.

Keywords: bottom shear velocity; resuspension; inflow events; Baltic Sea; numerical simulation.

Введение

Известно, что возможность перехода донных осадков во взвешенное состояние (ресуспензия) контролируется так называемой скоростью придонного трения $U^* = (\tau/\rho)^{1/2}$, где τ — напряжение трения на дне, ρ — плотность воды, причем ресуспензия происходит при $U^* > U_r$, где U_r — пороговое значение скорости трения, зависящее от типа донных осадков (см., например, [3]). Поэтому исследование изменчивости скорости придонного трения позволяет судить о том, насколько подвижны донные осадки. Цель статьи — выявление изменчивости U^* и переноса взвешенных частиц в Балтийском море на трассе распространения затокков североморских вод путем численного моделирования. Предлагается провести численное гидродинамическое моделирование Балтийского моря для двух временных интервалов продолжительностью по



60 суток, соответствующих затоковой и незатоковой ситуациям. На основе сопоставительного анализа придонной скорости трения, придонной солености, а также скорости трения на поверхности, обусловленной ветром, для различных рассмотренных временных интервалов возможно будет выявить процессы, доминирующие в придонной динамике моря в отдельных характерных точках, находящихся на трассе распространения соленых североморских вод в Балтике. Другим обстоятельством, определяющим актуальность и прикладную значимость данного исследования, является то, что на трассе залива находится несколько захоронений химического оружия, осуществленных после окончания Второй мировой войны. Выполненный анализ позволит оценить вероятность ресуспензии донных осадков в этих областях, а также определить вероятные пути их распространения.

Постановка задачи численного моделирования

На основе Принстонской модели океана [1] выполнялось численное моделирование циркуляции Балтийского моря для временных интервалов продолжительностью по 60 суток, начиная с 26.12.2014 г. и 26.12.2015 г. На западе области моделирования была задана закрытая граница. Дата 26.12.2014 г. соответствует моменту времени, предшествующему заливу соленых вод в Борнхольмскую впадину, но при этом объем затоковой воды в Арконском бассейне к данному моменту был максимальным. Шестидесятидневный период, который начинается с 26.12.2015 г., является незатоковым и был выбран для сравнительного анализа с периодом предшествующего залива. На рисунке 1 представлена часть Балтийского моря, которая была областью моделирования. Жирными линиями выделена область (Южная Балтика), в которой горизонтальное разрешение (шаг сетки) составляло 0,5 морских миль по широте и долготе, а за пределами данной области шаг сетки был в 2 раза больше (1 морская миля). По вертикали было задано 55 сигма-слоев (при этом в самой глубоководной области Борнхольмской впадины (91,5 м) толщина придонного сигма-слоя составляла около 10 см).

В ходе исследования для пяти областей, находящихся на пути залива соленых вод в Балтийское море: *BS* (Борнхольмский пролив), *BD* (Борнхольмская впадина), *SS* (Слупский порог), *SCo* (выход из Слупского желоба), *HC* (Хоборгский канал) (рис. 1), было выполнено пространственно-временное осреднение квадрата придонной скорости трения U^2 , придонной солености S , а также квадрата скорости трения на поверхности моря, обусловленной ветром — U^*w^2 . Шаг осреднения по времени был равен 1 суткам. Для каждого из указанных 60-дневных временных диапазонов было выполнено моделирование при отсутствии ветрового воздействия и при реальном ветре, основанном на данных HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) [2].

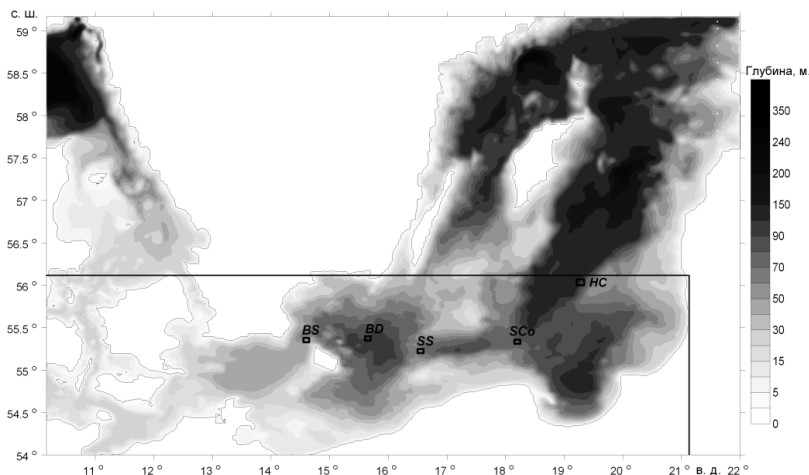


Рис. 1. Область моделирования с нанесенными границами пяти областей: *BS*, *BD*, *SS*, *SCo*, *HC*, для которых проводилось пространственное осреднение и последующий анализ данных квадрата придонной скорости трения U^*2 и квадрата скорости трения на поверхности U^*w^2 , обусловленной ветром. Жирными линиями околнурена область, в которой разрешение по горизонтали составляло 0,5 морских миль по широте и долготе. В остальной части области моделирования разрешение составляло 1 морскую милю вдоль соответствующих осей

Результаты моделирования придонной скорости трения и придонной солёности. Сопоставительный анализ придонной скорости трения и скорости трения на поверхности, обусловленной ветром

Вышеописанные численные эксперименты, выполненные при отсутствии ветрового воздействия, позволили оценить динамический эффект придонного трения, создаваемого исключительно гравитационными и плотностными течениями. Эксперименты с заданием реального ветра позволили получить реальные оценки скорости придонного трения и сопоставить их с эффектом воздействия гравитационных и плотностных течений, а также со скоростью трения на поверхности, обусловленной ветром.

Результаты расчетов показали, что в *BS* придонное трение, создаваемое гравитационным течением, как правило, превышало придонное трение, возникающее при реальном ветре в затоковый и незатоковый периоды (рис. 2, *a, б*). При этом во всех четырех экспериментах скорость придонного трения почти на протяжении всего периода расчетов превышала скорость трения на поверхности, обусловленную ветром. Последнее обстоятельство объясняется узким подводным руслом и мелководностью Борнхольмского пролива — 48,5 м. Следует также отметить, что ветровое воздействие не оказало существенного воздействия на характер изменения солёности в области *BS* в течение двух рассмотренных интервалов времени (рис. 2, *в, г*). Это означает, что придонная динамика в данной области определяется главным образом плотностными течениями, которые присутствуют вне зависимости от ветрового воздействия.

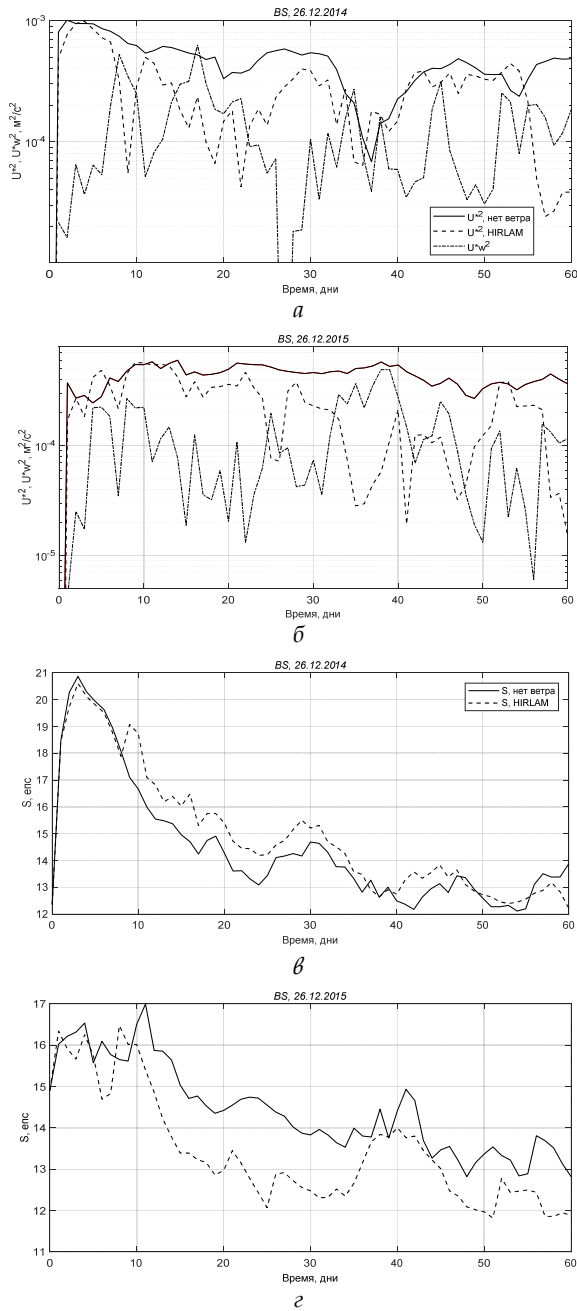


Рис. 2. Временные ряды: *а, б* — осредненных по пространству значений квадрата скорости придонного трения U^2 при отсутствии ветрового воздействия (черная сплошная линия), при задании ветра HIRLAM (редкий пунктир) и квадрата скорости трения на поверхности моря, обусловленной ветром, U^*w^2 (частый пунктир) для области, находящейся в Борнхольмском проливе (BS) (см. рис. 1); *в, г* — придонной солёности S. Представленные временные ряды построены по данным моделирования при задании начальной термохалинной стратификации на 26.12.2014 г. (*а, в*) и 26.12.2015 г. (*б, г*)



Соотношение исследуемых динамических характеристик на выходе из Слупского желоба (область *SCo*, рисунок не приведен в статье) соответствует аналогичным соотношениям в Борнхольмском проливе. Видимо, это объясняется схожими морфологическими характеристиками рассматриваемых областей. Различие отмечается лишь в поле солёности: в период затора солёность в Слупском желобе выше, чем в его отсутствие на 3 *eps*. Объяснить это можно существованием Слупского порога, перекрывающего выход максимально солёной придонной воды из Борнхольмской впадины, в то время как перед Борнхольмским проливом такого регулятора нет.

Соотношение величин U^{*2} и U^*w^2 в глубоководных областях *BD* (рис. 3, *a, б*) и *HC* (рисунок не приведен в статье) существенно отличается от вышеописанного соотношения в области *BS*. В данных областях U^*w^2 всегда превышает U^{*2} . В области *BD* на протяжении первых 30 дней скорости придонного трения, обусловленные только плотностным течением, сопоставимы с придонными скоростями, генерируемыми при задании ветрового воздействия. Спустя 30 дней плотностные течения существенно ослабевают (U^{*2} уменьшается в 10 раз в отсутствии ветра), на данном этапе ветровое воздействие вносит основной вклад в формирование скорости придонного трения. Отметим также то, что в области *BD* в присутствии ветра наблюдаются более низкие значения солёности на протяжении всего периода расчетов по сравнению с ситуацией без ветра (рис. 3, *в, г*). Видимо, это объясняется тем, что при ветровом воздействии происходит более интенсивная вертикальная диффузия соли, вследствие чего плотные заточковые воды более интенсивно перемешиваются с вышележащими водами. В области *HC*, более удаленной от источника солёных вод, наблюдается схожая картина с той разницей, что в течение первых 30 дней придонная динамика обусловлена главным образом ветровым воздействием, а в течение последующих 30 дней вклады ветрового воздействия и плотностного течения, достигшего к этому моменту данной области, сопоставимы. Данный сценарий также находит отражение в изменении значений солёности в области *HC*: солёность имеет более высокие значения в период с 30-х по 60-е сутки. Поскольку область *HC* более удалена от источника солёных вод, из-за более низких фоновых значений солёности в придонной области их разница в присутствии и отсутствии ветрового воздействия не столь существенна, как в области *BD*.

На Слупском пороге (область *SS*, рисунок не приведен в статье) в заточковый период на протяжении первых 30 дней динамическое воздействие плотностного течения, сформировавшегося в отсутствие ветрового воздействия, на придонную область превышает динамическое воздействие моря при реальном ветре. В последующие 30 дней динамические воздействия плотностного течения и течения, сформированного под воздействием ветра, сопоставимы. При этом скорость трения на поверхности U^*w^2 , как правило, превышает скорость придонного трения U^{*2} .

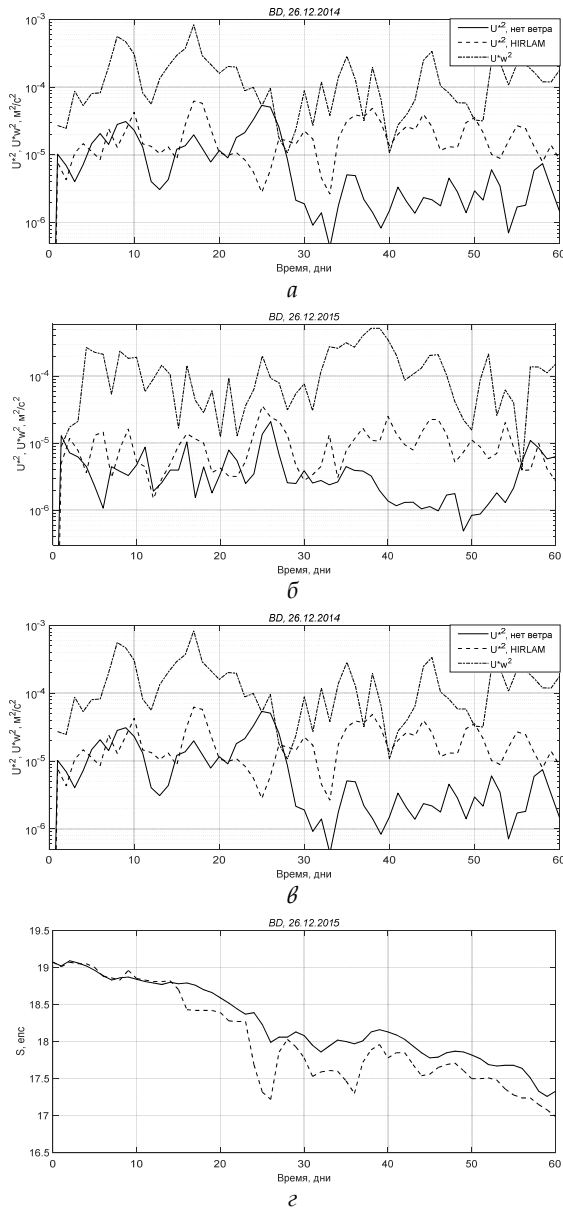


Рис. 3. Временные ряды, представленные на рисунке 2, для области, находящейся в Борнхольмской впадине (BD)

С целью математического обоснования вышеприведенных выводов были посчитаны коэффициенты корреляции между квадратом придонной скорости трения и придонной соленостью K (U^{*2} , S_b), а также между квадратом придонной скорости трения и квадратом скорости трения на поверхности, обусловленной ветром, K (U^{*2} , U^*w^2) для различных ситуаций: с ветром / без ветра (только K (U^{*2} , S_b)), при затоке / отсутствии затока (табл. 1). Также было посчитано предельное зна-



чение коэффициента корреляции $K = \pm 0,34$, которое с вероятностью 0,995 является статистически значимым согласно t-критерию Стьюдента для анализируемых выборок. Следует сказать, что при расчете коэффициентов корреляции изначально планировалось выделить колебания анализируемых величин с периодами < 15 суток, обусловленные синоптической изменчивостью, и выполнить отдельно расчеты для синоптической и более длиннопериодной изменчивости. Однако спектр плотности квадрата придонной скорости трения U^{*2} для рассматриваемых областей показал отсутствие пиков в области значений периодов > 15 суток, поэтому расчеты коэффициентов корреляции выполнялись для исходных временных рядов. Также отметим, что поскольку дискретность анализируемых временных рядов составляет 1 сутки, то инерционные колебания в них также не разрешены.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции $K(U^{*2}, S_b)$ и $K(U^{*2}, U^{*w^2})$ при задании ветрового воздействия HIRLAM для ситуаций с начальными распределениями T и S на 26.12.2014 г. и 26.12.2015 г., соответствующих Большому затоку и его отсутствию; коэффициенты корреляции $K(U^{*2}, S_b)$ при отсутствии ветрового воздействия для затоковой и незатоковой ситуаций. Предельное значение коэффициента корреляции, которое с вероятностью 0,995 является статистически значимым согласно t-критерию Стьюдента составило $K = \pm 0,34$

Параметр/область	<i>BS</i>	<i>BD</i>	<i>SS</i>	<i>SCo</i>	<i>HC</i>
$K(U^{*2}, S_b)$, HIRLAM, заток	0,64	0,06	0,43	0,55	-0,48
$K(U^{*2}, S_b)$, нет ветра, заток	0,90	0,37	0,74	0,47	0,79
$K(U^{*2}, U^{*w^2})$, заток	-0,29	0,45	-0,16	-0,1	0,37
$K(U^{*2}, S_b)$, HIRLAM, нет затока	0,54	-0,23	0,57	0,71	-0,25
$K(U^{*2}, S_b)$, нет ветра, нет затока	0,23	0,12	0,81	0,82	0,45
$K(U^{*2}, U^{*w^2})$, нет затока	-0,18	0,29	-0,26	-0,39	-0,03

Низкие (но в большинстве случаев статистически незначимые) оценки коэффициента корреляции $K(U^{*2}, U^{*w^2})$ говорят о том, что ветер в основном лишь опосредованно влияет на придонную динамику исследуемых районов, вызывая усиление горизонтальных градиентов давления вследствие нагонов, апвеллингов / даунвеллингов, внутренних волн и других процессов. При этом в *BS* в совокупности для затокового и незатокового периодов отмечаются самые низкие значения $K(U^{*2}, U^{*w^2})$, в то же время корреляция придонной скорости трения с придонной соленостью $K(U^{*2}, S_b)$ максимальна для всех рассмотренных ситуаций, что подтверждает вывод о преобладании плотностных течений в придонной динамике данного района. Схожие закономерности полученных оценок наблюдаются также и в других относительно мелководных областях с узким руслом – *SS*, *SCo*. При этом в незатоковый период значения $K(U^{*2}, S_b)$ для областей *SS* и *SCo* превышают соответствующие значения для области *BS*, в особенности в отсутствии ветра. По-видимому, к данному времени (конец декабря 2015 г.) плотная вода предшествующего затока заполнила Слупский желоб и начала распространяться вдоль него в виде плотностного течения.



В области **BD** в затоковый период отмечается самое высокое (и статистически значимое) значение $K (U^{*2}, U^{*}w^2) = 0,45$, а также самое низкое значение $K (U^{*2}, S_b) = 0,06$, что свидетельствует о преобладающем влиянии ветра (опосредованном) нежели плотностных течений, на придонную динамику в данной области. Схожие соотношения K наблюдаются в глубоководной области **HC**.

Результаты модельных расчетов также показали, что квадрат скорости придонного трения в областях захоронения отравляющих веществ (ОВ) – **BD** и **HC** – никогда, включая период затока, не превышал порог ресуспензии для взвешенного вещества и мелкозернистого песка: $4 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^2$ – типичных донных отложений, и только в редких случаях достигал порога ресуспензии взвешенного биогенного материала (наилка) – $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Из всех мгновенных модельных значений квадрата скорости придонного трения, выданных с дискретностью 2 ч, доли значений, превысивших данный порог, составили 0,05 и 0,01 для точек, находящихся в областях **BS** и **HC** соответственно. Дальнейших исследований требует вопрос, насколько это опасно. Опасность заключается в том, что тонкий взвешенный биогенный материал обладает высокой сорбционной способностью, поэтому он может быть переносчиком ОВ. Однако в отличие от илов представительные по массе пробы наилка получить значительно труднее. В пробах донных отложений, полученных обычными способами (с помощью трубок для взятия проб грунта, черпаков), содержание наилка ничтожно мало, поэтому специально его никто не собирает.

Результаты расчета траекторий лагранжевых частиц от придонных источников, находящихся на трассе затока

Для исследования путей распространения взвешенного вещества от придонных источников в условиях Большого затока и его отсутствия было проведено моделирование распространения лагранжевых частиц. С этой целью был применен программный комплекс по расчету случайных блужданий лагранжевых частиц в среде с неоднородной диффузивностью, сопряженный с численной моделью РОМ [3; 4]. Рассчитанные с помощью РОМ поля скорости течений и эффективных коэффициентов диффузии наряду со скоростью оседания частицы служат входными параметрами для модели случайных блужданий. По показаниям скорости рассчитывается компонента перемещения частицы за счет адвективного переноса. На основе данных коэффициентов диффузии рассчитывается случайная компонента перемещения за счет турбулентности. Для расчета вертикальной составляющей случайного смещения применена специальная формула, дающая корректный результат для среды с неоднородной диффузивностью. При этом исходный программный комплекс был модифицирован таким образом, что расчет траекторий выполнялся не по «замороженному» полю скоростей, получаемому при выходе модели на квазистационарный режим при задании однородного во времени и пространстве ветрового воз-

действия, а с учетом меняющейся со временем динамической структуры вод. Усовершенствованный алгоритм позволяет выполнять расчеты траекторий для реальной нестационарной динамики вод. Расчеты траекторий были выполнены, начиная с 01.01.2015 г. и с 01.01.2016 г. Местоположение источника совпадает с центром области **BD** (см. рис. 1, с. 65) и располагается в пределах области захоронения ОВ. Модельные частицы были выпущены на расстоянии 10 см от дна.

На рисунке 4, *a–г* представлены траектории распространения лагранжевых частиц при задании в модели начальных условий на 26.12.2014 г., когда затоковая вода максимально заполнила Арконский бассейн, с учетом реального ветра (*a*) и без ветра (*б*); при задании начальных условий на 26.12.2015 г., что соответствует ситуации отсутствия Большого залива, с учетом реального ветра (*в*) и без ветра (*г*). Были посчитаны траектории частиц с нулевой скоростью осаждения и со скоростью осаждения, равной 2 м/сут. Поскольку при задании нулевой скорости осаждения траектории получились более разнообразными, то в данной работе анализируются именно они. Траектории, посчитанные для ситуаций с ветром, показывают, что в затоковый и незатоковый периоды частицы в течение почти 60 дней так и не покинули Борнхольмский бассейн (рис. 4, *a, б*).

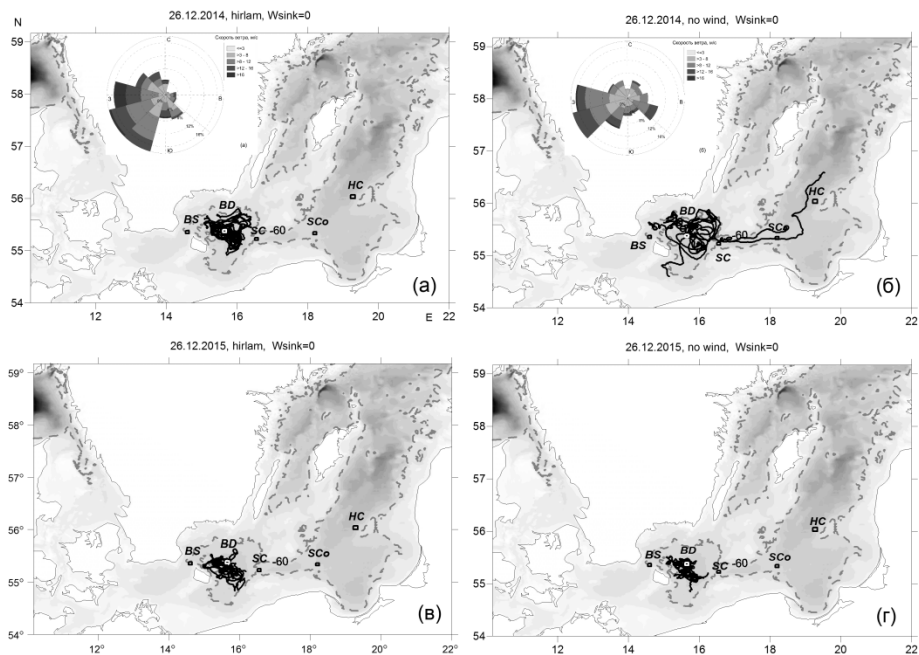


Рис. 4. Траектории распространения лагранжевых частиц при задании в модели начальных условий на 26.12.2014 г., когда затоковая вода максимально заполнила Арконский бассейн, с учетом реального ветра (*a*) и без ветра (*б*); на 26.12.2015 г., что соответствует ситуации отсутствия Большого залива, с учетом реального ветра (*в*) и без ветра (*г*). Серой пунктирной линией обозначена изобата 60 м. Для ситуаций с ветром в верхней части рисунков представлены розы ветров

Розы ветров для обоих периодов, представленные в верхней части рисунка 4, а, б, свидетельствуют о существенном преобладании западных и юго-западных ветров. Такие ветра блокируют перенос соленой воды и частиц на восток через Слупский желоб, как при Большом затоке, так и в его отсутствие. Тем не менее данные натурных наблюдений в Слупском желобе, выполненных весной 2015 г., показывают, что затоковая вода с повышенной плотностью проникла в Слупский желоб [5]. Поэтому для исследования режима распространения затоковых вод в Слупский желоб необходимо продолжить модельные расчеты на несколько последующих месяцев (март-апрель 2015 г.). Такую задачу автор ставит на ближайшее будущее.

Иначе выглядят траектории, построенные на основе расчетов без ветра. Траектории для ситуации затока, представленные на рисунке 4, в, показывают, что за 60 дней частицы из Борнхольмской впадины (область *BD*) проникли в Слупский желоб и достигли Готландского бассейна. Анализ временной серии распределений придонной солености с наложенными векторами горизонтальной скорости на 52-м сигма-уровне (рисунок не приведен в статье) показал механизм проникновения воды в Слупский желоб. На начальном этапе расчетов, когда заток активно поступает через пролив, в Борнхольмском бассейне образуется циклоническая циркуляция – вихрь, затем этот вихрь ослабевает, и вода у дна отклоняется на север и обходит впадину антициклонически из-за экмановского переноса в придонном слое. Подобная картина течений в Борнхольмском бассейне была получена и подробно описана и в предыдущих исследованиях [3]. Траектории, полученные для незатоковой ситуации без ветра (рис. 4, г), свидетельствуют об отсутствии перетока плотной воды через Слупский порог.

На рисунке 5 показано, на каком расстоянии от дна происходит распространение частицы, проникшей в Слупский желоб и достигшей Готландского бассейна. На протяжении большей части пути частица не покидает придонный слой, в среднем находясь в пределах 10 м от дна, совершая флуктуации в пределах также около 10 м.

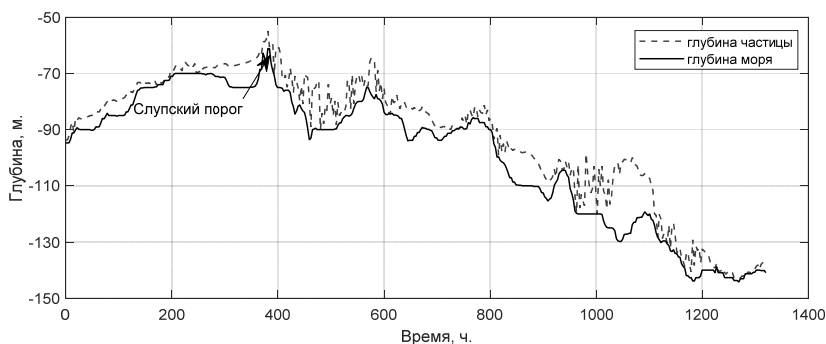


Рис. 5. Положение частицы, проникшей в Слупский желоб и достигшей Готландского бассейна (пунктирная линия), относительно дна (сплошная линия)



Результаты и выводы

1. В Борнхольмском проливе — мелководной области с узким руслом, находящейся на трассе затока соленых североморских вод в Балтику, на протяжении рассмотренных временных интервалов придонная динамика определялась главным образом плотностными течениями, которые присутствовали в этой области вне зависимости от ветрового воздействия.

2. Западные и юго-западные ветра с приблизительно равномерно распределенными скоростями в диапазоне 8–16 м/с блокируют перенос соленой воды из Борнхольмского бассейна на восток через Слупский желоб как при Большом затоке, так и в его отсутствие.

3. Результаты модельных расчетов показали, что скорость придонного трения в областях захоронения ОВ — *BD* (Борнхольмская впадина) и *HC* (Хоборгский канал) — никогда, включая период затока, не превышала порог ресуспензии для взвешенного вещества и мелкозернистого песка и только в редких случаях достигала порога ресуспензии наилка. Дальнейшего исследования требует вопрос, насколько это опасно для морской экологии.

Благодарности.

Расчет и анализ скорости придонного трения выполнены в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0012), расчет и анализ траекторий лагранжевых частиц выполнен при поддержке РФФИ (грант № 18-05-80031).

Список литературы

1. *Blumberg A.F., Mellor G.L. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. Washington, DC, 1987.*
2. *Männik A., Merilain M. Verification of different precipitation forecasts during extended winter-season in Estonia // HIRLAM Newsletter. 2007. Vol. 52. P. 65–70.*
3. *Журбас В.М., Элькен Ю., Вяли Г. и др. Пути переноса взвешенных частиц в придонном слое Южной Балтики в зависимости от ветровых условий (численные эксперименты) // Океанология. 2010. Т. 50, №6. С. 890–903.*
4. *Голенко М.Н., Голенко Н.Н. Исследование распространения пассивной примеси и лагранжевых частиц в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2014. Вып. 1.: Естественные науки. С. 42–50.*
5. *Rak D. The inflow in the Baltic Proper as recorded in January–February 2015 // Oceanologia. 2016. Vol. 58, iss. 3. P. 241–247.*

Об авторе

Мария Николаевна Голенко — науч. сотр. лаборатории геоэкологии, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: m.golenko@yahoo.com

The author

Dr Mariya N. Golenko, Research Fellow, Laboratory of Geoecology, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: m.golenko@yahoo.com