

УДК 532.59

© Т. Я. Шульга

ЭВОЛЮЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В АЗОВСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ¹

В работе обсуждаются методы совместного использования информации, полученной методами дистанционного зондирования морской поверхности из космоса и численных решений. На основе разработанных алгоритмов обобщаются результаты численного моделирования и данных спутниковых наблюдений о состоянии вод акватории Азовского моря за период 2013–2014 гг. Трехмерное гидродинамическое моделирование динамики вод и эволюции загрязнений в Азовском море выполнено с использованием модели *POM* (*Princeton Ocean Model*) при задании реального атмосферного воздействия *SKIRON*. Совместный анализ численных решений и данных космического мониторинга *Aqua* (*MODIS*) позволяет исследовать особенности пространственно-временной динамики загрязнений. Новые модельные алгоритмы применены для анализа согласованности результатов численных решений, данных спутниковых наблюдений и их сочетания. На основании использования динамико-стохастического метода усвоения спутниковой информации дана оценка качества модельного прогноза в зависимости от интервалов между усвоением спутниковых данных.

Ключевые слова: Азовское море, эволюция пассивной примеси, дистанционные наблюдения, численное моделирование, усвоение спутниковых данных, фильтр Калмана.

DOI: [10.20537/vm170312](https://doi.org/10.20537/vm170312)

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 (см. [1]). Появление спутниковых систем, имеющих достаточно высокое пространственное разрешение и обеспечивающих ежедневное поступление данных по любому району наблюдения, делает возможным мониторинг состояния и загрязнения морской среды. Однако в ситуации катастрофического разлива мазута в Керченском проливе, произошедшего 11 ноября 2007 г., первые радиолокационные спутниковые изображения удалось получить только через пять дней после катастрофы. Данные оптического диапазона вследствие облачной погоды оказались неинформативными. Для улучшения представлений о процессах распространения загрязнений в морских бассейнах и репрезентативного прогноза их будущей эволюции используются процедуры модельного усвоения результатов наблюдений. Методы усвоения направлены на корректное задание начальных данных для каждого временного шага модели на основе комбинирования как результатов предшествующих модельных расчетов, так и результатов измерений. В данной работе численное исследование распространения загрязнений в Азовском море выполнено с усвоением спутниковых данных на основе методики теории фильтрации Калмана (см. [2]).

§ 1. Используемая математическая модель и ее параметры

В численных исследованиях использовалась трехмерная нелинейная гидродинамическая модель *POM* (*Princeton Ocean Model*) (см. [3]), примененная также для изучения загрязнения морской среды. Математическая модель основывается на уравнениях турбулентного движения вязкой жидкости в приближении гидростатики (см. [4]). Введем прямоугольную систему координат, в которой ось x направлена на восток, y — на север, z — вертикально вверх. При

¹Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827–2014–0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий».

этом u, v, w — проекции скорости по осям x, y, z ; t — время; P — давление; ρ — плотность; g — ускорение свободного падения; f — параметр Кориолиса; $\zeta(x, y, t)$ — профиль свободной поверхности

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Параметризация коэффициента вертикальной вязкости и турбулентной диффузии (K_M) выполняется в соответствии с полуэмпирической дифференциальной моделью Меллора–Ямады с замыканием второго порядка (см. [5]). Коэффициент горизонтальной вязкости (A_M), зависящий от горизонтальных градиентов скорости, вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости (см. [6]).

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial z} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (5)$$

$\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ и $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ — проекции касательных напряжений ветра на свободной поверхности, выражающиеся через значения его скорости (\mathbf{W}) на стандартной метеорологической высоте с поправкой на коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности моря C_a , получаемый с использованием эмпирических зависимостей (см. [7]):

$$10^3 C_a = \begin{cases} 2.5, & |\mathbf{W}| > 22 \text{ м/с}, \\ 0.5 + 0.065 |\mathbf{W}|, & 8 \leq |\mathbf{W}| \leq 22 \text{ м/с}, \\ 1.2, & 4 \leq |\mathbf{W}| \leq 8 \text{ м/с}, \\ 1.1, & 1 \leq |\mathbf{W}| \leq 4 \text{ м/с}. \end{cases} \quad (6)$$

На дне ($z = -H(x, y)$) нормальная составляющая скорости равна нулю. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью (см. [3])

$$\left(w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0, \quad K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (7)$$

$\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$ и $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$ — придонные касательные напряжения; C_b — коэффициент донного трения, который находится по логарифмическому закону $C_b = k^2 / \ln^2 (h_b / z_0)$; h_b — шаг по вертикали в придонном слое; $z_0 = 0,003 \text{ м}$ — параметр шероховатости, характеризующие гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности определяются с помощью теории Гранта–Мадсена (см. [8]). На боковых границах выполняются условия прилипания. До начала действия атмосферных возмущений движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (8)$$

Для расчета изменения со временем концентрации примеси $C(x, y, z, t)$ используем уравнение переноса и диффузии [3]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (9)$$

Здесь A_H и K_H — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии. На свободной поверхности в придонном слое к динамическим граничным условиям добавляются условия отсутствия потоков примеси в направлении внешней нормали \mathbf{n} через свободную поверхность, боковые стенки и дно бассейна

$$K_H \left(\frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad A_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad K_H \left(\frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (10)$$

Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости Куранта для баротропных волн [9]. Исходными данными для моделирования явилась карта батиметрии и конфигурации береговой линии Азовского моря, построенная на основе оцифровки последних крупномасштабных гидрографических карт Гидрографической службы с последующей ее интерполяции на расчетную сетку. Ее разрешение по широте и долготе составляет $1/59 \times 1/84^\circ$, что соответствует линейным размерам $\Delta x = \Delta y = 1.4$ км горизонтальной сетки с количеством узлов 276×176 . По вертикали — 11 расчетных уровней. 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. Для численной реализации в исходных уравнениях движения (1)–(4), переноса–диффузии (9), граничных (5), (7), (10) и начальных условиях (8) выполняется переход от координаты z к σ -координате [3].

Информация о полях ветра и атмосферного давления, используемых в вычислительных экспериментах. В качестве атмосферного форсинга использовались поля приводного ветра и атмосферного давления, полученные по данным региональной атмосферной модели SKIRON (<http://forecast.uoa.gr>) за период с 2013 по 2014 г. Атмосферная модель создавалась и развивалась в Афинском университете группой *Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group* [10]. Она базируется на модели ETA, основное развитие которой было обеспечено NCEP. Данный вариант модели дает детальный 72-часовой прогноз метеорологических параметров для Азово-Черноморского и Средиземноморского бассейнов. Первые 48 ч вывод данных осуществляется через 2 ч, далее значения выводятся через 6 ч на сетке с шагом 0.1° . Данные атмосферной модели интерполированы на расчетную сетку бассейна Азовского моря, проекции касательных напряжений ветра вычислены согласно (6).

§ 2. Восстановление первичных гидрооптических характеристик Азовского моря по данным цветового сканера

В работе использованы спутниковые данные за 2013 и 2014 гг. второго уровня прибора MODIS со спутника Aqua (см. [11]) и прибора со спутника SeaStar (см. [12]), с браковкой данных по определенным критериям, которые описаны в [13]. Исходные данные для обоих приборов имели километровое пространственное разрешение.

Для выявления особенностей в верхнем слое моря по спутниковым данным были рассчитаны два параметра. Первый параметр — отношение нормализованной яркости света $L_{WN}(\lambda)$, выходящего из-под поверхности воды, в двух спектральных каналах: $index34 = L_{WN}(531)/L_{WN}(488)$, где $R_{RS}(531) = L_{WN}(531)/F_o(531)$ и $R_{RS}(488) = L_{WN}(488)/F_o(488)$ — коэффициенты яркости моря с центральными длинами волн спектральных каналов 531 и 488 нм соответственно. 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 [13]. Второй параметр — коэффициент обратного рассеяния света частицами взвеси на длине волны 555 нм ($b_{bp}(555)$, м^{-1}), который позволяет наблюдать за особенностями рассеяния света в верхнем слое воды; это может быть как взвесь биологического происхождения (например, цветение кокколитофорид), так и неживая взвесь (например, минеральная взвесь, связанная с речными выносами или ее подъемом со дна в результате сильного ветра). Следуя работам [14, 15], расчет $b_{bp}(555)$ проводился по формуле

$$b_{bp}(555) = \left\{ 6.76 L_{WN}(555) + 0.03 [L_{WN}(555)]^3 + 3.4 L_{WN}(555) [I_{510}]^{3.8} - 0.84 \right\} 10^{-3}, \quad (11)$$

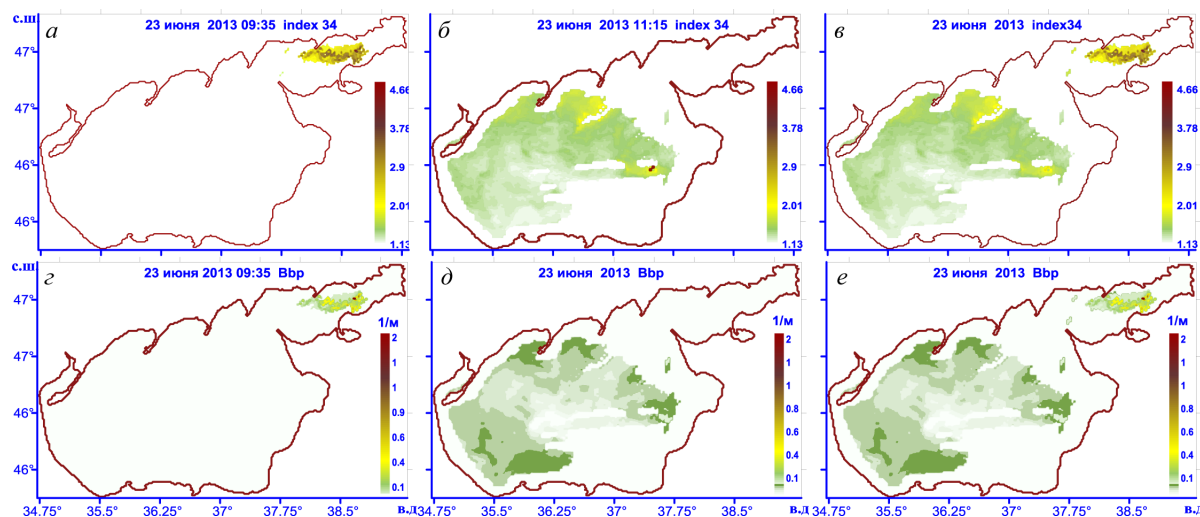


Рис. 1. Распределение параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ в поверхностном слое Азовского моря: (а), (г) — в 9:35; (б), (д) — в 11:50; (в), (е) — объединенные данные

где $I_{510} = L_{WN}(555)/L_{WN}(510)$, R_{RS} — коэффициент яркости в соответствующем спектральном канале, который является спутниковым продуктом второго уровня: $R_{RS}(555) = L_{WN}(555)/F_o(555)$ и $R_{RS}(510) = L_{WN}(510)/F_o(510)$. Для перехода от спектральных каналов *SeaWiFS* к *MODIS* воспользуемся следующими выражениями:

$$L_{WN}(555) = 0.9L_{WN}(547) \text{ и } F_o = 0.8index34 + 0.11, \quad (12)$$

где $L_{WN}(547) = R_{RS}(547)F_o(547)$. Обе эти связи получены с помощью процедуры аналогичной той, которая подробно описана в [16].

Анализ временных рядов параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ по систематизированным данным MODIS. Предварительно был выполнен анализ спутниковых изображений поверхности Азовского моря в инфракрасном диапазоне за период с 2013 по 2014 г., основанный на обработке данных *MODIS* второго уровня (*Level 2*) версии *R2014.0*. Разрешение дистанционных данных по времени обусловлено прохождением спутника над районом Азовского моря, который ежедневно регистрируется здесь в интервале от 9:00 ч до 14:00 ч по местному времени. Наименьший временной шаг между спутниковыми изображениями составляет около 24 ч. 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. Таким образом, получены шесть временных групп, состоящих из наиболее контрастных спутниковых изображений с дискретностью 1–2 дня, которые использованы в численных расчетах. При этом все спутниковые данные в группах обработаны таким образом, что при наличии пары изображений они объединяются в один снимок. Так, например, один из снимков четвертой группы получен из двух последовательных изображений 23 июня 2013 г. в 9 ч 35 мин и 11 ч 50 мин (см. рис. 1).

Для каждой временной группы спутниковых данных выполнено моделирование распределения параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$, задающих поле примеси нейтральной плавучести в приповерхностном слое Азовского моря. Начальное распределение этих параметров в модели усваивается по данным спутникового распределения с использованием (11), (12) в момент времени, соответствующий первому снимку в группе. Моделирование проведено при атмосферном форсинге (*SKIRON*), соответствующем выбранному временному периоду группы спутниковых изображений. Старт модели выполняется заблаговременно за 10 суток до усвоения начального поля загрязнения. Численные эксперименты проведены по двум сценариям: без последующего

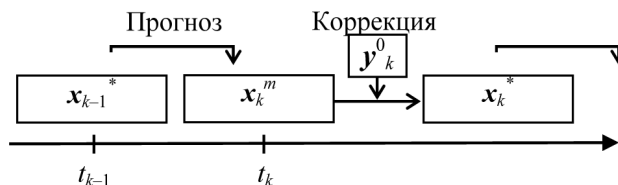


Рис. 2. Принцип работы алгоритма усвоения

усвоения спутниковых распределений параметров *index34* и *b_{bp}(555)* и также с усвоением распределений в те моменты времени, которым соответствуют имеющиеся спутниковых данные (каждые 24 или 48 ч).

Алгоритм усвоения спутниковых данных в модели. Используемый последовательный рекурсивный алгоритм усвоения данных в задаче оценивания полей концентрации пассивной примеси основан на использовании аппарата фильтрации Калмана (см. [2, 17]). В моменты времени, когда наблюдения недоступны, считаем, что оценка анализа совпадает с прогнозом по модели, а матрица ковариации ошибок анализа равна матрице ковариации ошибок прогноза. Для решения этой задачи в момент времени t_k составляется вектор априорной оценки x_k^f , основанный на интегрировании уравнений переноса и диффузии и являющийся 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 y_k^0 , размерность которого варьируется в соответствии с доступными данными наблюдений и в общем случае не равна размерности вектора x_k^f .

Оптимальная оценка концентрации x_k^* по данным наблюдений и модели находится на основании алгоритма фильтра Калмана, действующего по системе «прогноз–коррекция» (см. рис. 2). Допустим, что в момент времени t_{k-1} получена оценка распределения концентрации исследуемого параметра в поверхностном слое моря x_{k-1}^* и необходимо оценить ее в следующий момент времени t_k . Для этого строим прогноз априорной оценки x_k^f в момент t_k , опираясь на оценку x_{k-1}^* далее получаем измерения y_k^0 и, корректируя оценку в момент t_k , находим окончательную апостериорную оценку вектора состояния x_k^* .

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

$$x_k^f = A(x_{k-1}^*) + \xi, \quad (k = 1, \dots, n), \quad (13)$$

где k — шаг усвоения, A — оператор модели, ξ — случайный n -мерный вектор «шумов» модели. Данные спутниковых наблюдений составляют вектор $y^0 = (y_1^0, y_2^0, \dots, y_m^0)$:

$$y_k^0 = B(\tilde{y}_k^0) + \epsilon_k^0, \quad (k = 1, \dots, m), \quad (14)$$

где \tilde{y}_k^0 — компоненты m -мерного вектора наблюдений в момент времени t_k ; ϵ_k^0 — случайный m -мерный вектор ошибок наблюдений; B_k — матрица проекций пространства модели в пространство наблюдений размерности $(m \times n)$. Оптимальная оценка концентрации x_k^* по данным наблюдений и модели находится из условия минимума следа матрицы ковариаций ошибок оценивания на основании алгоритма фильтра Калмана (см. [2, 17]):

$$P_k^f = A_{k-1} P_{k-1}^* A_{k-1}^T + Q_{k-1}, \quad (15)$$

$$K_k = P_k^f B_k^T (B_k P_{k-1} B_k^T + R_k)^{-1}, \quad (16)$$

$$x_k^* = x_k^f + K_k (y_k^0 - B_k(x_k^f)). \quad (17)$$

Здесь x_k^f — прогноз концентрации по модели, x_{k-1}^* — вектор проанализированных значений в момент времени t_{k-1} (оценка, которая была получена на $(k-1)$ -м шаге по времени), P_k^m —

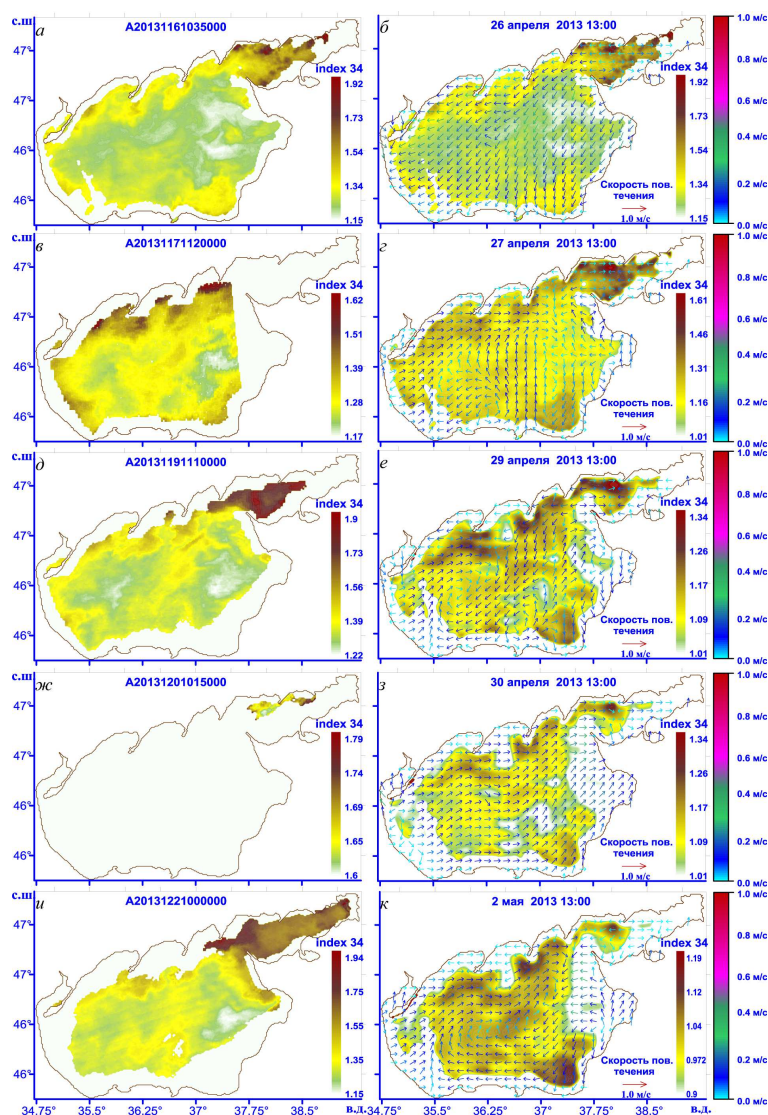


Рис. 3. Распределение параметра $index34$ в поверхностном слое Азовского моря по спутниковым данным (слева) и по данным моделирования (справа)

матрица ковариации ошибок прогноза, R_k и Q_k — матрицы ковариаций ошибок наблюдений и модели, K_k — неизвестная весовая матрица (*Kalman gain*), которая находится методами оптимальной интерполяции.

Таким образом, алгоритм фильтра Калмана состоит из шага прогноза, когда по модели вычисляется предварительная оценка концентрации по формуле (13) и рассчитываются матрицы ковариации ошибок прогноза (15). Затем вычисляется весовая матрица K_k по формуле (16). Далее идет шаг анализа, который заключается в получении непосредственно искомой оценки анализа по (17) с учетом вектора наблюдений (14) и матрицы ковариации ошибок анализа. В моменты времени, когда наблюдения недоступны, считаем, что оценка анализа совпадает с прогнозом по модели, а матрица ковариации ошибок анализа равна матрице ковариации ошибок прогноза.

§ 3. Анализ результатов численных экспериментов

Численные эксперименты проведены по двум сценариям: без последующего усвоения спутниковых распределений параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ и с усвоением распределений в моменты времени, соответствующие имеющимся спутниковым данным.

1. Моделирование распространения параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ проведено для шести временных групп. В качестве начального распределения исследуемого параметра в модели задается его имеющееся спутниковое значение. При этом момент времени, при котором происходит усвоение этого начального распределения в модели, соответствует дате и местному времени указанного спутникового изображения. Рассмотрим спутниковое и модельное распределения $index34$, относящиеся, например, к группе снимков с 26 апреля по 2 мая 2013 г. (см. рис. 3). Усвоение данных наблюдений выполнено по спутниковому изображению $A20131161035000$. В левой колонке представлены спутниковые изображения. В правой — соответствующие каждому спутниковому изображению распределения параметра $index34$, и также поверхностные скорости течений, построенные по данным численного моделирования 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 соответствующих спутниковых данных приведено название файла *MODIS*. Цветовые шкалы, в которых представлены спутниковые и модельные данные, близко соответствуют друг другу. На рис. 3, а представлено принятое в эксперименте в качестве начального спутниковое распределение параметра $index34$ в момент времени 26.04.2013, 10:35. Предварительно от начала старта модели (20.04.2013 г.) поля течений в Азовском море сформированы действующим ветром (*SKIRON*). Здесь (рис. 3, а, б) отчетливо прослеживаются области с высокой концентрацией $index34$, распространяющиеся от прибрежных областей у основания Таганрогского залива в сторону открытого моря. Анализ скорости ветра показал, что за 2 суток до рассматриваемого момента времени развился северо-восточный ветер, скорость которого составила 10–12 м/с. Гидродинамический сценарий подтверждают модельные распределения поверхностной скорости течений, направленные в сторону действующего ветра. Через сутки достаточно большая область на спутниковом изображении занята облачностью (рис. 3, в). Данные моделирования (рис. 3, г) позволяют оценить характер распространения параметра $index34$ в этой области. 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.

Еще через 2 суток на спутниковом изображении (рис. 3, д) происходит поступление загрязнений с большой концентрацией в районе Таганрогского залива. Модельное распределение этого параметра, полученное без последующего усвоения спутниковых данных, имеет существенное расхождение с действительной ситуацией (рис. 3, е). Следующий спутниковый снимок, отвечающий моменту времени 30.04.2013, 10:15, практически не содержит информации (рис. 3, ж). Соответствующее ему модельное решение (рис. 3, з) позволяет оценить пространственное распределение параметра $index34$. На изображении, относящемся к моменту времени 02.05.2013 (рис. 3, и), в районе, прилегающем к Таганрогскому заливу, и у побережья Бердянска по-прежнему имеет место область наибольшей концентрации. Как видно (рис. 3, к), соответствующее модельное распределение плохо отражает реальное распределение.

2. Во втором численном эксперименте выполнено последовательное усвоение данных наблюдений в моменты времени, отвечающие наличию информативных спутниковых изображений. Для решения задачи усвоения данных наблюдений о концентрации параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ применялся алгоритм, основанный на фильтре Калмана. В ходе проведения этого эксперимента вычислялась среднеквадратическая ошибка оценки концентрации. Эта ошибка сравнивалась с среднеквадратической ошибкой оценки концентрации без усвоения данных. Выполнена оценка корреляции между данными наблюдений и моделирования, проведенного по этим двум экспериментам (см. рис. 4). На основании анализа проведенных экспериментов можно сделать вывод, что оценка поля концентрации параметров $index34$ и $b_{bp}(555)$ с последующим усвоением приводит к существенному уменьшению среднеквадратической ошибки и увеличению коэффициента корреляции.

Заключение. Предложена система усвоения данных наблюдений, представляющая собой комплекс прикладных программ, предназначенных для решения задачи оценки распространения загрязнений в Азовском море. Комплекс программ, основанный на модели переноса

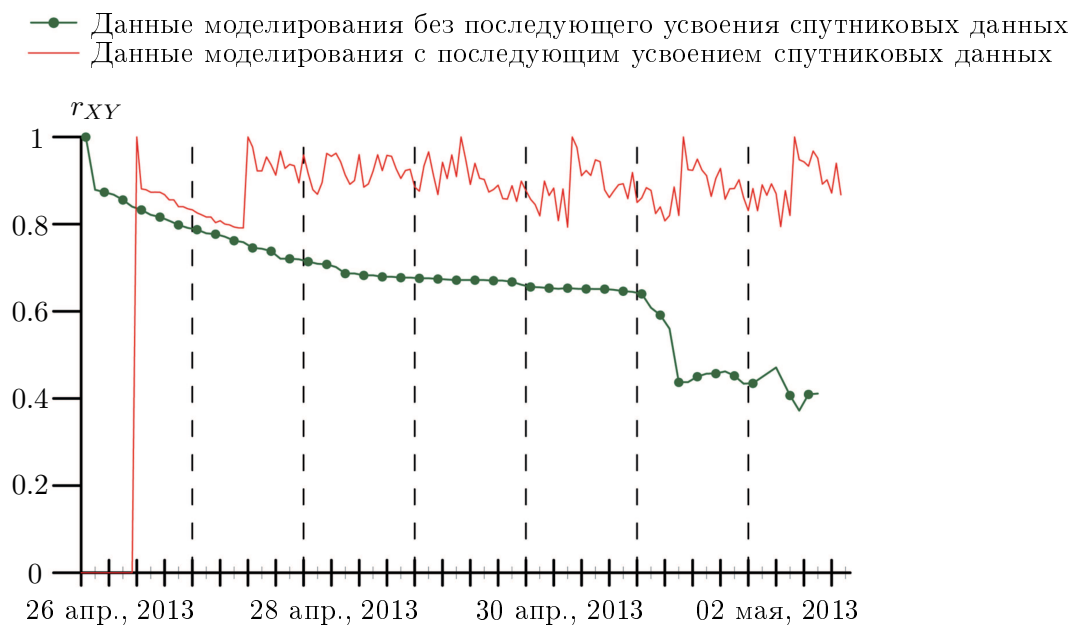


Рис. 4. Коэффициент корреляции между спутниковыми и модельными распределениями параметра *index34* в поверхностном слое Азовского моря

и диффузии пассивной примеси, реализует алгоритм усвоения данных наблюдений и позволяет выполнять прогноз процесса распространения загрязнений и при отсутствии спутниковых изображений. Проведенные численные эксперименты по оценке эволюции параметров *index34* и *b_{bp}(555)* показали эффективность предложенных в работе алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 3. С. 342–345. DOI: [10.7868/S0869565214090229](https://doi.org/10.7868/S0869565214090229)
2. Ide K., Courter Ph., Ghil M., Lorenc A. Unified notation for data assimilation: operational, sequential and variation // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. 1997. Vol. 75. No. 1B. P. 181–189. DOI: [10.2151/jmsj1965.75.1b_181](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.75.1b_181)
3. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Ed. N. Heaps. Washington, D.C.: American Geophysical Union. 1987. Vol. 4. P. 1–16. DOI: [10.1029/co004p0001](https://doi.org/10.1029/co004p0001)
4. Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М. Введение в гидродинамику и теорию волн. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 264 с.
5. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Reviews of Geophysics. 1982. Vol. 20. Issue 4. P. 851–857. DOI: [10.1029/RG020i004p00851](https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851)
6. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91. No. 3. P. 99–164. DOI: [10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
7. Wannawong W., Humphries U.W., Wongwiset P., Vongvisessomjai S. Mathematical modeling of storm surge in three dimensional primitive equations // International Journal of Computational and Mathematical Sciences. 2011. Vol. 5. Issue 1. P. 44–53. <http://waset.org/publications/6330>
8. Grant W.D., Madsen O.S. Combined wave and current interaction with a rough bottom // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1979. Vol. 84. Issue C4. P. 1797–1808. DOI: [10.1029/JC084iC04p01797](https://doi.org/10.1029/JC084iC04p01797)
9. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM Journal of Research and Development. 1967. Vol. 11. Issue 2. P. 215–234. DOI: [10.1147/rd.112.0215](https://doi.org/10.1147/rd.112.0215)

10. Kallos G., Boukas L., Jovic D., Kakaliagou O., Misirlis N., Nickovic S., Papadopoulos A., Mimikou N., Sakellaridis G., Papageorgiou J., Anadranistakis E., Manousakis M. The regional weather forecasting system SKIRON and its capability for forecasting dust uptake and transport // Proceedings of the First LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms (Damascus, Syria, 1997). WMO, 1998. P. 9.
11. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data // NASA OB.DAAC. Greenbelt, MD, USA, 2014. DOI: [10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0](https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0)
12. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group; Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data // NASA OB.DAAC. Greenbelt, MD, USA, 2014. DOI: [10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS_OC.2014.0](https://doi.org/10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS_OC.2014.0)
13. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll- α and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // International Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 37. Issue 18. P. 4380–4400. DOI: [10.1080/01431161.2016.1211350](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350)
14. Суетин В.С., Суслин В.В., Королев С.Н., Кучерявый А.А. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море по данным спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 44–54.
15. Suslin V.V., Suetin V.S., Korolev S.N., Kucheryavyi A.A. Use of SeaWiFS data to estimate water optical properties of the Black Sea // Proc. SPIE 6615, Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters, 661509, April 13, 2007. DOI: [10.1117/12.740445](https://doi.org/10.1117/12.740445)
16. Suslin V., Churilova T., Ivanchik M., Pryahina S., Golovko N. A simple approach for modeling of downwelling irradiance in the Black Sea based on satellite data // Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2011): Proceedings of VI International Conference. СПб.: Наука, 2011. С. 199–203.
17. Климова Е.Г. Численные эксперименты по усвоению метеорологических данных с помощью субоптимального фильтра Калмана // Метеорология и гидрология. 2003. № 10. С. 54–67.

Поступила в редакцию 30.06.2017

Шульга Татьяна Яковлевна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.
E-mail: shulgaty@mail.ru

T. Ya. Shul'ga

Evolution of the pollution in the Sea of Azov by satellite data and simulation results

Citation: *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki*, 2017, vol. 27, issue 3, pp. 450–459 (in Russian).

Keywords: Sea of Azov, evolution of passive admixture, remote observations, numerical modeling, assimilation of satellite data, Kalman filter.

MSC2010: 37M05, 65M06, 93C41

DOI: [10.20537/vm170312](https://doi.org/10.20537/vm170312)

Methods of sharing information obtained by methods of remote sensing of the sea surface from space and numerical solutions are discussed in this paper. The results of numerical modeling and data of satellite observations on the state of the waters of the Sea of Azov for the period 2013–2014 are summarized on the basis of developed algorithms. Three-dimensional hydrodynamic modeling of water dynamics and evolution of contaminants in the Sea of Azov is performed using the model of *POM (Princeton Ocean Model)* with a real atmospheric forcing *SKIRON*. The joint analysis of numerical solutions and data of space monitoring *Aqua (MODIS)* allows to study the features of the spatial and temporal distribution of pollution in the Sea of Azov. New model algorithms are used to analyze the consistency of the results of numerical solutions, satellite observation data and their combination. The dynamic-stochastic method of assimilating satellite information is used, which makes it possible to obtain an estimate of the quality of the model prediction depending on the intervals between the assimilation of satellite data.

REFERENCES

1. Matishov G.G., Chikin A.L., Berdnikov S.V., Sheverdyayev I.V. The extreme flood in the Don river delta, March 23–24, 2013, and determining factors, *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 455, issue 1, pp. 360–363. DOI: [10.1134/S1028334X14030295](https://doi.org/10.1134/S1028334X14030295)
2. Ide K., Courter Ph., Ghil M., Lorenc A. Unified notation for data assimilation: operational, sequential and variation, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 1997, vol. 75, no. 1B, pp. 181–189. DOI: [10.2151/jmsj1965.75.1b_181](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.75.1b_181)
3. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model, *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, Ed. N. Heaps. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1987, vol. 4, pp. 1–16. DOI: [10.1029/co004p0001](https://doi.org/10.1029/co004p0001)
4. Cherkesov L.V., Ivanov V.A., Khartiev S.M. *Vvedenie v gidrodinamiku i teoriyu voln* (Introduction into hydrodynamics and wave theory), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 264 p.
5. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews of Geophysics*, 1982, vol. 20, issue 4, pp. 851–857. DOI: [10.1029/RG020i004p00851](https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851)
6. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment, *Monthly Weather Review*, 1963, vol. 91, no. 3, pp. 99–164. DOI: [10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
7. Wannawong W., Humphries U.W., Wongwiset P., Vongvisessomjai S. Mathematical modeling of storm surge in three dimensional primitive equations, *International Journal of Computational and Mathematical Sciences*, 2011, vol. 5, issue 1, pp. 44–53. <http://waset.org/publications/6330>
8. Grant W.D., Madsen O.S. Combined wave and current interaction with a rough bottom, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1979, vol. 84, issue C4, pp. 1797–1808. DOI: [10.1029/JC084iC04p01797](https://doi.org/10.1029/JC084iC04p01797)
9. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics, *IBM Journal of Research and Development*, 1967, vol. 11, issue 2, pp. 215–234. DOI: [10.1147/rd.112.0215](https://doi.org/10.1147/rd.112.0215)
10. Kallos G., Boukas L., Jovic D., Kakaliagou O., Misirlis N., Nickovic S., Papadopoulos A., Mimikou N., Sakellaridis G., Papageorgiou J., Anadranistakis E., Manousakis M. The regional weather forecasting system SKIRON and its capability for forecasting dust uptake and transport, *Proceedings of the First LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms* (Damascus, Syria, 1997), WMO, 1998, p. 9.
11. 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](https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0)
12. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group; Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data, *NASA OB.DAAC*, Greenbelt, MD, USA, 2014. DOI: [10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS_OC.2014.0](https://doi.org/10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS_OC.2014.0)
13. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll- α and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners, *International Journal of Remote Sensing*, 2016, vol. 37, issue 18, pp. 4380–4400. DOI: [10.1080/01431161.2016.1211350](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350)
14. Suetin V.S., Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryavii A.A. Estimation of the variability of optical properties of water in the Black Sea according to the satellite device SeaWiFS, *Morskoi Gidrofizicheskii Zhurnal*, 2002, no. 6, pp. 44–54 (in Russian).
15. Suslin V.V., Suetin V.S., Korolev S.N., Kucheryavii A.A. Use of SeaWiFS data to estimate water optical properties of the Black Sea, *Proc. SPIE 6615, Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters, 661509*, April 13, 2007. DOI: [10.1117/12.740445](https://doi.org/10.1117/12.740445)
16. Suslin V., Churilova T., Ivanchik M., Pryahina S., Golovko N. A simple approach for modeling of downwelling irradiance in the Black Sea based on satellite data, *Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2011): Proceedings of VI International Conference*, Saint-Petersburg: Nauka, 2011, pp. 199–203.
17. Klimova E.G. Numerical experiments on meteorological data assimilation using a suboptimal Kalman filter, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2003, no. 10, pp. 40–50.

Received 30.06.2017

Shul'ga Tat'yana Yakovlevna, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Kapitanskaya, 2, Sevastopol, 299011, Russia.

E-mail: shulgaty@mail.ru