Исследование структурных особенностей прибрежных термохалинных фронтальных зон в Юго-Восточной части Балтийского моря по данным численного моделирования и космического мониторинга

М.Н. Голенко, Н.Н. Голенко, Т.В. Буканова

Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН Калининград, 236000, Россия E-mail: m.golenko@yahoo.com

Выполнено численное гидродинамическое моделирование широкой акватории Балтийского моря на основе POM (Princeton Ocean Model) (Blumberg, Mellor, 1987) для периода с 1 января по 31 мая 2012 г. при задании реального атмосферного воздействия. Проведена валидация модельных расчетов поверхностной температуры в Юго-Восточной Балтике по данным спутников Terra и Aqua (MODIS). На основе совместного анализа данных численного моделирования и космического мониторинга исследованы структурные особенности термохалинных и динамических прибрежных фронтальных зон, вызванных весенним прогревом вод, а также периодическим апвеллингом. Проанализированы метеоусловия (скорость ветра и поток тепла), описаны их сочетания, вызвавшие формирование наблюдаемых фронтальных зон. Показано, что в исследуемом районе атмосферное воздействие с учетом потока тепла практически не ведет к формированию существенных структурных различий в поле поверхностной горизонтальной скорости по сравнению с ситуацией без его учета (при одинаковом ветровом воздействии), однако приводит к ее увеличению в среднем на 2–7 см/с. Увеличение скорости может быть объяснено тем, что в период весеннего прогрева приповерхностный слой воды становится легче, за счет устойчивого вертикального градиента плотности ветровой импульс концентрируется в приповерхностном слое и, как результат, придает ему более высокую скорость.

Ключевые слова: Балтийское море, сопоставительный анализ спутниковых и модельных данных ТПО, прибрежные фронтальные зоны, скорость течения

Введение

В ходе работы исследуется совместное влияние потоков тепла и импульса от атмосферы в море на формирование структурных особенностей термохалинных и динамических полей в поверхностном слое Юго-Восточной Балтики. Для проведения расчетов был выбран временной интервал с 01 января по 31 мая 2012 г. Предварительный анализ спутниковых изображений поверхностной температуры и концентрации хлорофилла "а" в Юго-Восточной Балтике показал, что в указанный период времени в этом районе формировались значительные пространственные неоднородности данных распределений, которые с течением времени меняли очертания. Задача настоящей работы состоит в том, чтобы определить, какие особенности атмосферных воздействий привели к формированию наблюдаемых термохалинных и динамических структур, а также описать пространственно-временные характеристики этих структур.

Задача о формировании прибрежных фронтальных зон при совместном воздействии реальных потоков тепла и импульса на морскую поверхность имеет ряд практических приложений. Например, позволяет прогнозировать локальные области наиболее интенсивного прогрева вод, что важно для рыбного промысла, при планировании отдыха на морском побережье. С другой стороны, такие области могут стать источником высокой концентрации сине-зеленых водорослей.

Гидродинамическая модель

В ходе исследования выполнен анализ данных о поверхностной скорости течения и температуры на всей акватории Балтийского моря за исключением Ботнического и восточной части Финского заливов (рис. 1), полученных при моделировании на основе РОМ. Модель является трехмерной, нестационарной, нелинейной, в ней используется гидростатическое приближение. Для расчёта коэффициентов вертикального обмена импульсом, теплом и солью в РОМ встроена подмодель турбулентности с замыканием второго порядка типа Меллора-Ямады (Blumberg, Mellor, 1987). Придонный погранслой описывается стандартной логарифмической зависимостью (Blumberg, Mellor, 1987). С боков были заданы закрытые границы. Моделирование проводилось при реальном комплексном атмосферном воздействии, основанном на данных операционной модели HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) (были заданы напряжение ветра и поток тепла). Начальные распределения полей температуры и солености были взяты из оперативной модели HIROMB - BOOS (High Resolution Operational Model for the Baltic) на 01.01.2012. Пространственное разрешение модельной сетки по горизонтали составляло 1,8 × 1,8 км, по вертикали был задан 31 сигма уровень. Заданное разрешение не превышает оценку бароклинного радиуса деформации в данном районе, равную ~ 5 км (Fennel, Seifert, Kayser, 1991). Следовательно, используемая модель способна воспроизвести бароклинную неустойчивость квазигеострофичеких течений, которая ведет к образованию вихревых структур, зачастую наблюдаемых на спутниковых распределениях ТПО, и концентрации хлорофилла "а".



Рис. 1. Батиметрическая карта Балтийского моря за исключением Ботнического и восточной части Финского заливов. Изображенная область является областью моделирования. Прямоугольником обозначена Юго-Восточная часть Балтийского моря

Сравнительный анализ данных моделирования и спутниковых данных ТПО в Юго-Восточной Балтике. Анализ сопутствующих метеоусловий

В ходе исследования была выполнена валидация модели с привлечением спутниковых изображений поверхности Юго-Восточной части Балтийского моря в инфракрасном диапазоне. Были использованы данные ТПО со спутников Terra и Aqua (со сканером MODIS на борту), которые имеются в свободном доступе в интернете (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov). Горизонтальное разрешение проанализированных данных составляет 1км × 1км. Был рассмотрен период времени с 01 января по 31 мая 2012 г. Именно для этого периода удалось выбрать наиболее контрастные спутниковые изображения ТПО, на которых почти отсутствует облачность. На рис. 2 в левой колонке представлены спутниковые распределения ТПО. Белые участки соответствуют либо облачности, либо зонам градиентов, которые были вырезаны при обработке данных. Подробное описание анализируемых спутниковых данных приведено в работе (Буканова, Стонт, Гущин, 2015). На данном рисунке каждому спутниковому изображению в правой колонке соответствуют распределения ТПО и поверхностной скорости течения, построенные по данным численного моделирования для близкого момента времени (разница во времени не превышает 2 ч.). В правом нижнем углу каждого модельного распределения указаны дата и местное время, которым соответствуют представленные спутниковые данные. Цветовые шкалы, в которых представлены спутниковые и модельные данные близко соответствуют друг другу.

Рассмотрим спутниковое и модельное распределения ТПО, относящиеся приблизительно к моменту времени 02.03.2012, 12:00ч. (рис. 2а, б). На спутниковых данных отчетливо прослеживаются языки относительно холодных вод с температурой на 1-2°С ниже температуры окружающей воды, простирающиеся из прибрежных областей у основания и к северу от окончания Куршской косы в сторону открытого моря. Языки имеют извилистую форму, внутри них присутствуют температурные неоднородности, их окончания устремлены на север и северо-восток. Подобные языки холодных вод с описанными характерными чертами в тех же областях отмечаются и на модельных распределениях ТПО. Анализ скорости ветра показал, что приблизительно за 5 суток до рассматриваемого момента времени (с 26.02.2012, 00:00 ч.) развился северный ветер, скорость которого достигала 13-14 м/с. Северный ветер является самым благоприятным для развития апвеллинга в районе к северу от Куршской косы, а также благоприятствует его развитию у побережья косы. Через 1,5 суток направление ветра поменялось на юго-западное и западное, что, видимо, ориентировало языки апвеллинговых вод на север и северо-восток. Приблизительно за сутки до рассматриваемого момента времени вновь подул северный ветер, скорость которого достигала 12 м/с. В этот период, вероятно, произошел повторный апвеллинг, с которым связано появление в поверхностном слое новых пятен холодных вод, непосредственно прилегающих к берегу. Описанный гидродинамический сценарий, состоящий из серии апвеллингов, подтверждают модельные распределения поверхностной скорости течений: северо-восточный ветер сопровождался вдольбереговой струей, направленной в ту же сторону, что и ветер.



Рис. 2. В левой колонке представлены распределения ТПО в Юго-Восточной Балтике по данным спутников Terra и Aqua (MODIS). В правой колонке представлены распределения ТПО по данным численного моделирования для моментов времени, близких к тем моментам, к которым относятся спутниковые данные

Модельное распределение ТПО, относящееся к моменту времени 12.03.2012, 12:00 ч. (*рис. 2в, г*), довольно реалистично отображает тенденцию изменения температуры в направлении от берега к открытому морю в период релаксации вышеописанного апвеллинга. В прибрежной области на спутниковом и модельном распределениях еще отчетливо прослеживаются размытые языки апвеллинговых вод, изменившие очертания под воздействием неоднородных течений в открытой части моря. В открытом море отмечается повышение поверхностной температуры, обусловленное дневным прогревом.

На распределениях, относящихся к моменту времени 22.03.2012, 10:00 ч. (*puc. 2д, e*), в районе, прилегающем к Куршской косе, и у побережья Литвы по-прежнему сохраняется область вод пониженной температуры. В период, предшествующий данному моменту времени, в рассматриваемом районе преобладал умеренный и слабый западный ветер. Анализируемые распределения показывают, что области холодных апвеллинговых вод могут довольно продолжительно существовать при слабых скоростях течения.

На модельном распределении ТПО, относящемся к моменту времени 28.03.2012, 10:00 ч. (*рис. 2ж, з*), наблюдается приблизительно тот же диапазон температур, что и на спутниковых данных, однако некоторые отчетливые структурные особенности не были воспроизведены при моделировании. К таким особенностям, прежде всего, относится область холодных вод к северу от 55,8°с.ш. Анализ полного потока тепла и уровня облачности в рассматриваемой области показал, что в ее северной части не наблюдалось повышенной отдачи тепла от моря в атмосферу, но уровень облачности был выше по сравнению с областью, расположенной южнее, о чем также свидетельствует прерывистая структура данных в северо-западной части изображения. Поэтому видимое на спутниковом изображении понижение ТПО можно объяснить тем, что присутствие облачности могло снизить достоверность спутниковых данных. Возможно, алгоритмы, корректирующие значения температуры в условиях облачности, чрезмерно ее уменьшили.

На следующих представленных в работе распределениях ТПО, относящихся к моменту времени 05.04.2012, 12:00 ч. (*рис. 3a, б*), сходства структур отмечаются во всей представленной области. Представленные распределения также демонстрируют проявление прибрежного апвеллинга (у северного побережья Литвы) и локальный прогрев прибрежных вод (к западу от косы Хель и у побережья Самбийского п-ва), вызванный ослаблением ветра, переносящего с севера холодные воздушные массы, в прибрежной области в дневные часы.

Следующие проанализированные распределения ТПО относятся к моментам времени 24.04.2012, 12:00 ч. (*puc. 3в, г*), 01.05.2012, 11:30 ч. (*puc. 4a, б*), 20.05.2012, 12:00 ч. (*puc. 4b, c*) и 24.05.2012, 11:35 ч. (*puc. 4 d, e*) и отображают структурные особенности прибрежной фронтальной зоны в период весеннего прогрева. На спутниковых изображениях и модельных распределениях ТПО четко прослеживается полоса теплых прибрежных вод, которая характеризуется значительными пространственными неоднородностями и искривлениями границ. Эта полоса, как правило, является наиболее узкой у основания Куршской Косы, в направлении севера она расширяется, что объясняется расширением склоновой области в этом направлении (*puc. 1*). При этом наиболее широкая область прогретых прибрежных вод отмечается в Гданьском заливе.



Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для апреля 2012 г.

На выходе из Гданьского залива в открытое море, а также в p-не косы Хель наблюдается несколько ответвлений теплых вод в сторону открытого моря на расстояние ≈ 10–30 км. Описанная тенденция изменения температуры была воспроизведена моделью. Однако явных узких языков, распространяющихся из Гданьского залива и от косы Хель, которые видны по спутниковым данным, не наблюдается.

Распределение модельной поверхностной скорости показало, что в областях формирования филаментов – в центре Гданьского залива и в районе косы Хель – наблюдаются локальные увеличения скорости течения, направленного на северо-запад и запад, и его отклонения в центре Гданьского залива и в р-не косы Хель в северном и северо-западном направлениях соответственно. Анализ ветровых условий показал, что у побережья Юго-Восточной Балтики рассматриваемому моменту времени предшествовал очень слабый ветер переменного направления. Отсутствие ветра, видимо, вызвало прогрев поверхностных вод в прибрежной области. Далее развился умеренный восточный ветер со скоростью около 8 м/с, который в Гданьском заливе и в районе окончания косы Хель вызвал формирование вдольберегового струйного течения со скоростью 0,2–0,25 м/с, направленного на северо-запад. Огибая изогнутую береговую линию и неоднородный склон (*puc. 1*), вдольбереговое течение отклонилось в сторону открытого моря, перенося с собой в северном направлении теплые прибрежные воды.

Подобный теплый язык отмечаетя также на треверзе середины Куршской косы как по спутниковым так и по модельным данным, относящимся к 20.05.2012 г. (*рис. 4в, г*). Формирование этой неоднородности в поле температуры связано с неоднородностью рельефа – в области середины Куршской косы присутствует локальное поднятие (*рис. 1*), которое вызывает отклонение прибрежной струи в сторону открытого моря (Журбас и др., 2004; Голенко, Голенко, Щука, 2009).



Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для мая 2012 г.

В ходе исследования был также проанализирован ряд спутниковых распределений концентрации хлорофилла "a". Было отмечено, что структурные особенности спутниковых распределений хлорофилла "a" и ТПО для близких моментов времени (± 0,5 сут) не вполне согласуются. Отчетливое соответствие наблюдается в основном лишь для наиболее контрастных и крупномасштабных структур (с относительно высокими горизонтальными градиентами по температуре, которые поддерживается в течение длительного времени). К таким структурам относятся сезонные прибрежные температурные фронтальные зоны, сформировавшиеся вдоль значительной части побережья исследуемого района, крупномасштабные языки апвеллинговых вод. В других областях распределение концентрации хлорофилла имеет индивидуальные характеристики. По-видимому, это связано с тем, что концентрация хлорофилла зависит не только от температуры, но также и от концентрации биогенных и др. элементов, прозрачности вод, их освещенности солнечным светом. Поскольку модель не учитывает ряд вышеперечисленных факторов, то основное внимание было уделено сопоставительному анализу данных моделирования именно со спутниковыми данными ТПО, т.к. представляется, что выводы, полученные на основании именно этого анализа, являются наиболее аргументированным и обоснованными.

Выявление роли совместного воздействия потоков тепла и импульса при формировании термохалинных и динамических структурных особенностей прибрежных фронтальных зон

Для выявления роли ветрового воздействия и потока тепла на формирование отличительных особенностей гидрофизических полей в рассматриваемом районе был использован следующий подход. Были проведены численные эксперименты с учетом реального ветрового воздействия и полного потока тепла, а также с учетом ветрового воздействия, но без учета потока тепла. Оба модельных эксперимента были начаты 1 мая 2012 г. в 00:00 ч. Период расчетов был равен одному месяцу. Как показал анализ данных, представленных в предыдущем разделе, именно в мае 2012 г. в поле поверхностной температуры наблюдались наиболее контрастные фронтальные зоны, поэтому этот месяц представляется наиболее репрезентативным для данного исследования. Анализ горизонтальной составляющей скорости приповерхностного течения показал, что в случае учета полного потока тепла в отдельных областях скорость течения оказалась выше, чем в случае отсутствия потока тепла. На рис. 5 приведены распределения температуры, на которые наложены вектора скорости поверхностного течения $a, \, \delta, \, u$ распределения модуля скорости поверхностного течения в, г, посчитанные без учета и с учетом потока тепла, соответственно. Представленные распределения соответствуют 27 сут 18 ч. модельного времени. На рис. 5в и г видно, что увеличение скорости наблюдается как в отдельных прибрежных районах, так и в открытом море. В среднем скорость возросла на 2-7 см/с. Следует также отметить, что для каждого проанализированного момента времени с дискретностью 3 ч. структуры горизонтальных течений, полученные с учетом и без учета потока тепла, в поверхностном слое оказались близки. Наблюдаемое в различных районах исследуемой области увеличение приповерхностной скорости можно объяснить следующим образом. Одинаковое по силе ветровое воздействие передает одинаковый импульс от атмосферы морю. В случае учета полного потока тепла в поверхностном слое в период весеннего прогрева образуется устойчивый градиент плотности, связанный с градиентом по температуре. Относительно тонкий прогретый приповерхностный слой воды становится легче, и ветровой импульс придает ему большую скорость. Также из-за существования устойчивого градиента плотности ветровой импульс в большей степени концентрируется в приповерхностном слое.



Рис. 5. Модельные распределения температуры, на которые наложены вектора горизонтальной скорости поверхностного течения – а, б; распределения модуля скорости поверхностного течения, посчитанные без учета и с учетом потока тепла, соответственно – в, г,. Представленные распределения соответствуют 18:00 ч. 27 мая 2012 г. Модельные расчеты были начаты 1 мая 2012 г.

Результаты и выводы

1. В ходе сопоставительного анализа данных моделирования и спутниковых распределений ТПО в Юго-Восточной Балтике за период 01 января – 31 мая 2012 г. были выявлены сходные пространственные структуры. К таким структурам относятся языки холодных апвеллинговых вод, внутри которых присутствуют температурные неоднородности, связанные с периодической интенсификацией и ослаблением прибрежного ветрового апвеллинга. Выявлено сходство очертаний вдольбереговых областей наиболее прогретых вод, сформировавшихся в определенных районах в период весеннего прогрева. В целом следует отметить, что на протяжении всего периода расчетов модель довольно реалистично отобразила структуру относительно крупномасштабных температурных неоднородностей, сформировавшихся под воздействием интенсивного атмосферного воздействия.

2. При численном моделировании не всегда удавалось достаточно четко воспроизвести структурные особенности филаментов относительно теплых вод, распространившихся из прибрежной и склоновой областей в сторону открытого моря вследствие ответвления струйных течений (в частности, на выходе из Гданьского залива). Предположительно это связано с недостаточно высоким горизонтальным разрешением области моделирования. Вероятно, бароклинная неустойчивость, с которой связано формирование характерных черт наблюдаемых языков, возникает вследствие более мелкомасштабных неоднородностей (рельефа и поля плотности), не учитываемых при заданном разрешении.

3. Специально проведенный модельный эксперимент показал, что в исследуемом районе динамическое воздействие, непосредственно связанное с потоком тепла, практически не ведет к формированию специфических динамических структур в поверхностном слое, которые бы отсутствовали в ситуации без учета потока тепла.

4. При учете полного потока тепла на морскую поверхность наблюдается увеличение поверхностной горизонтальной скорости течения в среднем на 2–7 см по сравнению со скоростью, полученной без учета потока тепла (при одинаковом ветровом воздействии.) Данное увеличение скорости может быть обусловлено увеличением в весенний период вертикального градиента плотности (из-за увеличения температуры в приповерхностном слое) и концентрацией ветрового импульса в приповерхностном слое.

Обработка и визуализация данных спутниковых наблюдений осуществлялись в рамках гранта РФФИ № 14-05-00520; запуск численной модели со специально подготовленными начальными и граничными условиями, основанными на данных других моделей, – в рамках гранта РНФ № 14-50-00095; проведение специального модельного эксперимента, позволившего оценить влияние полного потока тепла на формирование структурных особенностей динамических полей, – в рамках гранта РФФИ № 15-05-04198.

Литература

^{1.} Буканова Т.В., Стонт Ж.И., Гущин О.А. Изменчивость температуры поверхности моря в Юго-Восточной Балтике по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 86–96.

^{2.} Голенко Н.Н., Голенко М.Н., Щука С.А. Наблюдение и моделирование апвеллинга в юго-восточной Балтике // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 20–27.

^{3.} Журбас В.М., Стипа Т., Малкки П., Пака В.Т., Кузьмина Н.П., Скляров В.Е. Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в юго-восточной Балтике: ИК-изображения и численное моделирование // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 660–669.

- Blumberg A.F., Mellor G.L. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models (ed. N.S. Heaps). American Geophysical Union. Washington, D.C., 1987. doi: 10.1029/CO004p0001.
- Fennel W., T. Seifert, B. Kayser. Rossby radii and phase speeds in the Baltic Sea // Cont. Shelf Res. 1991. Vol. 11. No. 1. P. 23–36. doi:10.1016/0278-4343(91)90032-2.

Investigation of structural features of coastal thermohaline frontal zones in the South-East Baltic from numerical model and satellite data

M.N. Golenko, N.N. Golenko, T.V. Bukanova

Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS Kaliningrad 236000, Russia E-mail: m.golenko@yahoo.com

Hydrodynamic numerical modeling of the wide area of the Baltic Sea for the period from 1 January to 31 May 2012 under real atmospheric forcing is implemented based on POM (Princeton Ocean Model) (Blumberg, Mellor, 1987). Validation of numerical calculation of near surface temperature in the South-East Baltic is performed using Terra and Aqua satellites data. Structural features of thermohaline and dynamic coastal frontal zones arising during spring heating and periodical upwelling events are investigated on the basis of numerical modeling and remote sensing data comparative analysis. Accompanying meteorological conditions (wind speed and heat flux) and their combinations causing formation of the observed frontal zones are also analyzed and described. It is shown that in the region under investigation, atmospheric forcing with heat flux taken into account does not lead to the formation of sufficient structural distinctions in surface horizontal velocity field as compared to the situation when heat flux is not considered (under equal wind forcing). However, when heat flux is taken into account an increase of near surface velocity by 2-7 cm/sec is observed. The increase can be explained by the fact, that the near surface layer becomes lighter during the period of spring heating, and, owing to stable vertical density gradient, wind impulse concentrates in the near surface layer and, as a result, induces its greater velocity.

Keywords: Baltic Sea, comparative analysis of satellite and modeling data of SST, coastal frontal zones, current velocity

References

- Bukanova T.V., Stont Zh. I., Goushchin O.A., Izmenchivost' temperatury poverhnosti morya v Yugo-Vostochnoy Baltike po dannym MODIS (Variability of sea surface temperature in the South-East Baltic from MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 86–96.
 Golenko N.N., Golenko M.N., Shchuka S.A., Nablyudeniye I modelirovaniye apvellinga v Yugo-Vostochnoy
- Golenko N.N., Golenko M.N., Shchuka S.A., Nablyudeniye I modelirovaniye apvellinga v Yugo-Vostochnoy Baltike (Observation and modeling of upwelling in the Southeastern Baltic), *Okeanologiya*, 2009, Vol. 49, No. 1, pp. 15–21.
- pp. 15–21.
 Zhurbas V.M., Stipa T., Mälkki P., Paka V.T., Kuzmina N.P., Sklyarov V.E., Mezomasshtabnaya izmenchivost' apvellinga v Yugo-Vostochnoy Baltike: IK-izobrazheniya i chislennoye modelirovaniye (Mesoscale variability of the upwelling in the Southeastern Baltic Sea: IR images and numerical modeling), *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 660–669.
- Blumberg A.F., Mellor G.L., A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models* (ed. N.S. Heaps), American Geophysical Union, Washington, D.C., 1987, doi: 10.1029/CO004p0001.
- 5. Fennel W., T. Seifert, B. Kayser. Rossby radii and phase speeds in the Baltic Sea, *Cont. Shelf Res.*, 1991, Vol. 11, No. 1, pp. 23–36, doi:10.1016/0278-4343(91)90032-2.