

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 504.064.37

Численное исследование процессов эволюции загрязнений в Азовском море с использованием данных спутниковых наблюдений

© 2017 Т. Я. Шульга*, В. В. Суслин, Р. Р. Станичная

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: shulgaty@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.07.2017 г. После доработки 22.08.2017 г.

Выполнено гидродинамическое моделирование акватории Азовского моря с использованием *Princeton Ocean Model* для периода 2013 – 2014 гг. при задании атмосферного воздействия по модели *SKIRON*. На основе совместного анализа результатов численного моделирования и космического мониторинга по данным спутника *Aqua (MODIS)* исследованы структурные особенности пространственно-временной динамики пассивной взвеси в Азовском море. Взвесь различного происхождения проявляется в суммарном индексе поглощения света или обратного рассеяния света морской водой. Новые алгоритмы применены для определения согласованности данных, полученных методами дистанционного зондирования морской поверхности из космоса, модельных решений и их сочетанием. Обсуждаются методы совместного использования информации, дана оценка качества модельного прогноза в зависимости от интервалов усвоения спутниковых данных. Показано, что последовательная схема усвоения улучшает прогноз загрязнений при использовании результатов моделирования и предшествующих спутниковых изображений.

Ключевые слова: Азовское море, эволюция пассивной примеси, дистанционные наблюдения, численное моделирование, сравнительный анализ спутниковых и модельных данных.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-6-40-52

Введение

Экологическим проблемам Азовского моря уделяется особое внимание в связи с продолжающимся значительным антропогенным воздействием. Масштабы загрязнения становятся угрожающими для экосистемы и приводят к крайне негативным последствиям [1]. Так, на побережье Азовского моря функционируют предприятия черной и цветной металлургии [2 – 4]. К числу основных источников его загрязнения относятся водный транспорт и дноуглубительные работы, обеспечивающие нормальное функционирование судов на мелководье. Достаточно велико влияние водного транспорта на экосистему Азовского моря: через прорытые по мелководьям судоходные каналы здесь ежегодно проходит около 7000 судов [5].

Спутниковые системы с высоким пространственным разрешением и ежедневным поступлением данных по любому району наблюдения делают возможным мониторинг состояния и загрязнения морской среды. Однако в ситуации катастрофического разлива мазута в Керченском проливе, произошедшего 11 ноября 2007 г. (авария танкера «Волгонефть-139») во время мощного

шторма, первые спутниковые изображения были получены только через пять дней после катастрофы, 16 ноября 2007 г. [6]. Облачная погода явилась причиной отсутствия данных оптического диапазона. Неполная оперативная информация существенно осложняет выявление районов загрязнений и составление прогноза их распространения. В связи с этим совместный анализ спутниковых оптических изображений и результатов численного моделирования представляется наиболее эффективным, т. к. обеспечивает более полную информацию о направлениях переноса, размерах и концентрации областей загрязнений. Результаты моделирования позволяют сравнивать расчеты с оперативной обстановкой, выявленной по спутниковым изображениям, и приводят к обоснованным выводам при составлении прогноза последствий распространения загрязнений.

Численному исследованию влияния динамических процессов в Азовском море на распространение загрязнений посвящена работа [7], где на основе трехмерной нелинейной сигма-координатной модели *Princeton Ocean Model (POM)* [8] изучены основные характеристики ветровых течений (направление, скорость перемещения, геометрические параметры), направление и максимальное распространение загрязнений.

В настоящей работе обобщаются результаты численного моделирования и данные спутниковых наблюдений состояния вод Азовского моря за двухлетний период (2013 – 2014 гг.). На основе разработанных новых модельных алгоритмов проводится численное исследование пространственно-временной динамики загрязнений в Азовском море. Обсуждаются возможности совместного использования информации, полученной методами дистанционного зондирования морской поверхности из космоса и на основе модельных решений. Проводится анализ согласованности данных моделирования и наблюдений, позволяющий выявлять негативные изменения состояния морской среды, прогнозировать их возникновение, типичные области и площади территорий, охваченных антропогенными воздействиями.

Используемая математическая модель и ее параметры

В численных исследованиях использовалась версия трехмерной нелинейной гидродинамической модели *POM*, адаптированная к условиям Азовского бассейна [9] и примененная также для изучения эволюции загрязнений под действием указанных возмущений. В основе математической модели лежат уравнения турбулентного движения вязкой жидкости в приближении гидростатики [10]. Параметризация коэффициентов вертикальной вязкости и турбулентной диффузии выполняется в соответствии с полуэмпирической дифференциальной моделью Меллора – Ямады с замыканием второго порядка [11]. Коэффициент горизонтальной вязкости, зависящий от горизонтальных градиентов скорости, вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости [12]. Проекция касательных напряжений трения ветра на свободной поверхности выражаются через значения его скорости на стандартной метеорологической высоте с поправкой на коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности моря, получаемый с использованием балк-формул, выражающих эмпирические зависимости от скорости ветра [13]. На дне нормальная составляющая скорости равна нулю, по логарифмическому

закону со скоростью связаны придонные касательные напряжения. С помощью теории Гранта – Мадсена [14] определяются значения параметра шероховатости, характеризующие гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности. На боковых границах бассейна, который предполагается замкнутым, выполняются условия прилипания. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

На основании критерия устойчивости для баротропных волн выполняется выбор шагов интегрирования по пространственным и временным координатам [15]. Число расчетных уровней модельной сетки по вертикали – 11, разрешение по горизонтали $1,4 \times 1,4$ км. Уравнения интегрируются с шагом 18 с для нахождения осредненных двумерных составляющих скорости и уровня и с шагом 3 мин – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной составляющей скорости. Исходные данные для моделирования взяты из карты батиметрии и конфигурации береговой линии Азовского моря, построенной на основе оцифровки последних карт Гидрографической службы с их последующей интерполяцией на расчетную сетку. Расчет изменения концентрации примеси выполнен в результате решения уравнения переноса и диффузии. К динамическим граничным условиям добавляются условия отсутствия потоков примеси через боковые стенки, свободную поверхность и дно бассейна [8].

Информация о полях атмосферного давления и ветра, которые используются в вычислительных экспериментах. В качестве атмосферного форсинга использовались поля ветра и атмосферного давления, полученные по данным региональной модели *SKIRON* за период 2013 – 2014 гг. Атмосферная модель *SKIRON* создавалась и развивалась в Афинском университете коллективом *Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group* [16]. Она базируется на мезомасштабной численной атмосферной *Eta*-модели, которая первоначально разрабатывалась в Белградском университете. Основное развитие модели было обеспечено *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*. Результаты прогноза по модели *SKIRON*, используемые в данной работе, были получены Морским гидрофизическим институтом РАН в качестве полноправного участника проекта *Mediterranean Forecasting System Toward Environmental Predictions (MFSTEP)*. Этот вариант модели представляет собой 72-часовой прогноз метеорологических параметров для Азово-Черноморского и Средиземноморского бассейнов. Вывод данных первые 48 ч осуществляется через 2 ч, далее значения выводятся через 6 ч. Расчет параметров проводится на сетке с шагом $0,1^\circ$ по широте и долготе. Модель предоставляет 16 различных параметров, среди которых данные по скорости приводного ветра. На расчетную сетку бассейна Азовского моря с указанным горизонтальным разрешением были интерполированы данные модели *SKIRON*.

Подготовка данных спутниковых наблюдений

Восстановление первичных гидрооптических характеристик Азовского моря по данным цветового сканера. Методика расчета параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ по систематизированным данным *MODIS*. В работе использованы спутниковые данные за 2013 и 2014 гг. второго уровня сканера *MODIS* со спутника *Aqua* [17] с браковкой данных по определенным критериям, кото-

рые описаны в [18]. Исходные данные приборов имели километровое пространственное разрешение. Для выявления особенностей в верхнем слое моря по спутниковым данным были рассчитаны два параметра. Первый параметр $index34$ – отношение нормализованной яркости света $L_{WN}(\lambda)$ на длине волны λ , выходящего из-под поверхности воды, в двух спектральных каналах: $index34 = L_{WN}(531)/L_{WN}(488)$, где $L_{WN}(531) = R_{RS}(531)F_O(531)$, и $L_{WN}(488) = R_{RS}(488)F_O(488)$ ($R_{RS}(\lambda)$ – коэффициенты яркости моря с центральными длинами волн спектральных каналов 531 и 488 нм соответственно, $F_O(\lambda)$ – солнечные постоянные). Физическая суть этого параметра заключается в том, что он характеризует суммарное поглощение всех оптически активных веществ, содержащихся в верхнем слое морской воды. Солнечные постоянные F_O для рассматриваемых спектральных каналов можно найти, например, в работе [18].

Второй параметр $b_{bp}(555)$ – коэффициент обратного рассеяния света частицами взвеси на длине волны 555 нм, который позволяет наблюдать за особенностями рассеяния света в верхнем слое воды. В основном это может быть взвесь биологического происхождения (например цветение кокколитофорид) и неживая взвесь (например минеральная взвесь, связанная с речными выносами или ее подъемом со дна в результате сильного ветра). Следуя работе [19], расчет $b_{bp}(555)$ проводился по формуле

$$b_{bp}(555) = [6,76L_{WN}(555) + 0,03(L_{WN}(555))^3 + 3,4L_{WN}(555)(I_{510})^{3,8} - 0,84]10^{-3},$$

где $I_{510} = L_{WN}(555)/L_{WN}(510)$. В ходе исследования использованы данные со спутника *Aqua* (со сканером *MODIS* на борту), которые имеются в свободном доступе в Интернете (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Эти данные были интерполированы на сетку указанной численной модели с горизонтальным разрешением $1/59^\circ \times 1/84^\circ$ по широте и долготе. Разрешение дистанционных данных по времени обусловлено прохождением спутника над районом Азовского моря, который ежедневно регистрируется здесь в интервале 9:00 – 14:00 по местному времени. Наименьший временной шаг между спутниковыми изображениями составляет ~ 24 ч.

Для анализа из имеющихся спутниковых данных отобраны наиболее информативные изображения, максимально свободные от влияния облачности и наличия пропусков. Они систематизированы по группам, состоящим из последовательных изображений с наименьшим интервалом по времени между смежными снимками. Выбранные периоды соответствуют хорошим погодным условиям над акваторией Азовского моря в моменты времени, свободные от облаков. Таким образом, получены 6 временных групп, состоящих из наиболее контрастных спутниковых изображений с дискретностью 1 – 2 дня, которые использованы в тестовых расчетах для оценки изменения распределения исследуемых параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$. Из них три группы, представляющие наибольший интерес для анализа, – данные с суточной дискретностью, три другие – с интервалом между снимками 2 сут.

Для каждой временной группы спутниковых данных выполнено моделирование распределения параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$, задающих поле взвеси нейтральной плавучести в приповерхностном слое Азовского моря. Начальное распределение этих параметров в модели усваивается по данным спутникового распределения в момент времени, совпадающий с первым снимком

в группе. Моделирование проведено при реальном атмосферном воздействии (SKIRON), соответствующем группе спутниковых изображений выбранного временного периода. Численные эксперименты проведены по двум сценариям: без последующего усвоения спутниковых распределений параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$, а также с усвоением распределений в те моменты времени, для которых имеются спутниковые данные (каждые 24 или 48 ч).

Алгоритм усвоения данных наблюдений

Используемый последовательный рекурсивный алгоритм усвоения данных в задаче оценивания полей концентрации пассивной примеси основан на теории оптимальной фильтрации Калмана [20 – 22]. В ходе решения этой задачи в момент времени t_k составляется вектор априорной оценки \mathbf{x}_k^m , основанный на интегрировании уравнений переноса и диффузии. Этот вектор является краткосрочным модельным прогнозом исследуемого параметра с предыдущего шага усвоения. Его размерность равна количеству точек модельного пространства ($n = n_\lambda n_\phi$, где $n_\lambda = 176$ и $n_\phi = 276$ – количество узлов сетки по долготе и широте). Данные спутниковых наблюдений составляют вектор наблюдений \mathbf{y}_k^0 , размерность которого (m) варьируется в соответствии с доступными данными наблюдений и в общем случае не равна n . Оптимальная оценка концентрации \mathbf{x}_k^* по данным наблюдений и модели находится с использованием алгоритма фильтра Калмана, основанного на системе прогноз – коррекция.

Допустим, что в момент времени t_{k-1} получен прогноз распределения концентрации исследуемого параметра в поверхностном слое моря \mathbf{x}_{k-1}^* и необходимо оценить ее в следующий момент времени t_k . Для этого строим прогноз априорной оценки \mathbf{x}_k^f в момент t_k , опираясь на оценку \mathbf{x}_{k-1}^* . Далее получаем измерения \mathbf{y}_k^0 и, корректируя оценку в момент t_k , базируясь на прогнозе и измерениях, находим окончательную апостериорную оценку вектора состояния \mathbf{x}_k^* .

Компоненты вектора априорной оценки $\mathbf{x}_k^f = (x_1^f, x_2^f, \dots, x_n^f)$ определяются по найденным значениям вектора анализа $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$:

$$\mathbf{x}_k^f = A(\mathbf{x}_{k-1}^*) + \xi_k \quad (k = 1, \dots, n), \quad (1)$$

где A – оператор модели; \mathbf{x}_{k-1}^* – вектор проанализированных значений в момент времени t_{k-1} (оценка, которая была получена на $(k-1)$ -м шаге по времени); ξ_k – случайный вектор ошибок модели; k – шаг усвоения. Данные спутниковых наблюдений составляют вектор $\mathbf{y}^0 = (y_1^0, y_2^0, \dots, y_m^0)$:

$$\mathbf{y}_k^0 = B_k \bar{\mathbf{y}}_k^0 + \epsilon_k \quad (k = 1, \dots, m), \quad (2)$$

где B_k – матрица проекций пространства модели в пространство наблюдений размерности $(m \times n)$; $\bar{\mathbf{y}}_k^0$ – m -мерный вектор наблюдений в момент времени t_k ; ϵ_k – случайный m -мерный вектор ошибок наблюдений. Шум системы (1) и шум измерений (2) являются гауссовскими случайными процессами с нулевым математическим ожиданием. Оптимальная оценка концентрации \mathbf{x}_k^* по данным наблюдений и модели находится из условия минимума следа матрицы ковариаций ошибок оценивания на основании алгоритма фильтра Калмана [20 – 22]:

$$\mathbf{x}_k^* = \mathbf{x}_k^f + K_k(\mathbf{y}_k^0 - B_k \mathbf{x}_k^f), \quad (3)$$

$$K_k = P_k^f B_k^T (B_k P_{k-1}^* B_k^T + R_k)^{-1}, \quad (4)$$

$$P_k^f = A_{k-1} P_{k-1}^* A_{k-1}^T + Q_{k-1}. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{x}_k^f – прогноз концентрации по модели; K_k – неизвестная весовая матрица (*Kalman gain*), которая находится методами оптимальной интерполяции; P_k^f – матрица ковариации ошибок прогноза; R_k и Q_{k-1} – матрицы ковариаций ошибок наблюдений и модели соответственно.

Первый шаг алгоритма фильтра Калмана состоит из прогноза с вычислением предварительной оценки концентрации по формуле (1) и расчета матрицы ковариации ошибок прогноза (5). Далее по формуле (4) вычисляется весовая матрица K_k . На следующем шаге анализа определяется искомая оценка с использованием формулы (3) на основании данных (2) и матрицы ковариации ошибок анализа. Если наблюдения недоступны, полагаем, что матрица ковариации ошибок анализа равна матрице ковариации ошибок прогноза, а оценка анализа совпадает с прогнозом по модели.

В настоящей работе использована упрощенная модель для расчета матриц ковариаций ошибок прогноза [21]. В численных экспериментах во время усвоения спутниковых данных вычисляется среднеквадратическая ошибка между данными прогноза и наблюдений. Затем в районе моря, в котором отсутствуют данные, выполняется усвоение данных прогноза с предыдущего временного шага с учетом вычисленной ошибки. В той области моря, где спутниковая информация присутствует на снимках, выполняется интерполяция данных наблюдений соответствующего временного шага. Матрица ковариации ошибок модели Q_k задавалась нулевой.

Анализ результатов численных экспериментов

Сопоставление данных моделирования и спутниковых изображений распределения параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ в Азовском море. Для каждой временной группы спутниковых и модельных данных выполнен статистический анализ, основанный на определении пространственной корреляции значений параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$. Наборы значений указанных параметров разнородны. Спутниковые данные неоднородно распределены по пространству и времени. Данные моделирования, полученные на основании интегрирования уравнения переноса и диффузии, имеют постоянную дискретность (интервал 3 мин).

Анализ временных рядов дистанционных измерений. Для анализа результатов были выбраны 6 групп наиболее информативных снимков, полученных в следующие периоды:

1. 26 апреля – 2 мая 2013 г. (интервал между снимками 24 – 48 ч).
2. 21 – 26 марта 2014 г. (интервал между снимками 24 ч).
3. 6 – 10 августа 2014 г. (интервал между снимками 24 ч).
4. 23 – 29 июня 2013 г. (интервал между снимками 48 ч).
5. 17 – 23 июля 2014 г. (интервал между снимками 48 ч).
6. 3 – 7 ноября 2014 г. (интервал между снимками 48 ч).

Все спутниковые данные предварительно обработаны таким образом, что при наличии пары изображений с интервалом от 30 мин одной и той же текущей даты они были конкатенированы в один снимок, включающий в себя оба этих изображения. Так, например, начальный снимок 4-й группы получен из двух последовательных изображений в 9:35 и 11:50 23 июня 2013 г. (рис. 1).

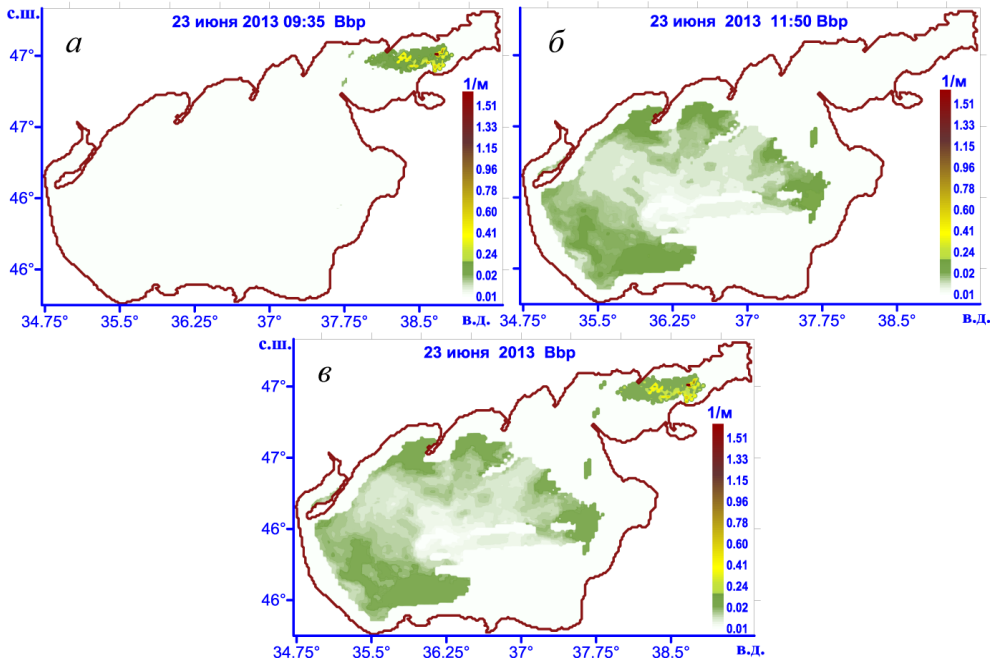


Рис. 1. Пример объединения спутниковых изображений в один снимок. Данные распределения параметра $b_{bp}(555)$ в приповерхностном слое Азовского моря 23 июня 2013 г.: *a* – в 9:35; *b* – в 11:50; *v* – обработанные данные

Сравним оригинальные временные ряды в группах спутниковых данных с целью получения оценок распределения параметров относительно выбранного начального. Для каждого периода был определен коэффициент взаимной корреляции (r) параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ между данными наблюдений и результатами моделирования в узлах, где имеются данные двух рассматриваемых рядов. Значения этого коэффициента, изменяющегося в пределах от единицы до нуля, определяют степень согласованности данных. В таблице приведены наибольшее (r_{max}) и наименьшее (r_{min}) значения коэффициентов взаимной корреляции и указан интервал времени, соответствующий наиболее сильной или наиболее слабой корреляции относительно выбранного начального параметра в каждой группе.

Анализ временных рядов показывает, что слабая корреляционная зависимость прежде всего отмечается для случаев, когда имеет место большая разница размерностей n и m при низкоразмерном подпространстве данных наблюдений.

**Оценки коэффициента корреляции в группах временных рядов
спутниковых данных**

Номер группы	Параметр	r_{\max}	Интервал времени, ч	r_{\min}	Интервал времени, ч
1	<i>index34</i>	0,83	120	0,63	25
	<i>b_{bp}(555)</i>	0,89	240	0,81	288
2	<i>index34</i>	0,91	72	0,21	96
	<i>b_{bp}(555)</i>	0,94	48	0,50	96
3	<i>index34</i>	0,77	72	0,48	24
	<i>b_{bp}(555)</i>	0,83	48	0,64	72
4	<i>index34</i>	0,86	96	0,14	120
	<i>b_{bp}(555)</i>	0,80	24	0,50	48
5	<i>index34</i>	0,61	24	0,19	264
	<i>b_{bp}(555)</i>	0,86	24	0,44	360
6	<i>index34</i>	0,84	48	0,32	96
	<i>b_{bp}(555)</i>	0,83	48	0,69	96

Анализ результатов моделирования и спутниковых данных эволюции примеси в Азовском море в зависимости от интервалов между усвоением спутниковой информации. В ходе исследования выполнено моделирование распространения параметров *index34* и *b_{bp}(555)* с привлечением спутниковых изображений поверхности Азовского моря. Расчеты проведены для тех же шести временных групп. В качестве начального распределения исследуемого параметра в модели задается его значение, полученное со спутника. Момент времени, при котором происходит усвоение этого начального распределения, соответствует дате и местному времени имеющегося спутникового снимка.

На рис. 2 показаны модельные и спутниковые распределения параметра *index34*, относящиеся к первой группе снимков от 26 апреля – 2 мая 2013 г. В левой колонке представлены спутниковые изображения, в правой – соответствующие каждому спутниковому снимку распределения параметра *index34*, а также скорости поверхностных течений (рис. 2, *в, е, и*) по данным гидродинамической модели для близкого момента времени (разница во времени не превышает 2 ч). Здесь белые участки соответствуют либо облачности, либо зонам градиентов, которые были вырезаны при обработке данных. Для модельных распределений указаны дата и местное время, в спутниковых данных приведено название первичного файла сканера *MODIS*. Цветовые шкалы, в которых представлены спутниковые и модельные данные, соответствуют друг другу.

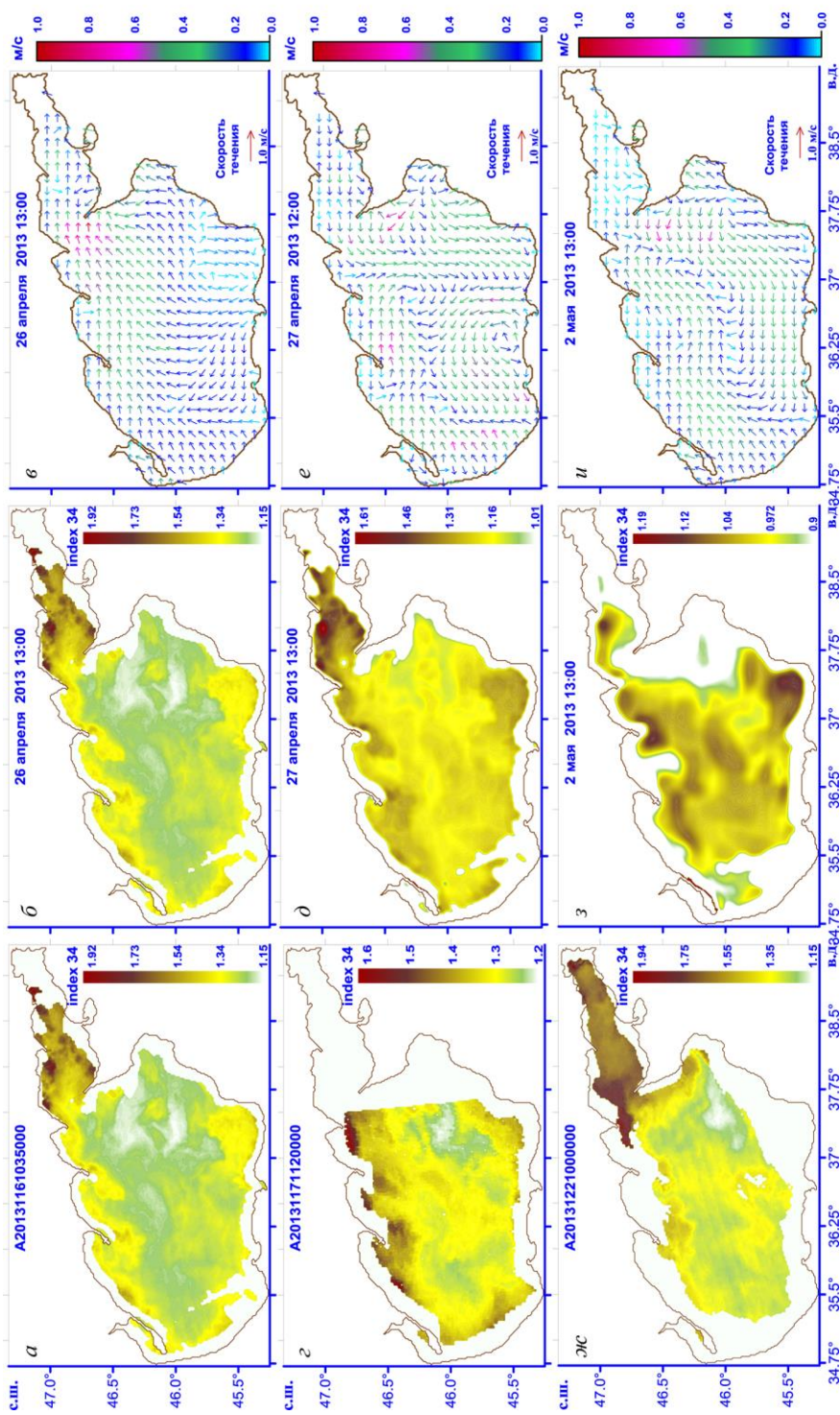


Рис. 2. Данные спутниковых наблюдений (первая колонка) и численного моделирования (вторая колонка) параметра *index34* в поверхностном слое Азовского моря. Скорости поверхностных течений показаны в третьей колонке

Анализ скорости ветра показал, что приблизительно за двое суток до рассматриваемого момента времени (с 24.04.2013 г., 00:00) развился северо-восточный ветер, скорость которого достигала 10 – 12 м/с. Этот ветер является самым благоприятным для переноса примеси из Таганрогского залива. Описанный гидродинамический сценарий подтверждают модельные распределения поверхностной скорости течений: северо-восточный ветер сопровождается течениями, направленными в ту же сторону, что и ветер (рис. 2, в). Как видно на рис. 2, з, через сутки достаточно большая область на спутниковом изображении занята облачностью. Данные моделирования (рис. 2, д) позволяют оценить характер распространения параметра *index34* в этой области. Этот рисунок демонстрирует обоснованность модельного прогноза при отсутствии спутниковых данных. Направление ветра поменялось на западное, появилась полоса течений в центральной части моря, захватывающая примесь от берега и переносящая ее в центр бассейна на север и северо-восток (рис. 2, е).

На распределениях, относящихся к моменту времени 2 мая 2013 г., 10:00 (рис. 2, ж), в районе, прилегающем к Таганрогскому заливу, и у побережья Бердянска по-прежнему имеет место область наибольшей концентрации рассматриваемого параметра. Как видно (рис. 2, з), через 6 дней от начала усвоения соответствующее модельное распределение плохо отражает реальное.

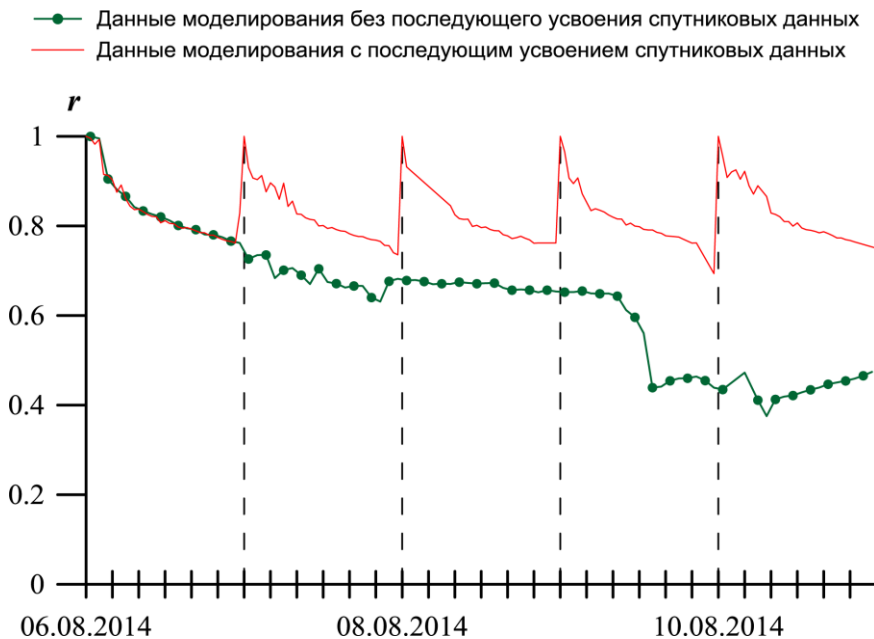


Рис. 3. Корреляционные кривые по спутниковым и модельным распределениям параметра *index34*

Вторая серия экспериментов проведена для оценки возможностей алгоритма ассимиляции и определения его эффективности при уменьшении интервала между усвоением данных. Результаты моделирования, выполненного с использованием процедуры последовательного усвоения данных, сравни-

ваются с результатами, полученными при однократном (начальном) усвоении. Эксперименты по ассимиляции в выбранных группах выполняются с использованием указанного алгоритма в моменты времени, когда имеются информативные спутниковые изображения. Усвоение данных наблюдений параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ выполнялось с использованием алгоритма фильтрации Калмана, в котором вычисление матрицы ковариации ошибок прогноза проводилось по формуле (5). В этом эксперименте определялась также среднеквадратическая ошибка оценки концентрации. Она сравнивалась с такой же ошибкой, но полученной при усвоении данных только в начальный момент времени. Таким образом, в модели по начальному полю ($\mathbf{x}_0^m = \mathbf{y}_0^0$) выполнялся прогноз распределения параметров (например на 6 сут, группа 1) без проведения шагов анализа, при этом оценивалась среднеквадратическая ошибка прогноза. Графики полученных оценок приведены на рис. 3.

Выполненный анализ величины корреляции между данными наблюдений и моделирования, проведенный по этим двум экспериментам, свидетельствует о том, что оценка поля концентрации параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ с последующим усвоением приводит к существенному уменьшению среднеквадратической ошибки и увеличению коэффициента корреляции. Показано, что последовательная схема усвоения данных наблюдений улучшает прогноз загрязнений по модели даже при нестабильных спутниковых изображениях.

Заключение

В работе предложен упрощенный алгоритм усвоения данных наблюдений концентрации примеси, основанный на теории фильтра Калмана. Представлена система усвоения спутниковой информации, состоящая из набора прикладных программ для определения параметров пассивной примеси в поверхностном слое моря. Новые алгоритмы используются совместно с моделью переноса и диффузии пассивной примеси. Моделирование процесса распространения пассивной примеси в море выполнено на основе комплекса программ, реализующих описанный алгоритм усвоения данных наблюдений. Численные эксперименты по оценке распределения параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ показали эффективность предложенных в работе алгоритмов.

Представленные численные алгоритмы и новые комплексы программ имеют практическую значимость. Они могут быть использованы при усвоении данных спутниковых наблюдений, позволяют улучшить точность определения полей концентрации и обладают важным свойством экономичности.

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и грид-технологий» (шифр «Фундаментальная океанология») и № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матишов Г.Г., Матишов Д.Г.* Современные природные и социальные риски в Азово-Черноморском регионе // Вестник Российской академии наук. – 2013. – 83, № 12. – С. 1059 – 1067. – doi:10.7868/s0869587313100071
2. *Кленкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко Л.Ф. и др.* Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2007. – 324 с.
3. *Буфетова М.В.* Загрязнение вод Азовского моря тяжелыми металлами // Юг России: экология, развитие. – 2015. – 10, № 3. – С. 112 – 120. – doi:10.18470/1992-1098-2015-3-112-120
4. *Матишов Г.Г., Бердников С.В., Беспалова Л.А. и др.* Современные опасные экзогенные процессы в береговой зоне Азовского моря. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. – 323 с.
5. *Дроздов В.В.* Особенности многолетней динамики экосистемы Азовского моря под влиянием климатических и антропогенных факторов // Ученые записки РГГМУ. – 2010. – № 15. – С. 155 – 176.
6. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
7. *Ivanov V.A., Cherkesov L.V., Shulga T.Y.* Dynamic processes and their influence on the transformation of the passive admixture in the Sea of Azov // Oceanology. – 2014. – 54, Iss. 4. – P. 426 – 434. – doi:10.1134/S0001437014030023
8. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A Description of Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Ed. N. Heaps. – Washington: American Geophysical Union, 1987. – P. 1 – 16. – doi:10.1029/co004p0001
9. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
10. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
11. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. – 1982. – 20, Iss. 4. – P. 851 – 875. – doi:10.1029/RG020i004p00851
12. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. – 1963. – 91, No. 3. – P. 99 – 164. – doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2
13. *Wannawong W., Humphries Usa W., Wongwises P. et al.* Mathematical Modeling of Storm Surge in Three Dimensional Primitive Equations // Int. J. Math. Comp. Sci. – 2011. – 5, No. 6. – P. 797 – 806. – URL: <http://waset.org/publications/6330/mathematical-modeling-of-storm-surge-in-three-dimensional-primitive-equations> (дата обращения: 04.07.2017).
14. *Grant W.D., Madsen O.S.* Combined wave and current interaction with a rough bottom // J. Geophys. Res. – 1979. – 84, Iss. C4. – P. 1797 – 1808. – doi:10.1029/JC084iC04p01797
15. *Courant R., Friedrichs K., Lewy H.* On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics // IBM J. Res. Development. – 1967. – 11, Iss. 2. – P. 215 – 234. – doi:10.1147/rd.112.0215
16. *Kallos G., Nickovic S., Jovic D. et al.* The Regional Weather Forecasting System SKIRON and its capability for forecasting dust uptake and transport // Proc. WMO conf. dust storms. – Damascus, 1-6 Nov. 1997. – P. 9.
17. *NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group.* Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data // Reprocessing. NASA OB. DAAC, Greenbelt, MD, USA. – 2014. – doi:10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0

18. *Suslin V., Churilova T.* A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // *Int. J. Remote Sensing.* – 2016. – 37, Iss. 18. – P. 4380 – 4400. – doi:10.1080/01431161.2016.1211350
19. *Suslin V., Churilova T., Ivanchik M. et al.* A simple approach for modeling of downwelling irradiance in the Black Sea based on satellite data // *Proc. VI Intern. Conf. “Current problems in optics of natural waters” (ONW2011).* St-Petersburg, September 6-9, 2011. – Saint-Petersburg: Publishing house of “Nauka” of RAS, 2011. – P. 199 – 203.
20. *Kalman R.E.* A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problem // *J. Bas. Eng.* – 1960. – 82, Iss. 1. – P. 35 – 45. – doi:10.1115/1.3662552
21. *Климова Е.Г.* Численные эксперименты по усвоению метеорологических данных с помощью субоптимального фильтра Калмана // *Метеорология и гидрология.* – 2003. – № 10. – С. 54 – 67.
22. *Ghil M., Malanotte-Rizzoli P.* Data Assimilation in Meteorology and Oceanography // *Adv. Geophys.* – 1991. – 33. – P. 141 – 266. – doi:10.1016/s0065-2687(08)60442-2

Numerical research of the pollution surface and deep-sea evolution in the Sea of Azov using satellite observation data

T. Ya. Shul’ga*, V. V. Suslin, R. R. Stanichnaya

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
*e-mail: shulgaty@mail.ru

Numerical hydrodynamic modeling of the Azov Sea is done for 2013 – 2014 based on the *Princeton Ocean Model* at presetting of real atmospheric impact (the *SKIRON* model). Structural features of the pollution spatial-temporal dynamics in the Sea of Azov are investigated based on the joint analysis of the data both of numerical simulation and space monitoring due to the satellite *Aqua (MODIS)*. New model algorithms are applied to analyze consistency of the data resulted from the sea surface remote sensing, the model solutions and their combinations. The methods of the information sharing mode are discussed, quality of the model forecast is assessed depending on the intervals between the satellite data assimilation. It is shown that the sequential scheme of the observational data assimilation improves the pollution forecast by the model, even when the satellite images are not stable.

Keywords: Sea of Azov, evolution of passive admixture, remote observations, numerical modeling, comparative analysis of satellite and model data.