

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫХ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕЛКОВОДНЫХ ВОДОЕМАХ



**Доктор технических наук, доцент кафедры интеллектуальных и многопроцессорных систем Института компьютерных технологий и компьютерной безопасности
Южного федерального университета,
ведущий научный сотрудник НИЦ «Супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров»**

НИКИТИНА АЛЛА ВАЛЕРЬЕВНА

Таганрог , 2018 г.

Актуальность

- Проявляется негативная тенденция сокращения численностей популяций ценных и промысловых рыб, как осетр, стерлядь, белуга, судак и др.
- Антропогенное воздействие, эволюция природно-климатических условий приводят к эвтрофикации вод Азовского моря и бурному росту фитопланктона, в результате значительно ухудшается качество вод, влияющее на процессы воспроизводства в мелководном водоеме.
- Многие виды фитопланктона оказывают вредоносное влияние на водоем, токсичны, вызывают онкологические заболевания.
- Экспериментальное исследование процессов биологической кинетики, основанное на проведении широкомасштабных экспериментов с экосистемой моря, является не только чрезвычайно дорогостоящим, но и опасным с точки зрения последствий.
- Создание математического и программно-алгоритмического инструментария, позволяющего осуществлять предсказательное моделирование значимых пространственных взаимосвязанных гидробиологических процессов и использующего данные относительно недорогих, не оказывающих негативного влияния на экосистему экспериментов, является актуальным.
- Тема диссертации развивает предметную область математическое моделирование сложных систем, поскольку для реалистических моделей гидробиологии, наряду с нелинейными трофическими связями, существенными являются пространственно-неоднородные, изменяющиеся во времени характеристики водной среды, такие как температура, соленость, движение водной среды, концентрация биогенных веществ и др.
- Развитие методов математического моделирования многовидовых моделей гидробиологических процессов позволит в дальнейшем построить модель полной экосистемы мелководного водоема.
- Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»; Водный кодекс РФ; Постановление Правительства РФ от 30.12.2003 №794 «О единой государственной системе предупреждения ЧС», распоряжение Правительства РФ от 4.12.2014, №2462-р.



Биологическая реабилитация мелководного водоема



Теоретической основой биологической реабилитации является комплексное решение проблем загрязненных (эвтрофированных) водоёмов, восстановление и поддержание естественного химического и биологического баланса (биоценоза) – так как это ключевой элемент биологического равновесия и самоочищения водоёма.

Эвтрофикация (др.-греч. εὐτροφία – хорошее питание) – это обогащение рек, озёр и морей биогенами, сопровождающееся повышением продуктивности растительности в водоёмах. Эвтрофикация может быть результатом как естественного старения водоёма, так и антропогенных воздействий. К основным химическим элементам, способствующим эвтрофикации, можно отнести фосфор и азот.

Схема биологической реабилитации водоёмов включает действия, направленные на:

- поглощение загрязняющих веществ;
- улучшение санитарного состояния;
- предотвращение «цветения» воды;
- биологическую мелиорацию высшей водной растительностью и зелеными водорослями;
- вылов рыбы и прочих биологических объектов (рыба рассматривается как компонент экосистемы, предназначенный для выноса из водоёма первичной продукции, которая трансформируется в рыбную продукцию, в виде ихтиомассы).

Основные меры по предотвращению вредоносного цветения водорослей:

- использование видов-антагонистов, видов конкурентов, консументов, паразитов;
- применение глины, перекиси водорода;
- лимитирование железа и основных биогенов;
- осуществление контроля над балластными водами судов;
- установление датчиков ДНК.

Предупредительные меры:

- контроль сбросов неочищенных сточных вод;
- комплексный экологический мониторинг.

Данные дистанционного зондирования Земли



- Для контроля качества моделирования процессов гидродинамики и биологической кинетики были использованы результаты спутникового мониторинга Земли, полученные НИЦ «Планета».
- Анализ спутниковых данных позволяет выявлять участки водоема, наиболее подверженные заморным явлениям.



Цветосинтезированные изображения Азовского моря
(спектральные каналы: 0,620-0,670 нм; 0,545-0,565 нм; 0,459-0,479 нм)

Обширные зоны «цветения вод» в Азовском море

Сотрудничество



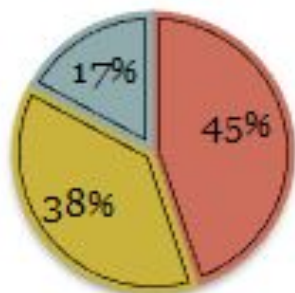
Название организации	Юридический адрес	
Администрация г. Таганрога, отдел по охране окружающей среды и природных ресурсов	г. Таганрог, ул. Петровская, 73 тел.: (8634) 312-800, 613-560, факс (8634) 312-730	Официальный портал  Администрация города Таганрога
Федеральное государственное учреждение «Информационно-аналитический центр по водопользованию и мониторингу Азовского моря», ФГУ «АЗОВМОРИНФОРМЦЕНТР», г. Таганрог	Г. Таганрог, ул. Инструментальная, 48, тел. (8634) 60-14-41	
НИИ многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог	г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42, Тел./факс (863-4) 36-03 76, 61-54-59	
Южный научный центр, ЮНЦ РАН, г. Ростов-на-Дону	г. Ростов-на-Дону пр. Чехова, 41, т./ф. (863)266-56-77	

Биоресурсы Азовского моря



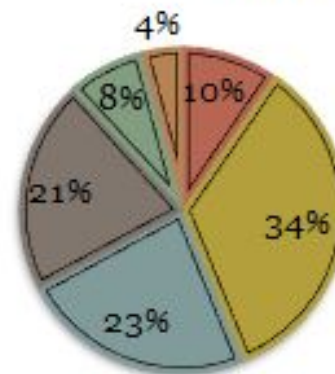
Данные о составе биоресурсов по Азовскому морю

■ Фитопланктон ■ Зоопланктон ■ Рыбы

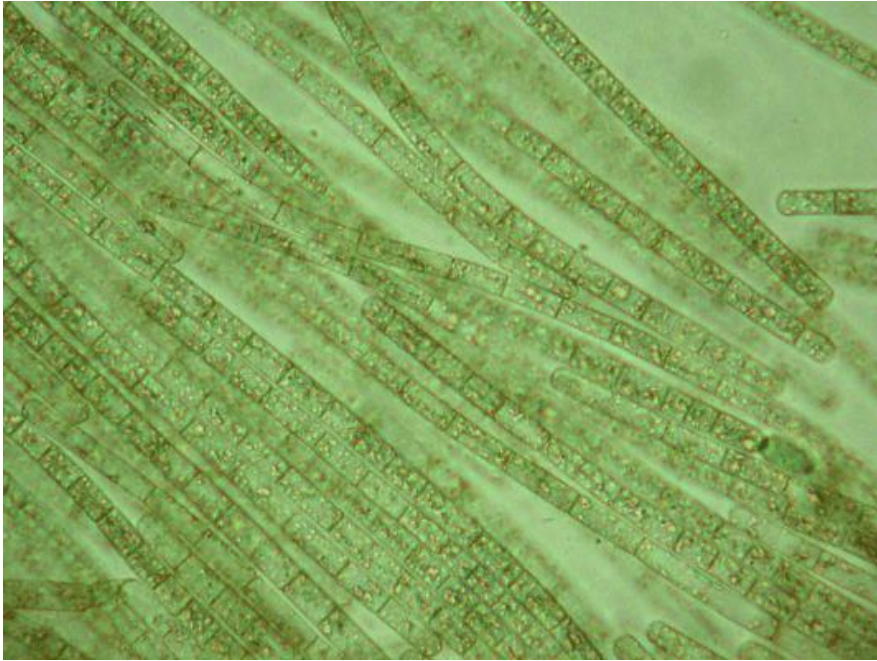


Состав зоопланктона Азовского моря по числу видов

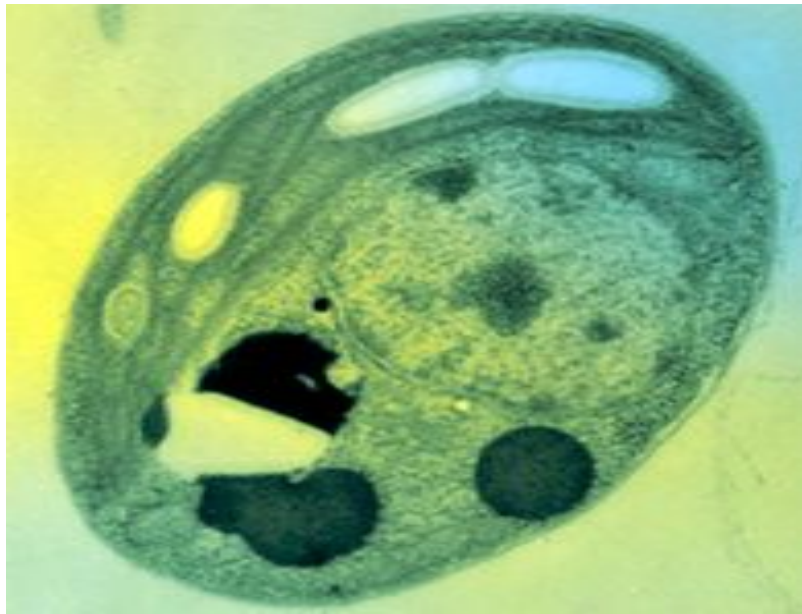
■ Простейшие ■ Коловратки
■ Ветвистоусые ракообразные ■ Веслоногие ракообразные
■ Мизиды ■ Кумацеи



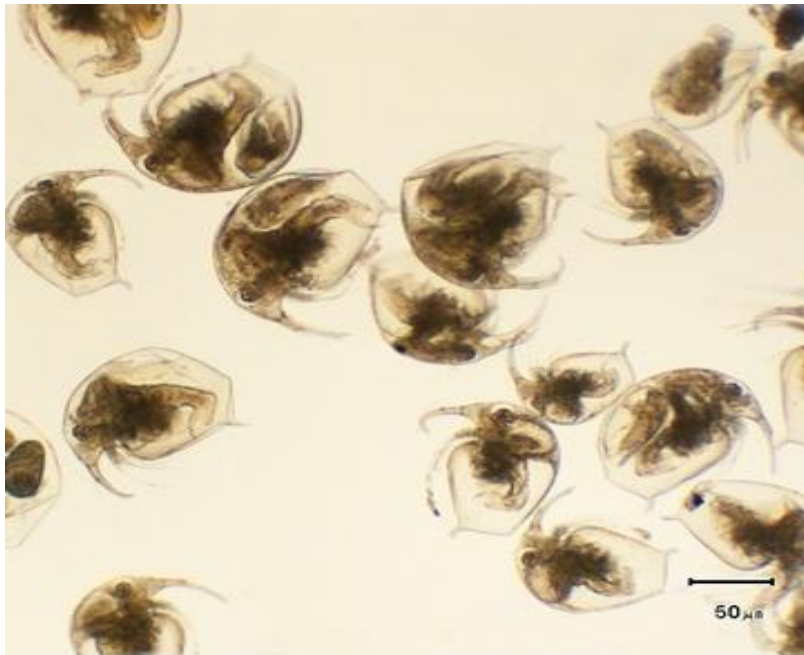
Aphanizomenon



Chlorella Vulgaris BIN



Bosmina longirostris



Промысловые рыбы Азовского моря



В Азовском море обитает более **70** видов различных рыб, среди которых: белуга, осетр, севрюга, камбала, кефаль, тюлька, хамса, тарань, рыбец, шемая, различные виды бычков. В Азовском море и в устьях, впадающих в него рек и лиманах встречается **114** видов и подвидов рыб.



Пеленгас (пиленгас, пелингас, белингас)
(*Liza haematocheilus*)

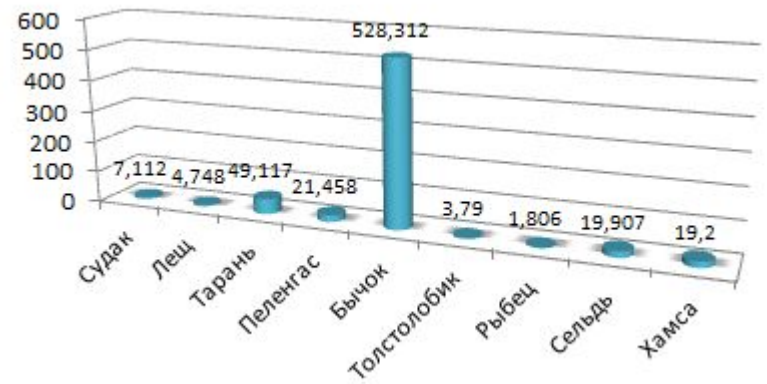


Диаграмма вылова рыбы
в Таганрогском заливе, тыс. т



Азовская хамса, или анчоус
(*Engraulis encrasicolus maoticus*)

Модель динамики вредоносной водоросли *Skeletonema costatum*



$$\frac{\partial X}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{U}X) = \mu_X \Delta X + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_X \frac{\partial X}{\partial z} \right) + (\alpha_0 + \gamma M) \psi X - \delta X,$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{U}S) = \mu_S \Delta S + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_S \frac{\partial S}{\partial z} \right) - (\alpha_0 + \gamma M) \psi X + B(S_p - S) + f,$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{U}M) = \mu_M \Delta M + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_M \frac{\partial M}{\partial z} \right) + k_M X - \varepsilon M.$$

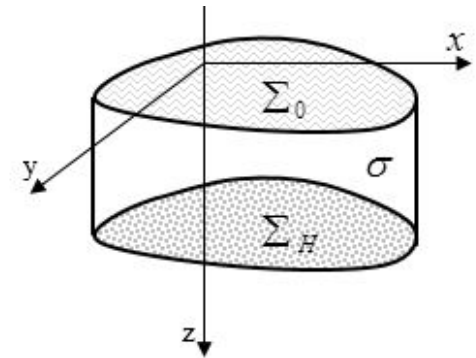
X, S, M – концентрация фитопланктона (диатомовой водоросли *Skeletonema costatum*), биогенного вещества (кремний) и метаболита соответственно; $\mathbf{U} = (U, V, W)$ – компоненты вектора скорости водного потока; $\alpha = (\alpha_0 + \gamma M)$ – коэффициент роста X за счет M ; α_0 – скорость роста X в отсутствие M ; γ – параметр воздействия; $\mu_X, \mu_S, \mu_M, \nu_X, \nu_S, \nu_M$ – диффузионные коэффициенты в горизонтальном и вертикальном направлениях субстанций X, S, M соответственно; C – концентрация солености; T – температура; $\delta = \delta(C)$ – коэффициент убыли X за счет отмирания (удельная смертность), учитывающий влияние C ; B – удельная скорость поступления ЗВ; S_p – предельно возможная концентрация ЗВ; $f(x, y, z)$ – функция источника загрязнения; k_M – коэффициент экскреции; ε – коэффициент разложения M ; $\psi(I, T, S, C)$ – коэффициент, учитывающий влияние освещенности, температуры, концентрации биогенного вещества и солености на рост X . n – вектор внешней нормали к поверхности Σ . U_n – нормальная по отношению к Σ составляющая вектора скорости водного потока.

Начальные условия: $\varphi(x, y, z, 0) = \varphi_0(x, y, z), \varphi \in \{X, S, M\}, (x, y, z) \in \bar{G}, t = 0.$

Граничные условия: $\varphi = 0$ на σ , если $U_n < 0$; $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ на σ , если $U_n \geq 0$; $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$ на Σ_0 ; $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\varepsilon_i \varphi$ на $\Sigma_H, i \in \{1, 2, 3\}$

ε_1 – учитывает опускание водорослей на дно и их затопление;

$\varepsilon_2, \varepsilon_3$ – учитывают поглощение S, M донными отложениями.



Переменные и параметры	Размерность
x, y, z	см
t	мин
X	кол-во водор. / см ³
S, M	мг / см ³
$\alpha_X = \alpha_0 + \gamma M$	мин ⁻¹
$S_p, f(x, y, z)$	мг / см ³
C	° / ∞
T	°C
u, v, w	см / мин
$\delta, \varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, B, k_M$	мин ⁻¹
$\mu_X, \mu_S, \mu_M, \nu_X, \nu_S, \nu_M$	см ² / мин

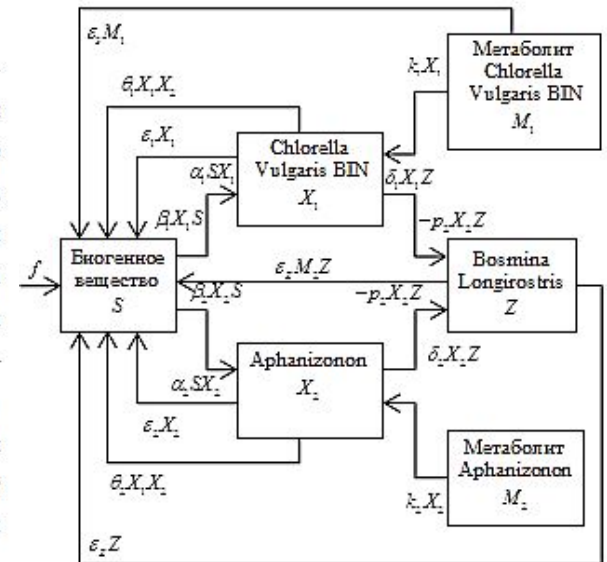
Многовидовая модель взаимодействия фито- и зоопланктона



$$\begin{aligned} \frac{\partial X_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{U}X_1) &= \mu_1 \Delta X_1 + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_1 \frac{\partial X_1}{\partial z} \right) + \alpha_1 \psi_1(S) X_1 - g_1(X_1, Z) - \theta_1 X_1 X_2 - \varepsilon_1 X_1, \\ \frac{\partial X_2}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{U}X_2) &= \mu_2 \Delta X_2 + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_2 \frac{\partial X_2}{\partial z} \right) + \alpha_2 \psi_2(S) X_2 - g_2(X_2, Z) - \theta_2 X_1 X_2 - \varepsilon_2 X_2, \\ \frac{\partial Z}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{U}Z) &= \mu_z \Delta Z + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial Z}{\partial z} \right) + \psi_z(X_1, X_2) Z - \lambda(M_2) Z, \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{U}S) &= \mu_s \Delta S + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_s \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \psi_s(X_1, X_2) S + \varepsilon_1 X_1 + \varepsilon_2 X_2 + \lambda(M_2) Z + B(S_p - S) + f, \\ \frac{\partial M_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{U}M_i) &= \mu_m \Delta M_i + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_m \frac{\partial M_i}{\partial z} \right) + k_i X_i - \varepsilon_m M_i, \end{aligned}$$

X_i – значения концентраций зеленых (*Chlorella Vulgaris* BIN) и синезеленых водорослей (*Aphanizomenon flos-aquae*) соответственно, $i \in \{1, 2\}$; Z – концентрация зоопланктона (*Bosmina Longirostris*); S – концентрация биогенного вещества; M_i – концентрация метаболита i -го вида; $\mu_r, \mu_z, \mu_s, \nu_r, \nu_z, \nu_s$ – диффузионные коэффициенты в горизонтальном и вертикальном направлениях субстанций $X_i, Z, S, M_i, r \in \{1, 2, 3, 4\}$; $\alpha_i = (\alpha_{0i} + \gamma_i M_i)$ – функция роста i -го вида за счет M_i ; α_{0i}, γ_i – скорость роста в отсутствии метаболита и параметр воздействия i -го вида; α_z – скорость роста Z ; $\psi_z(X_1, X_2)$ – функция, описывающая рост Z за счет потребления вида X_1 и угнетения видом X_2 ; $g_i(X_i, Z)$ – функция поглощения зоопланктоном i -го вида фитопланктона; $\psi_s(X_1, X_2)$ – функция потребления S водорослями; B – скорость поступления S ; S_p – предельно возможная концентрация биогенного вещества; ε_i – коэффициенты смертности i -го вида; $\lambda(M_2)$ – функция смертности Z , включающая в себя риск элиминации за счет M_2 ; ε_m – коэффициенты разложения $M_i, m = \overline{3, 4}; i = \overline{1, 2}$; k_i – коэффициенты экскреции i -го вида; f – функция источника S ; θ_i – коэффициент межвидовой конкуренции i -го вида; \mathbf{u} – поле скоростей водного потока; \mathbf{u}_{0k} – скорость осаднения k -й субстанции; $\mathbf{U} = \mathbf{u} + \mathbf{u}_{0k}$ – скорость конвективного переноса вещества; $k \in \{X_1, X_2, S, Z, M_1, M_2\}$.

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z, 0) &= \varphi_0(x, y, z), \\ \varphi &\in \{X_i, Z, S, M_i\}, (x, y, z) \in \bar{G}, \\ \varphi &= 0 \text{ на } \sigma, \text{ если } u_n < 0; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} &= 0 \text{ на } \sigma, \text{ если } u_n \geq 0; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= 0 \text{ на } \Sigma_0; \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\xi_k \varphi \text{ на } \Sigma_H, \\ k &\in \{1, 2, 3, 4, S, Z\}, \\ \varphi &\in \{X_i, Z, S, M_i\}, i = \overline{1, 2}. \end{aligned}$$



Модель динамики промысловой рыбы пеленгас

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}X) = \mu_x \Delta X + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_x \frac{\partial X}{\partial z} \right) + g_x(X, S) - (\delta_x Z + \sigma_x P + \varepsilon_x) X,$$

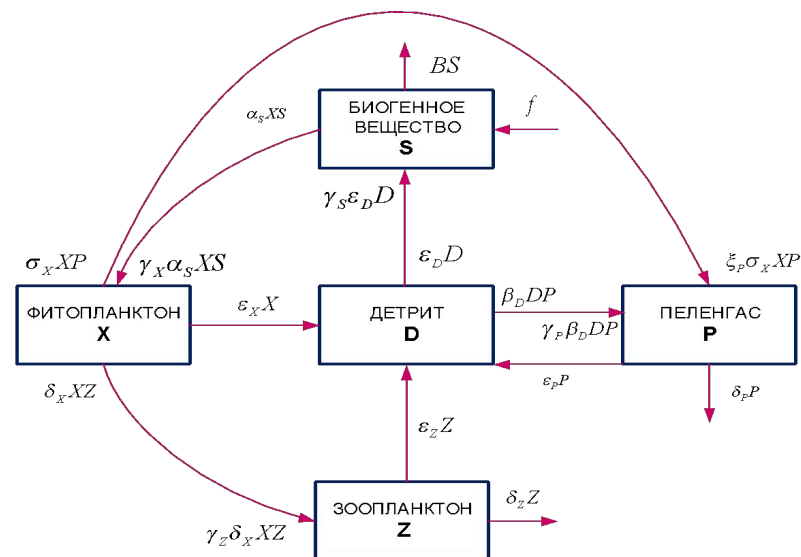
$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}Z) = \mu_z \Delta Z + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial Z}{\partial z} \right) + g_z(X, Z) - (\varepsilon_z + \delta_z) Z,$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}S) = \mu_s \Delta S + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_s \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \gamma_s \varepsilon_D D - g_s(X, S) + B(S_p - S) + f,$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}D) = \mu_D \Delta D + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_D \frac{\partial D}{\partial z} \right) - g_D(D, P) + \varepsilon_X X + \varepsilon_Z Z - \varepsilon_D D,$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}_P P) = \mu_P \Delta P + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_P \frac{\partial P}{\partial z} \right) + g_P(X, D, P) - (\varepsilon_P + \delta_P) P,$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_P}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{U}_P \mathbf{u}_P) = \mu_u \Delta \mathbf{u}_P + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_u \frac{\partial \mathbf{u}_P}{\partial z} \right) - \alpha_u \mathbf{u}_P + k_D \text{grad} D + k_X \text{grad} X,$$



X, Z, S, D, P – концентрации фитопланктона (*Coscinodiscus*), зоопланктона (*Copepoda*), биогенного вещества, детрита, пеленгаса; g_φ – трофические функции для субстанций $\varphi \in \{D, X, Z, S, P\}$. γ_s – доля S , находящегося в биомассе X ; $\varepsilon_z, \varepsilon_p$ – коэффициенты элиминации (смертности) Z, P соответственно; ε_x – коэффициент, учитывающий смертность и метаболизм X ; δ_x – убыль X за счет выедания Z ; δ_z – убыль Z за счет выедания рыбами; δ_p – убыль P за счет выедания рыбами и вылова; S_p – предельно возможная концентрация биогенного вещества; $f = f(t, x, y, z)$ – функция источника загрязнения; B – удельная скорость поступления ЗВ; ε_D – коэффициент разложения D ; β_D – скорость потребления органических остатков пеленгасом; μ_φ, ν_φ – диффузионные коэффициенты в горизонтальном и вертикальном направлениях субстанций $\varphi \in \{D, X, Z, S, P\}$ соответственно; \mathbf{u} – поле скоростей водного потока; $\mathbf{U} = \mathbf{u} + \mathbf{u}_{0\varphi}$ – скорость конвективного переноса вещества; $\mathbf{U}_P = \mathbf{u} + \mathbf{u}_P$ – скорость конвективного переноса P ; \mathbf{u}_P – скорость движения рыбы относительно воды; k_D, k_X – коэффициенты таксиса; μ_u, ν_u – коэффициенты горизонтальной и вертикальной составляющих диффузии скорости таксиса; α_u – коэффициент инерционного движения рыбы; $\mathbf{u}_{0\varphi}$ – скорость осаждения φ -й субстанции под действием силы тяжести, $\varphi \in \{X, Z, S, D\}$.

Модель распространения загрязняющего вещества в мелководном водоеме



$$u'_x + v'_y + w'_z = 0,$$

$$u'_t + (u^2)'_x + (uv)'_y + (uw)'_z = -\frac{1}{\rho} p'_x - \varphi'_x + \frac{\eta}{\rho} (u''_{xx} + u''_{yy} + u''_{zz}) + 2\Omega(v \sin \vartheta - w \cos \vartheta),$$

$$v'_t + (uv)'_x + (v^2)'_y + (vw)'_z = -\frac{1}{\rho} p'_y - \varphi'_y + \frac{\eta}{\rho} (v''_{xx} + v''_{yy} + v''_{zz}) - 2\Omega u \sin \vartheta,$$

$$w'_t + (uw)'_x + (vw)'_y + (w^2)'_z = -\frac{1}{\rho} p'_z - \varphi'_z + \frac{\eta}{\rho} (w''_{xx} + w''_{yy} + w''_{zz}) + 2\Omega u \cos \vartheta$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}(SV) = D_s \Delta S + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_s \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \mu S + f(x, y, z, t)$$

Протяженность Азовского моря много меньше радиуса Земли, поэтому будем считать ускорение свободного падения \mathbf{g} (с учетом центробежной силы) постоянным. Введем прямоугольную декартову систему координат. При этом ось OZ направим противоположно направлению \mathbf{g} из некоторой точки на невозмущенной поверхности жидкости, ось Ox – на восток, ось Oy – на север. Поскольку вклад центробежной силы составляет $\approx 0,2\%$ от вклада гравитационной силы притяжения к Земле, угол между вектором угловой скорости вращения Земли Ω и вертикалью OZ можно считать совпадающим с широтой места ϑ .

В систему входит уравнение неразрывности, уравнения Навье-Стокса для вязкой (в линейном приближении) несжимаемой (плотность $\rho = \text{const}$) жидкости, вращающейся с угловой скоростью $\Omega = \Omega \cdot (\cos \vartheta \cdot \mathbf{j} + \sin \vartheta \cdot \mathbf{k})$, где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – единичные орты; $u = u(x, y, z, t)$, $v = v(x, y, z, t)$, $w = w(x, y, z, t)$ – компоненты вектора скорости жидкости в точке (x, y, z, t) в момент времени t .
Последнее уравнение системы – уравнение распространения примеси в водной среде; p – полное гидростатическое давление; φ – гидравитационный потенциал, η – первый коэффициент вязкости в одном поле тяжести; $\nabla \varphi = -\mathbf{g} = -g \cdot \mathbf{k} = \text{const}$, $p_a = p_a(x, y, z, t)$: $p = p_a + \rho g(\zeta - z)$, $\nabla p = g(\zeta'_x \mathbf{i} + \zeta'_y \mathbf{j} - \mathbf{k})$, $-h \leq z \leq \zeta$, где $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – поднятие уровня свободной поверхности жидкости по отношению к невозмущенному состоянию; $h = h(x, y, t)$ – высота столба жидкости под невозмущенной поверхностью; $f_s = -\mu S + f(x, y, z)$, где: f_s – внутренние источники (стоки) вещества; S – концентрация примеси, переносимой потоком; μS – характеризует взаимодействие вещества с водой; $f = f(x, y, z)$ – источник вещества концентрации S ; D_s – коэффициент горизонтальной диффузии вещества; κ_s – коэффициент вертикальной диффузии вещества; $\mathbf{V} = (u, v, w)$ – вектор скорости водного потока.

Модель эвтрофикации вод мелководного водоема

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} + u \frac{\partial S_i}{\partial x} + v \frac{\partial S_i}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial S_i}{\partial z} = \mu_i \Delta S_i + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_i \frac{\partial S_i}{\partial z} \right) + \psi_i,$$

где u, v, w – компоненты вектора скорости водного потока, $\mathbf{U} = (u, v, w)$; w_g – скорость гравитационного осаждения i -ой компоненты, если она находится во взвешенном состоянии; Δ – двумерный оператор Лапласа; μ_i, ν_i – коэффициенты турбулентного обмена соответственно по горизонтальному и вертикальному направлениям; ψ_i – химико-биологический источник (сток) или член описывающий агрегирование (слипание-разлипание), если соответствующая компонента является взвесью, индекс i указывает на вид субстанции, $i \in \overline{1,15}$: 1 – сероводород (H_2S); 2 – элементарная сера (S); 3 – сульфаты (SO_4); 4 – тиосульфаты (и сульфиты); 5 – общий органический азот (N); 6 – аммоний (NH_4) (аммонийный азот); 7 – нитриты (NO_2); 8 – нитраты (NO_3); 9 – растворенный марганец ($DOMn$); 10 – взвешенный марганец ($POMn$); 11 – растворенный кислород (O_2); 12 – силикаты (SiO_3 – метасиликат; SiO_4 – ортосиликат); 13 – фосфаты (PO_4); 14 – железо (Fe^{2+}); 15 – кремниевая кислота (H_2SiO_3 – метакремниевая; H_2SiO_4 – ортокремниевая).

Граничные условия:

$$S_i = 0 \text{ на } \sigma, \text{ если } U_n < 0; \quad \frac{\partial S_i}{\partial n} = 0 \text{ на } \sigma, \text{ если } U_n \geq 0;$$

$$\frac{\partial S_i}{\partial z} = 0 \text{ на } \Sigma_0; \quad \frac{\partial S_i}{\partial z} = -\varepsilon_{S_i} S_i \text{ на } \Sigma_H,$$

где ε_{S_i} – коэффициент поглощения S_i -й примеси донными отложениями.

Начальные условия:

$$S_i|_{t=0} = S_i^0(x, y, z, 0), \quad i = \overline{1,15}.$$

Аналитическое исследование моделей гидробиологии моря



Линеаризованная задача динамики вредоносной водоросли

Предположим периодичность процесса ($T_0 > 0$, T_0 – период):

$X(x, y, z, t) = X(x, y, z, t + T_0)$, $S(x, y, z, t) = S(x, y, z, t + T_0)$. Введем на

поверхности Σ области G функции $U_n^+ = \begin{cases} U_n, U_n \geq 0; \\ 0, U_n < 0 \end{cases}$ и $U_n^- = U_n - U_n^+$.

Разобьем интервал $0 \leq t \leq T_0$ на достаточно малые отрезки времени

$t_j \leq t \leq t_{j+1}$, $j = 0, 1, \dots, N_t - 1$, $t_0 = 0$, $t_{N_t} = T_0$.

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \text{div}(UX) = \mu_X \Delta X + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_X \frac{\partial X}{\partial z} \right) + (\alpha_0 + \gamma M^j) S^j X - \delta X,$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}(US) = \mu_S \Delta S + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_S \frac{\partial S}{\partial z} \right) - (\alpha_0 + \gamma M^j) S^j X + B(S_p - S) + f,$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \text{div}(UM) = \mu_M \Delta M + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_M \frac{\partial M}{\partial z} \right) + k_M X^j - \varepsilon M.$$

Теорема 2.

Пусть $S_i(x, y, z, t)$, $\psi_i \in C^2(\Pi_t) \cap C(\bar{\Pi}_t)$, $\Pi_t = G \times (0 < t < T_0)$;

$\mu_i = \text{const} > 0$; $U, v_i(z) \in C^1(\bar{G})$; $S_{i0} \in C(\bar{G})$, $i = \overline{1, 15}$. Тогда, если:

$\max_G \{ \mu_i, v_i \} - \frac{1}{\lambda_0} \max_G \{ |p_i| \} > 0$ для всех $i = \overline{1, 15}$, $\psi_i = p_i(S_j) S_i + \bar{\psi}_i$, $i \neq j$;

$\bar{\psi}_i = LS_i - DS_i - p_i S_i$;

$$LS_i = \frac{\partial S_i}{\partial t} + \text{div}(S_i U_i); \quad DS_i = \mu_i \Delta S_i + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_i \frac{\partial S_i}{\partial z} \right);$$

$\lambda_0 = \pi^2 (1/L_x^2 + 1/L_y^2 + 1/L_z^2)$, то модельная задача эвтрофикации вод

мелководного водоема (ЭВ) имеет решение.

Теорема 1.

Пусть граница Σ цилиндрической области G является кусочно-гладкой; $X, S \in C^2(G) \cap C^1(\bar{G})$ – решение линеаризованной задачи динамики вредоносного фитопланктона (при $\gamma = 0$) с соответствующими начальными и граничными условиями; $\mu_X, \mu_S, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \alpha_0, \delta, B = \text{const} > 0$; $U, v_X(z), v_S(z) \in C^1(\bar{G})$; $f, X_0, S_0 \in C(\bar{G})$, тогда при выполнении оценки:

$$4\mu_X \left[1/(L_x)^2 + 1/(L_y)^2 \right] + 4 \min_G \{ v_X \} / (L_z)^2 + \delta - \alpha_0 \max_G \{ S^0 \},$$

L_x, L_y, L_z – максимальные размеры области G в направлении координатных осей Ox, Oy, Oz соответственно, решение линеаризованной задачи динамики вредоносного фитопланктона единственно.

Теорема 3.

Пусть $S_i(x, y, z, t)$, $\psi_i \in C^2(\Pi_t) \cap C(\bar{\Pi}_t)$, $\mu_i = \text{const} > 0$;

$U, v_i(z) \in C^1(\bar{G})$, $i = \overline{1, 15}$. Тогда при выполнении неравенств:

$2\mu_i (1/L_x^2 + 1/L_y^2) + 2v_i / L_z^2 \geq \varphi_i$ для всех $i = \overline{1, 15}$ (функции φ_i определяются

источниками ЗВ) модельная задача ЭВ мелководного водоема имеет единственное решение.

2. Комплексное моделирование с учетом: структурообразования; эффекта наружно-гормонального регулирования; движения водной среды; микротурбулентной диффузии; гравитационного оседания субстанций; влияния неравномерных по пространству распределений биогенных веществ, температуры, солености, кислорода; сложной геометрии дна и береговой линии; межвидовой конкуренции; таксиса; вылова позволит повысить точность предсказания состояния экологической обстановки акваторий мелководных водоемов.

Дискретизация непрерывных моделей гидробиологии моря



Неявная схема, ориентированная против потока, для многовидовой модели взаимодействия фито- и зоопланктона

$$\varphi_i + \frac{(U-|U|)}{2}\hat{\varphi}_x + \frac{(U+|U|)}{2}\hat{\varphi}_x + \frac{(V-|V|)}{2}\hat{\varphi}_y + \frac{(V+|V|)}{2}\hat{\varphi}_y + \frac{(W-|W|)}{2}\hat{\varphi}_z + \frac{(W+|W|)}{2}\hat{\varphi}_z = \mu_i(\hat{\varphi}_{xx} + \hat{\varphi}_{yy}) + (\hat{\varphi}v_{iz})_z + \psi_i\hat{\varphi} + \theta_i,$$

$$1 \leq j \leq N_x - 1, 1 \leq k \leq N_y - 1, 1 \leq l \leq N_z - 1,$$

$$0 \leq n \leq N_t - 1; i \in \{1, 2, Z, S, 3, 4\};$$

$\hat{\varphi}$ – значение соответствующей функции на $(n+1)$ -м временном слое;

φ – значение соответствующей функции на n -м временном слое;

$$\varphi \in \{X_{(1)}, X_{(2)}, Z, S, M_{(1)}, M_{(2)}\}; \psi_1 = \alpha_1 S - \delta_1 Z - \theta_1 X_{(2)} - \varepsilon_1;$$

$$\psi_2 = \alpha_2 S - \delta_2 Z - \theta_2 X_{(1)} - \varepsilon_2; \psi_Z = p_1 X_{(1)} - p_2 X_{(2)} - \varepsilon_Z M_{(2)};$$

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_Z = 0; \psi_S = -\beta_1 X_{(1)} - \beta_2 X_{(2)} - B;$$

$$\theta_S = \varepsilon_1 X_{(1)} + \varepsilon_2 X_{(2)} + \varepsilon_Z M_{(2)} Z + BS_p + f; \psi_3 = -\varepsilon_3, \theta_3 = k_1 X_{(1)};$$

$$\psi_4 = -\varepsilon_4, \theta_4 = k_2 X_{(2)}.$$

Неявная схема с центральными разностями для многовидовой модели взаимодействия фито- и зоопланктона

$$\varphi_i^{p+1} + U\hat{\varphi}_x^{p+1} + V\hat{\varphi}_y^{p+1} + W\hat{\varphi}_z^{p+1} = \mu_i(\hat{\varphi}_{xx}^{p+1} + \hat{\varphi}_{yy}^{p+1}) + (v_i\hat{\varphi}_z^{p+1})_z + \psi_i\hat{\varphi}^{p+1} + \theta_i,$$

$$1 \leq j \leq N_x - 1, 1 \leq k \leq N_y - 1, 1 \leq l \leq N_z - 1,$$

$\hat{X}_{(m)}, \hat{Z}, \hat{S}, \hat{M}_{(m)}, m = \overline{1, 2}$ – значения соответствующих функций

в узлах сетки на $(n+1)$ -м временном слое;

p – номер итерации в итерационном процессе;

$$i \in \{1, 2, Z, S, 3, 4\}; \varphi \in \{X_{(1)}, X_{(2)}, Z, S, M_{(1)}, M_{(2)}\};$$

$$\psi_1 = \alpha_1 \hat{S}^p - \delta_1 \hat{Z}^p - \theta_1 \hat{X}_{(2)}^p - \varepsilon_1; \psi_2 = \alpha_2 \hat{S}^p - \delta_2 \hat{Z}^p - \theta_2 \hat{X}_{(1)}^p - \varepsilon_2;$$

$$\psi_Z = p_1 \hat{X}_{(1)}^p - p_2 \hat{X}_{(2)}^p - \varepsilon_Z \hat{M}_{(2)}^p; \psi_S = -\beta_1 \hat{X}_{(1)}^p - \beta_2 \hat{X}_{(2)}^p - B;$$

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_Z = 0; \theta_S = \varepsilon_1 \hat{X}_{(1)}^{p+1} + \varepsilon_2 \hat{X}_{(2)}^{p+1} + \varepsilon_Z \hat{M}_{(2)}^p \hat{Z}^{p+1} + BS_p + f;$$

$$\psi_3 = -\varepsilon_3; \theta_3 = k_1 \hat{X}_{(1)}^{p+1}; \psi_4 = -\varepsilon_4; \theta_4 = k_2 \hat{X}_{(2)}^{p+1}.$$

Исследование дискретной модели эвтрофикации вод Азовского моря



$$\begin{aligned}
 & \frac{(S_{(i)j,k,l}^{n+1} - S_{(i)j,k,l}^n)}{\tau} + \left(\bar{u}_{j+\frac{1}{2},k,l}^n \frac{\sigma S_{(i)j+1,k,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j+1,k,l}^n}{2h_x} - \bar{u}_{j-\frac{1}{2},k,l}^n \frac{\sigma S_{(i)j-1,k,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j-1,k,l}^n}{2h_x} \right) + \\
 & + \left(\bar{v}_{j,k+\frac{1}{2},l}^n \frac{\sigma S_{(i)j,k+1,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j,k+1,l}^n}{2h_y} - \bar{v}_{j,k-\frac{1}{2},l}^n \frac{\sigma S_{(i)j,k-1,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j,k-1,l}^n}{2h_y} \right) + \\
 & + \left(\left(\bar{w}_{j,k,l+\frac{1}{2}}^n - \bar{w}_{g(i)j,k,l+\frac{1}{2}}^n \right) \frac{\sigma S_{(i)j,k,l+1}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j,k,l+1}^n}{2h_z} - \left(\bar{w}_{j,k,l-\frac{1}{2}}^n - \bar{w}_{g(i)j,k,l-\frac{1}{2}}^n \right) \frac{\sigma S_{(i)j,k,l-1}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j,k,l-1}^n}{2h_z} \right) - \\
 & - \frac{H_x}{h_x^2} \left(\sigma S_{(i)j+1,k,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j+1,k,l}^n - 2\sigma S_{(i)j,k,l}^{n+1} - 2(1-\sigma)S_{(i)j,k,l}^n \right) - \frac{H_x}{h_x^2} \left(\sigma S_{(i)j-1,k,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j-1,k,l}^n \right) - \\
 & - \frac{H_y}{h_y^2} \left(\sigma S_{(i)j,k+1,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j,k+1,l}^n - 2\sigma S_{(i)j,k,l}^{n+1} - 2(1-\sigma)S_{(i)j,k,l}^n \right) - \frac{H_y}{h_y^2} \left(\sigma S_{(i)j,k-1,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j,k-1,l}^n \right) - \\
 & - \frac{1}{h_z} \left(v_{(i)j,k,l+\frac{1}{2}}^n \frac{\sigma S_{(i)j,k,l+1}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j,k,l+1}^n - \sigma S_{(i)j,k,l}^{n+1} - (1-\sigma)S_{(i)j,k,l}^n}{h_z} \right) + \\
 & + \frac{1}{h_z} \left(v_{(i)j,k,l-\frac{1}{2}}^n \frac{\sigma S_{(i)j,k,l}^{n+1} + (1-\sigma)S_{(i)j,k,l}^n - \sigma S_{(i)j,k,l-1}^{n+1} - (1-\sigma)S_{(i)j,k,l-1}^n}{h_z} \right) - \Psi_{(i)j,k,l}^n = 0,
 \end{aligned}$$

$$h_x < \left\| \frac{2\mu_i}{\bar{u}^n} \right\|_{C(\bar{\omega}_h)}$$

$$h_y < \left\| \frac{2\mu_i}{\bar{v}^n} \right\|_{C(\bar{\omega}_h)}$$

$$h_z < \left\| 2v_i / (\bar{w}^n - \bar{w}_{g_i}^n) \right\|_{C(\bar{\omega}_h)}$$

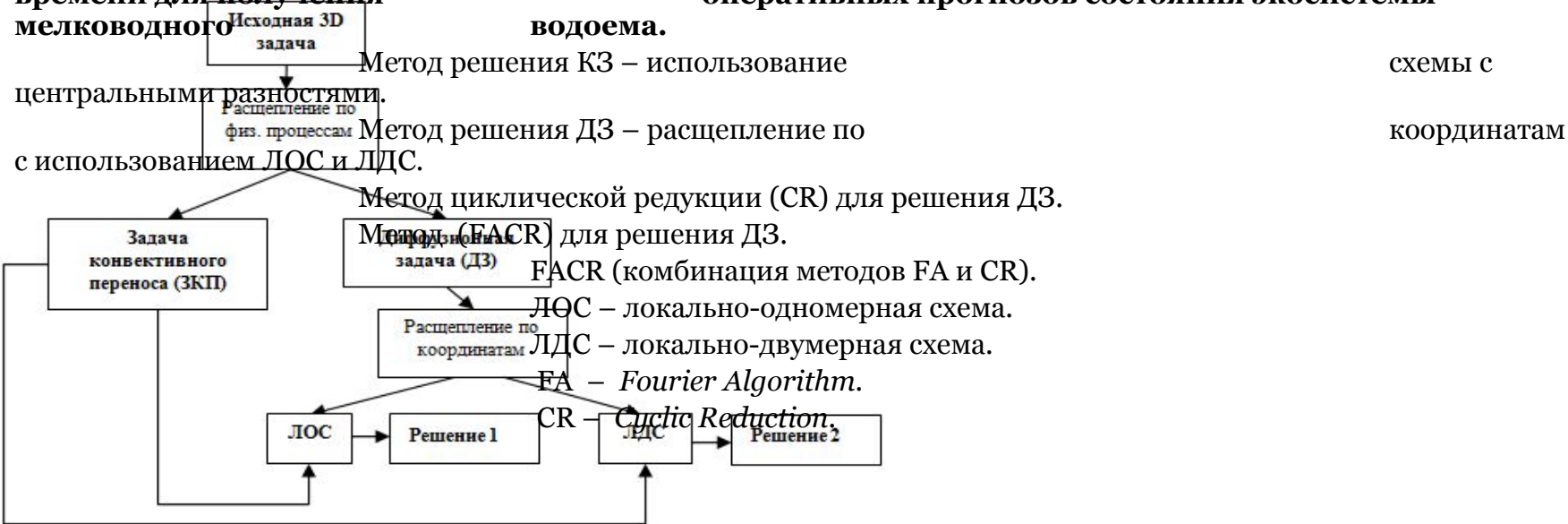
$$1 \leq j \leq N_x - 1, \quad 1 \leq k \leq N_y - 1, \quad 1 \leq l \leq N_z - 1, \quad 0 \leq n \leq N_t - 1.$$

Разработка методов численного решения задач гидробиологии моря



- ММН – метод минимальных невязок.
- ММП – метод минимальных поправок.
- МСС – метод скорейшего спуска (по невязке).
- МСС – метод скорейшего спуска (по поправке).
- МПТМ – модифицированный попеременно-треугольный метод.
- Метод расщепления по физическим процессам и по координатам.

4. Стандартные методы решения сеточных уравнений, возникающих в процессе моделирования гидробиологии водоема, из-за сложности моделей не позволяют времени для получения мелководного водоема. оперативных прогнозов состояния экосистемы мелководного водоема. обеспечить ускоренный масштаб



Метод решения задачи динамики вредоносной водоросли на основе расщепления



$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(U \frac{\partial X}{\partial x} + V \frac{\partial X}{\partial y} + W \frac{\partial X}{\partial z} + \frac{\partial(UX)}{\partial x} + \frac{\partial(VX)}{\partial y} + \frac{\partial(WX)}{\partial z} \right) = \mu_X \Delta X + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_X \frac{\partial X}{\partial z} \right) + (\alpha_0 + \gamma M^j) S^j X - \delta X,$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\partial(US)}{\partial x} + \frac{\partial(VS)}{\partial y} + \frac{\partial(WS)}{\partial z} \right) = \mu_S \Delta S + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_S \frac{\partial S}{\partial z} \right) - (\alpha_0 + \gamma M^j) S X^j + B(S_p - S) + f,$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(U \frac{\partial M}{\partial x} + V \frac{\partial M}{\partial y} + W \frac{\partial M}{\partial z} + \frac{\partial(UM)}{\partial x} + \frac{\partial(VM)}{\partial y} + \frac{\partial(WM)}{\partial z} \right) = \mu_M \Delta M + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_M \frac{\partial M}{\partial z} \right) + k_M X^j - \varepsilon M.$$

1 этап:

$$\frac{\partial X_{(1)}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\operatorname{div}(\mathbf{U} X_{(1)}) + \mathbf{U} \operatorname{grad} X_{(1)} \right) + \delta X_{(1)} = 0,$$

$$\frac{\partial S_{(1)}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\operatorname{div}(\mathbf{U} S_{(1)}) + \mathbf{U} \operatorname{grad} S_{(1)} \right) +$$

$$+ (\alpha_0 + \gamma M_{(1)}^j) S_{(1)} X_{(1)}^j + B S_{(1)} = 0,$$

$$\frac{\partial M_{(1)}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\operatorname{div}(\mathbf{U} M_{(1)}) + \mathbf{U} \operatorname{grad} M_{(1)} \right) + \varepsilon M_{(1)} = 0$$

2 этап:

$$\frac{\partial X_{(2)}}{\partial t} = \mu_X \Delta X_{(2)} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_X \frac{\partial X_{(2)}}{\partial z} \right) + (\alpha_0 + \gamma M_{(2)}^j) S_{(2)}^j X_{(2)},$$

$$\frac{\partial S_{(2)}}{\partial t} = \mu_S \Delta S_{(2)} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_S \frac{\partial S_{(2)}}{\partial z} \right) + B S_p + f,$$

$$\frac{\partial M_{(2)}}{\partial t} = \mu_M \Delta M_{(2)} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_M \frac{\partial M_{(2)}}{\partial z} \right) + k_M X_{(2)}^j.$$

$$\varphi_{(1)}(\mathbf{x}, 0) = \varphi_0(\mathbf{x}); \mathbf{x} \in G; t_{j-1} \leq t \leq t_{j-1} + \tau, j = 1, 2, \dots, J_0; \varphi_{(2)}(\mathbf{x}, t_{j-1}) = \varphi_{(1)}(\mathbf{x}, t_j);$$

$$\varphi_{(\alpha)}(\mathbf{x}, t) \Big|_{\Gamma} = \psi_{(\alpha)}(\mathbf{x}, t_{j-1} + 0, 5\tau); \alpha = \overline{1, 2}; \varphi(\mathbf{x}, t_j) = \varphi_{(2)}(\mathbf{x}, t_j), \varphi \in \{X, S, M\}.$$

Метод расщепления по координатам для диффузионной задачи



ЛОС для решения задачи динамики вредоносного фитопланктона

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + A\varphi = \eta_\alpha(x, t), A = A(t), t > 0, \varphi \in \{X, S, M\},$$

$$\varphi(x, 0) = \varphi_0(x, t), x = (x, y, z) \in \bar{G}$$

$A = -D_x - D_y - g, D = -D_x - D_y$ – оператор диффузионного переноса

$$\frac{y^{j-1+\alpha} z^p - y^{j-1+(\alpha-1)} z^p}{\tau} + A_k^{(2p)} \frac{y^{j-1+\alpha} z^p + y^{j-1+(\alpha-1)} z^p}{2} = \zeta^{(2)}_{j-1+\alpha}; \alpha = 1, 2, 3;$$

$j = 1, 2, \dots$

$$\frac{y^{j-1+\alpha} z^p - y^{j-1+(\alpha-1)} z^p}{\tau} + A_k^{(2p+1-\alpha)} \frac{y^{j-1+\alpha} z^p + y^{j-1+(\alpha-1)} z^p}{2} = \zeta^{(2)}_{j-1+\alpha}; \alpha = 4, 5, 6.$$

A_k – разностная аппроксимация оператора A .

$$y^{(j)}(x, 0) = \varphi_0, y^{(j)}(x, t_{j-1}) = y^{(j-1)}(x, t_{j-1}),$$

$$y^{(2)}(x, t_{j-1+\alpha} z^p) = y^{(2-1)}(x, t_{j-1+\alpha} z^p), \alpha = \overline{2, 6}.$$

$$y^{j-1+\alpha} z^p = \mu^{j-1+\alpha} z^p = 0; x \in \partial \omega_\alpha; \alpha = 1, 2, 3; p = 3; j = 1, 2, \dots, N_x - 1.$$

Система трехточечных уравнений второго порядка

$$a_\alpha y_{i-\alpha}^{j-1+\alpha} z^p - c_\alpha y_{i-\alpha}^{j-1+\alpha} z^p + b_\alpha y_{i-\alpha}^{j-1+\alpha} z^p = -F_\alpha^{j-1+\alpha} z^p, i_\alpha = 1, 2, \dots, N_\alpha - 1$$

по каждому из направлений $x_\alpha, \alpha = \overline{1, 3}$.

Алгоритм вычислений:

из первого уравнения прогонкой по направлению x_1 для каждого $i_\alpha = 1, 2, \dots, N_\alpha - 1, \alpha \in \{2, 3\}$ находится $y_{i_\alpha, i_\alpha}^{j-1+\alpha}$, а затем из второго уравнения прогонкой по направлению x_2 для каждого $i_\alpha = 1, 2, \dots, N_\alpha - 1, \alpha \in \{1, 3\}$ находится $y_{i_\alpha, i_\alpha}^{j-1+\alpha}$, из третьего уравнения прогонкой по направлению x_3 для каждого $i_\alpha = 1, 2, \dots, N_\alpha - 1, \alpha \in \{1, 2\}$ находится $y_{i_\alpha, i_\alpha}^{j-1+\alpha}$. Для второго цикла аналогично.

Исследование ЛОС. Оценка суммарной погрешности аппроксимации

$$\sum_{\alpha=1}^3 \psi_j^{(\alpha)} = O(\tau^2 + |h|^\alpha), |h|^\alpha = \sum_{\alpha=1}^3 h_\alpha^\alpha.$$

ЛДС с весами для решения задачи динамики вредоносного фитопланктона

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \mu_\alpha \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(v_\alpha \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right) + g(\varphi) + \eta_\alpha, \varphi \in \{X, S, M\},$$

$$g(X) = (\alpha_0 + \gamma M') S' X = \alpha_x X, g(S) = g(M) = \eta_x = 0, g(\varphi) = \alpha_\sigma \varphi, \alpha_x = \alpha_\mu = 0,$$

$$\eta_x = BS_x + f, \eta_\mu = k_\mu X', \varphi(x, 0) = \varphi_0(x), \varphi \in \{X, S, M\}, x \in \bar{G}, \bar{G}_t = \bar{G} \times [0, T_0].$$

Цепочка из двумерной задачи: $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = L_1 \varphi + L_2 \varphi + \frac{1}{2} g(\varphi) + \eta_1$ и одномерной задачи:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = L_1 \varphi + \frac{1}{2} g(\varphi) + \eta_2, L_\alpha \varphi = \mu_\alpha \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_\alpha^2}, \alpha \in \{1, 2\}, L_3 \varphi = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(v_\alpha \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right).$$

$$\bar{\omega}_\alpha = \{x_\alpha = m h_\alpha, y_\alpha = n h_\alpha, z_\alpha = k h_\alpha; m = \overline{0, N_x}; n = \overline{0, N_y}; k = \overline{0, N_z}; N_x h_\alpha = L, N_y h_\alpha = L, N_z h_\alpha = L\},$$

$\omega_\alpha = \{(j+1/2)\tau, 1 \leq j \leq N_t\}$, пространственно-временная сетка $\omega_\alpha \times \omega_\alpha$.

$$\frac{y_{(0)}^{j-1+\alpha} - y_{(0)}^{j-1+\alpha}}{\tau} = \sigma \Lambda_1 y_{(0)}^{j-1+\alpha} + \Lambda_2 y_{(0)}^{j-1+\alpha} + \frac{\alpha_\sigma}{2} y_{(0)}^{j-1+\alpha} + \tilde{\eta}_1^{j-1+\alpha},$$

$$\frac{y_{(1)}^j - y_{(1)}^{j-1+\alpha}}{\tau} = (1-\sigma) \Lambda_1 y_{(1)}^j + \Lambda_2 y_{(1)}^j + \frac{\alpha_\sigma}{2} y_{(1)}^j + \tilde{\eta}_2^j, y_{(2)}^j(t_j) = y_{(1)}^j(t_{j-1}), j = 1, 2, \dots, N_t - 1.$$

$$y_{(0)}^j(x, 0) = \varphi_0(x), x \in \bar{\omega}_\alpha; y_{(0)}^j = \mu(x, t_{j-1}), x \in \gamma_\alpha \cup \gamma_\alpha, y_{(1)}^j = \mu(x, t_j), x \in \gamma_\alpha.$$

В регулярных узлах:

$$\Lambda_1(y)_{m,k} = \mu_\alpha \frac{y_{m-1,k} - 2y_{m,k} + y_{m+1,k}}{h_\alpha^2}, \Lambda_2(y)_{m,k} = \mu_\alpha \frac{y_{m,k-1} - 2y_{m,k} + y_{m,k+1}}{h_\alpha^2},$$

$$\Lambda_3(y)_{m,k} = v_{(\sigma)m,k+1/2} \frac{y_{\sigma)m,k+1} - y_{m,k}}{h_\alpha} - v_{(\sigma)m,k-1/2} \frac{y_{m,k} - y_{m,k-1}}{h_\alpha}.$$

В нерегулярных узлах:

$$\Lambda_1(y)_{m,k} = \frac{\mu_\alpha}{h_\alpha} \left(\frac{y_{m-1,k} - y_{m,k}}{h_\alpha} - \frac{y_{m,k} - y_{m+1,k}}{h_\alpha} \right), \Lambda_2(y)_{m,k} = \frac{\mu_\alpha}{h_\alpha} \left(\frac{y_{m,k-1} - y_{m,k}}{h_\alpha} - \frac{y_{m,k} - y_{m,k+1}}{h_\alpha} \right),$$

$$\Lambda_3(y)_{m,k} = \frac{v_{(\sigma)m,k+1/2} y_{\sigma)m,k+1} - y_{m,k}}{h_\alpha} - \frac{v_{(\sigma)m,k-1/2} y_{m,k} - y_{m,k-1}}{h_\alpha}, h_\alpha = \begin{cases} h_\alpha, x \in \gamma_\alpha; \\ h_\alpha^*, x \in \omega_\alpha. \end{cases}$$

$h_\alpha = \begin{cases} h_\alpha, x \in \gamma_\alpha; \\ h_\alpha^*, x \in \omega_\alpha. \end{cases}$ h_α^* – расстояние от нерегулярного узла до граничного узла,

$$h_\alpha^* \leq h_\alpha.$$

Исследование локально-двумерной схемы



ЛДС при $\sigma = 1$ обладает суммарной аппроксимацией:

$\psi = O(\tau + |h|^2)$ (в регулярных узлах); $\psi = O(1)$ (в нерегулярных узлах).

Теорема 5. Пусть поставлена ДЗ с соответствующими начальными и граничными условиями, и функции, входящие в нее, принадлежат следующим классам гладкости: $\varphi(\mathbf{x}, t) \in C^4(G) \cap C^2(\bar{G}) \cap C^2(0 < t \leq T_0)$, $\eta(\mathbf{x}, t) \in C^2(G) \cap C^1(\bar{G}) \cap C^1(0 < t \leq T_0)$. Тогда

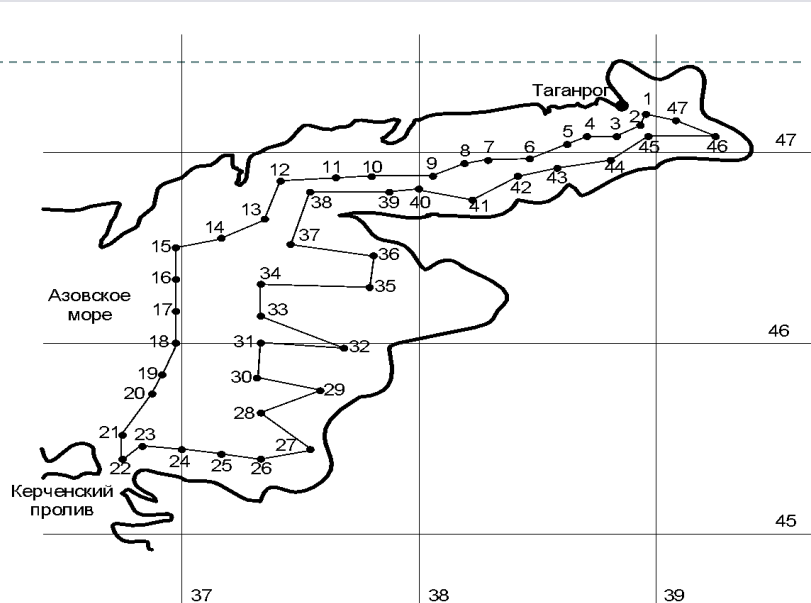
ЛДС (равномерно в метрике C) устойчива по начальным и граничным данным и по правой части так, что для ЛДС при $\tau \geq \frac{4}{\alpha_\varphi}$ и для любого $N_t, j \leq N_t$ выполнено

неравенство:

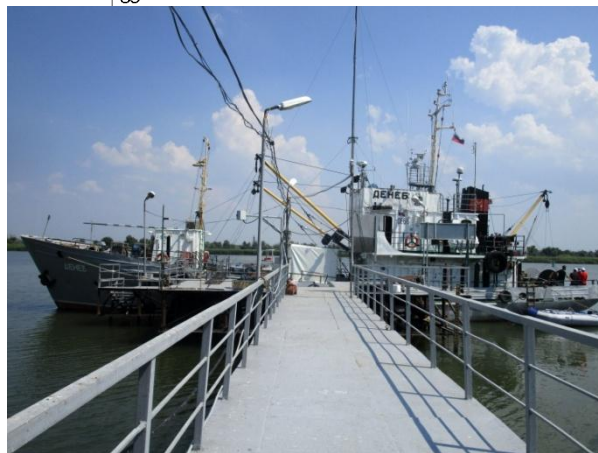
$$\|y^j\|_C \leq M \|\varphi_0\|_C + \max_{0 \leq r \leq N_t} \|\mu(\mathbf{x}, t^r)\|_{C_7} + \tau \left(\sum_{i=1}^{N_t-1} \left\{ K^i \left(\|\tilde{\eta}^{j-i,*}\|_{C^*} + \|\tilde{\eta}^{j-i,\circ}\|_{C^*} \right) \right\} + K \left(\|\tilde{\eta}^{j,*}\|_{C^*} + \|\tilde{\eta}^{j,\circ}\|_{C^*} \right) \right),$$

$$M > 0, M = \max(1, K^{N_t}), K = K(\tau) = \left(1 - \frac{\alpha_\varphi \tau}{2}\right)^{-2}, \tilde{\eta}_\beta^\circ = \begin{cases} \tilde{\eta}_\beta, & x \in \omega_h^\circ; \\ 0, & x \in \omega_h^*, \end{cases} \tilde{\eta}_\beta^* = \begin{cases} 0, & x \in \omega_h^\circ; \\ \tilde{\eta}_\beta, & x \in \omega_h^*, \end{cases} \beta \in \{1, 2\}.$$

Экспедиционные исследования Азовского моря



Научно-исследовательское судно Т/Х
«ПЛАТОН»



НИС
«Днепр»



Многоцелевая яхта
«Буревестник»

Экспедиционные исследования Азовского моря



Судовой навигационный GPS приемник Samyang SPR-1400



Антенна промерного эхолота «Аквазонд»



Профилограф «ADCP Workhorse 600 Sentinel»



Profiler SBE «Sea Bird Electronics 19 plus»



Экспедиционные исследования Азовского моря



Экспедиционные исследования Азовского моря («Денеб», 2017)



Автономная лабораторная экспедиционная платформа для сбора и обработки гидрофизической и гидрохимической информации

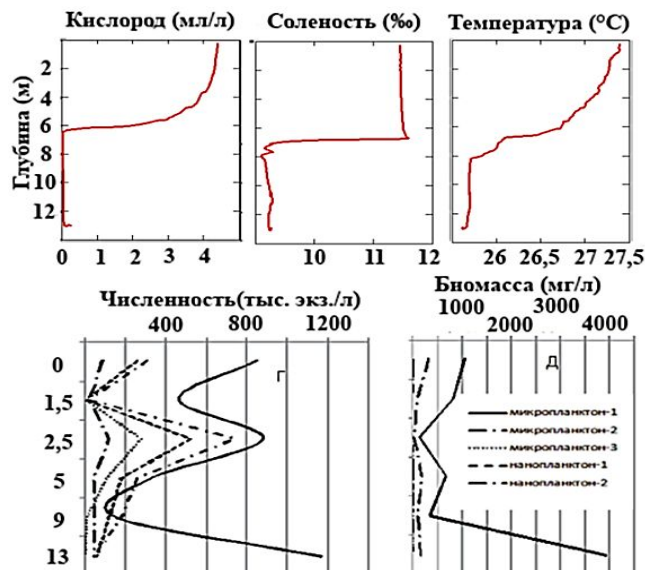
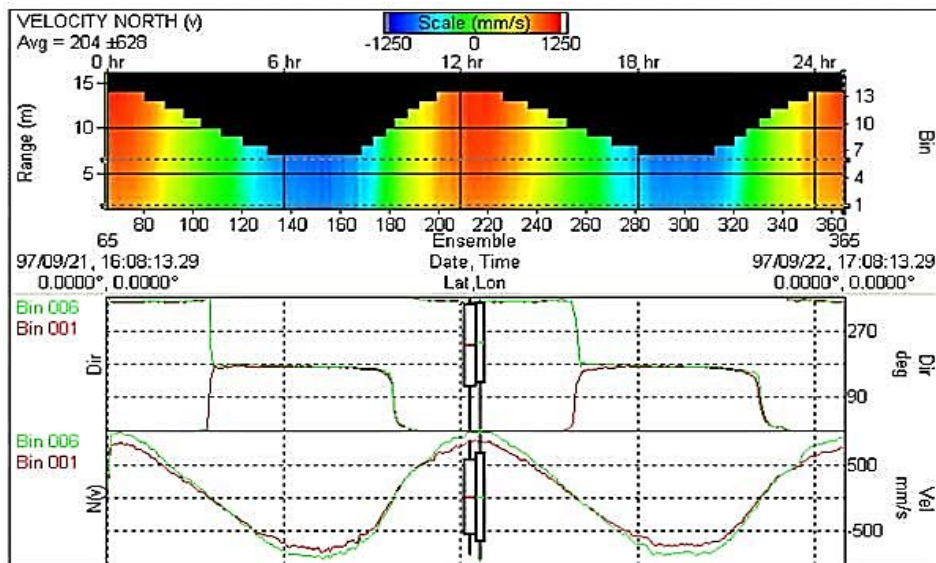
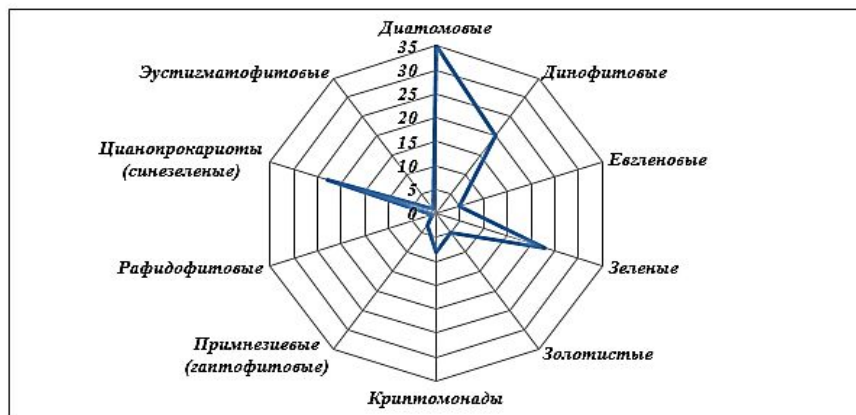


Состав комплекса

- ✓ Терминальный контроллер
- ✓ ТК-84 промышленного исполнения
- ✓ Коммутационная панель УК-84
- ✓ Радиостанция СВ-диапазона
- ✓ Аккумуляторные батареи
- ✓ Антенна СВ-диапазона
- ✓ Сигнальный проблесковый маяк
- ✓ Подводная конструкция для монтажа датчиков



Экспедиционные исследования Азовского моря

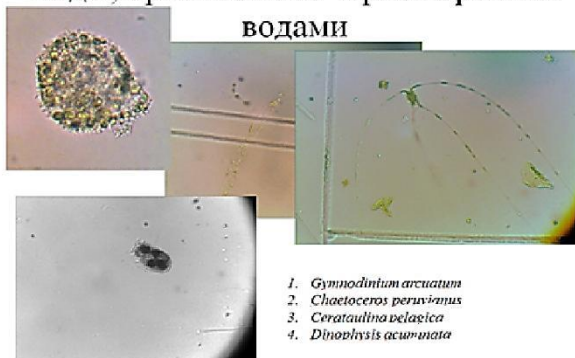


База экспедиционных данных

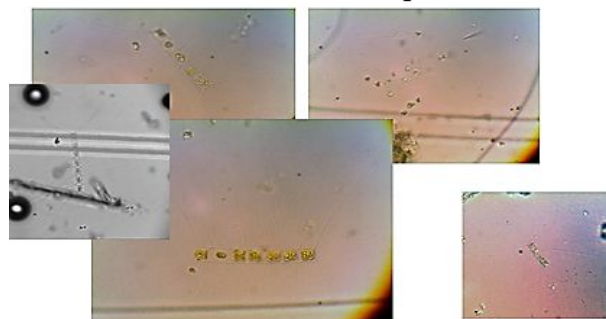
код_вида	название_вида	Группа	Размерный кл.	Жизненная форма	Добавить поле
1	? Reticulata (Cyanoph)	Синезеленые	микропланктон-2	перфорированная колония в	
2	Actinastrum hantzschii	Зеленые	нанопланктон-2	звездчатый ценобий	
3	Amphidinium acutissimum	Динофитовые	нанопланктон-2	голый жгутиконосец	
4	Amphidinium crassum	Динофитовые	микропланктон-2	голый жгутиконосец	
5	Amphidinium rhychocefal	Динофитовые	микропланктон-2	голый жгутиконосец	
6	Anabaena bergii	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцитный трихом	
7	Anabaenopsis arnoldii	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцитный трихом	
8	Anabaenopsis tanganykae	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцитный трихом	
9	Arphanizomenon flos-aquae	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцитный трихом	
10	Arphanizomenon flos-aquae	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцитный трихом	
11	Arphanizomenon gracilis	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцитный трихом	
12	Arphanizomenon ovalisporu	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцитный трихом	
13	Aulacoseira granulata	Диатомовые	микропланктон-3	цилиндрическая колония	
14	Binuclearia lauterbornii	Зеленые	микропланктон-3	трихом	
15	Cerataulina bergonii	Диатомовые	микропланктон-3	щепочка с осями	
16	Chaetoceros abnormis f. sin	Диатомовые	микропланктон-1	хетоцериды	
17	Chaetoceros affinis	Диатомовые	микропланктон-1	щепочка с осями	
18	Chaetoceros lorenzianus	Диатомовые	микропланктон-1	щепочка с осями	
19	Chaetoceros muelleri	Диатомовые	нанопланктон-1	хетоцериды	
20	Chaetoceros pauventi	Диатомовые	нанопланктон-1	хетоцериды	
21	Chaetoceros peruvianus	Диатомовые	микропланктон-2	хетоцериды	
22	Chaetoceros simplex	Диатомовые	микропланктон-2	хетоцериды	
23	Chaetoceros socialis	Диатомовые	нанопланктон-1	щепочка с осями	
24	Chaetoceros wilfei	Диатомовые	микропланктон-2	щепочка с осями	
25	Chlamydomonas vectensis	Зеленые	нанопланктон-1	голый жгутиконосец	
26	Chromulina nebulosa	Золотистые	нанопланктон-2	голый жгутиконосец	
27	Chromulina parva	Золотистые	нанопланктон-2	голый жгутиконосец	
28	Chromulina rosanoffi	Золотистые	нанопланктон-2	голый жгутиконосец	
29	Chromulina truncata	Золотистые	нанопланктон-2	голый жгутиконосец	
30	Chroomonas salina	Криптомады	нанопланктон-2	голый жгутиконосец	

- Microsoft Access
- По планктону содержится следующая информация: год исследования, номер станции, глубина, значение концентрации, вид водоросли, размерный ряд, фото
- физические параметры водоемов: температура, соленость и мутность воды
- химические параметры: растворенный кислород, фосфаты, соединения кремния, нитриты, нитраты, аммоний, сульфат водорода, растворенный марганец и др.

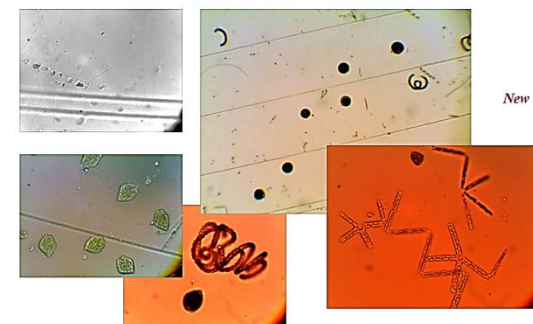
Виды, принесенные черноморскими водами



Представители Chaetoceros в Азовском море

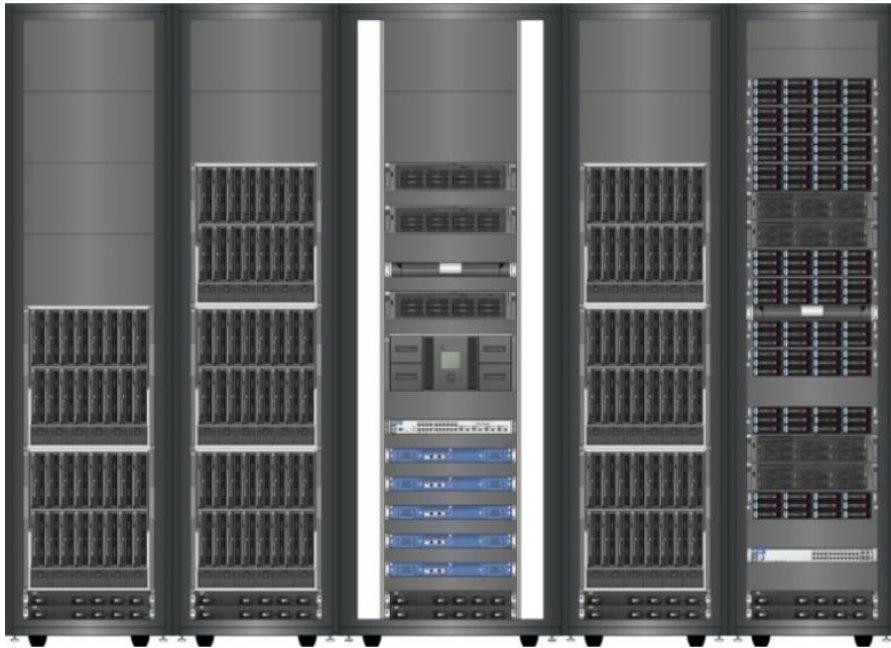


Виды с наибольшей конкурентной мощностью



Используемое оборудование

ЦЕНТР ОБРАБОТКИ ДАННЫХ



Многопроцессорная вычислительная система ЮФУ

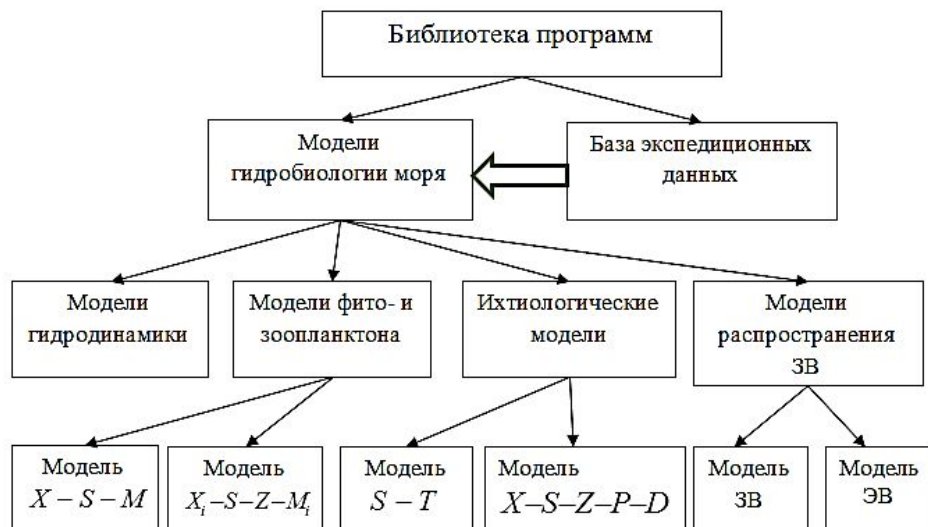
Назначение ЦОД:

- Обеспечение функционирования единого образовательного портала – «Цифрового кампуса ЮФУ».
- Поддержка Баз Данных АСУ ЮФУ.
- Высокопроизводительные вычисления.

Технические характеристики:

- Аппаратная платформа – HP BladeSystem c-class.
- Производительность - 20 Tflops.
- Система хранения данных HStorageWorks SFS на 12 Терабайт.
- Ленточная библиотека для резервного копирования данных на 50 Терабайт.
- Системное программное обеспечение XC System Software.
- Пиковая производительность многопроцессорной вычислительной системы(МВС) составляет 18.8 Tflops. В качестве вычислительных узлов используется 128 однотипных 16-ядерных Blade-серверов HP ProLiant BL685c, каждый из которых оснащен четырьмя 4-ядерными процессорами AMD Opteron 8356 2.3GHz и оперативной памятью в объеме 32ГБ.

Описание библиотеки прикладных программ

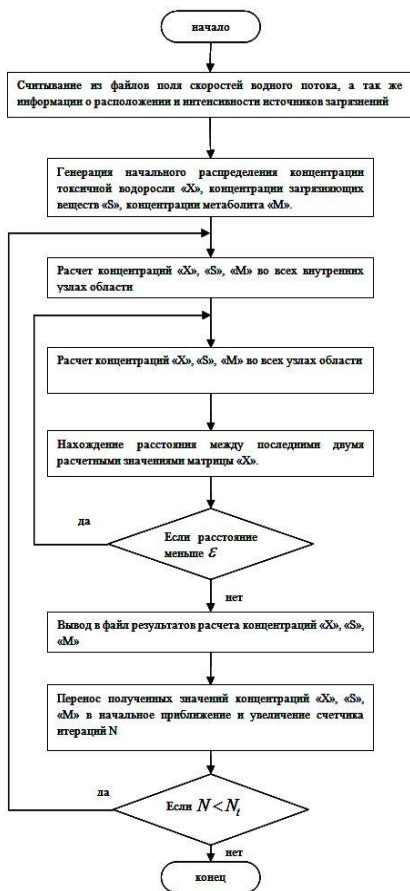


Модули библиотеки прикладных программ

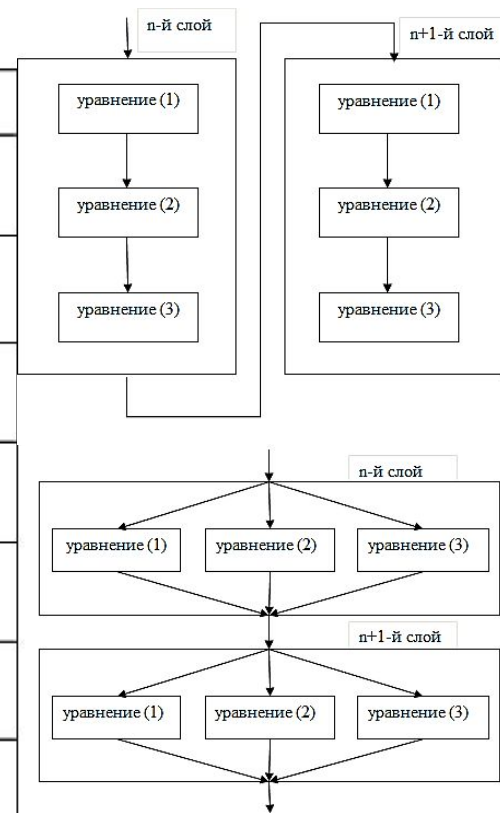
- гидродинамических процессов
- биологической продуктивности планктона
- трофодинамики промысловых популяций рыб
- загрязнения водной среды и биоты

- Библиотека программ написана на языке C++.
- OpenMP, Windows Threads для систем с общей памятью;
- MPI для систем с распределенной памятью.
- Расчет с использованием OpenMP производился на 4-х ядерном процессоре Intel Core i7-3770K 3.5GHz.
- Расчет с использованием MPI проводился на МВС ЮФУ. Пиковая производительность МВС составляет 18.8 TFlops. МВС включает в себя 8 компьютерных стоек. Вычислительное поле построено на базе инфраструктуры HP BladeSystem c-class с интегрированными коммуникационными модулями, системами электропитания и охлаждения. Имеет 128 вычислительных узлов, однотипных 16-ядерных серверов-лезвий HP ProLiant BL685c, оснащенных четырьмя 4-х ядерными процессорами AMD Opteron 8356 2.3GHz и оперативной памятью в объеме 32ГБ. Общее количество вычислительных ядер в комплексе – 2048, суммарный объем оперативной памяти – 4 ТБ. Для управления МВС используется 3 управляющих сервера HP ProLiant DL385G5. Для задач резервного копирования используется библиотека MSL4048.
- Для визуализации результатов использовалась библиотека OpenGL с применением текстуры для отображения полигонов.
- Физические размеры расчетной области: площадь поверхности 37605 км², длина 343 км, ширина 231 км.
- Поставленные гидробиологические задачи решались на последовательно сгущающихся прямоугольных равномерных сетках: 116x75x14, 351x251x46 и т. д. узлов.

Алгоритмы решения задачи динамики вредоносной водоросли



Шаг τ	Матрица	ММН	ММП	МСС (по невязке)	МСС (по поправке)
1.1	X	65	32	68	42
	S	67	30	69	49
	M	65	44	67	51
1.2	X	67	34	70	47
	S	82	40	85	61
	M	73	48	74	68
1.3	X	48	20	46	26
	S	46	20	47	31
	M	45	21	47	31
1.4	X	38	16	37	22
	S	38	15	40	21
	M	32	12	33	18
2.1	X	63	30	65	40
	S	67	33	68	53
	M	64	43	67	61
2.2	X	65	32	67	45
	S	77	41	77	61
	M	72	47	73	67
2.3	X	45	18	43	26
	S	46	19	48	31
	M	43	19	42	30
2.4	X	33	13	32	20
	S	33	12	32	19
	M	27	10	27	17

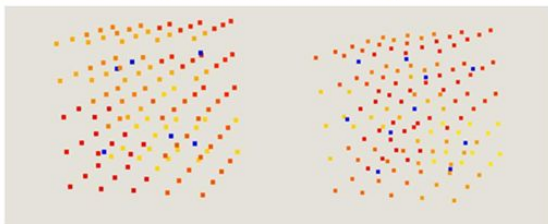
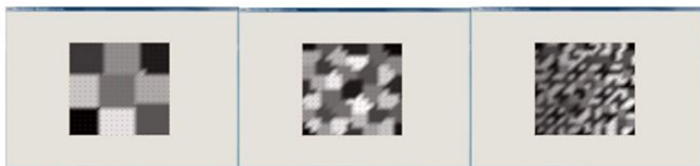


n – номер временного слоя

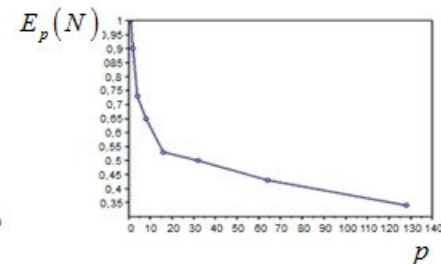
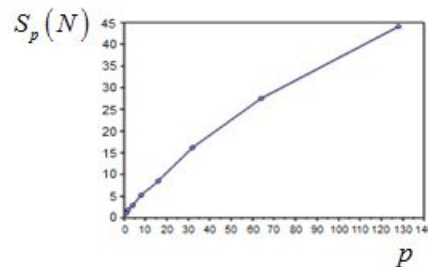
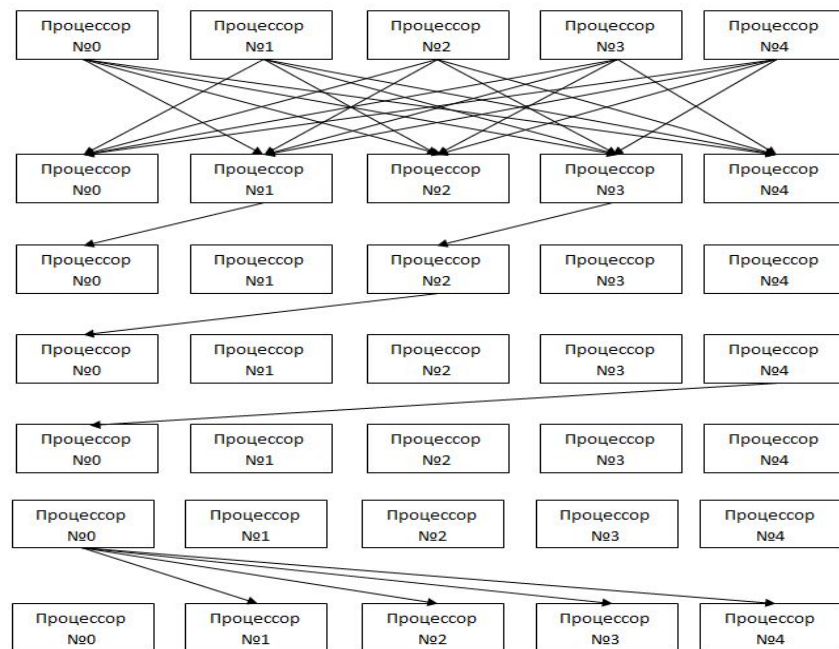
Пример параллельной реализации алгоритма решения задачи динамики вредоносной водоросли. Оценка ускорения и эффективности параллельного алгоритма

- 1) Каждый процессор считает часть вектора поправки.
- 2) Каждый процессор передает всем процессорам в своей группе ту часть вектора поправки, которую содержит.
- 3) При вычислении числителя и знаменателя в формуле для ММП $\tau_{k+1} = \frac{(A\omega_k, \omega_k)}{(B^{-1}A\omega_k, A\omega_k)}$, $k=0,1, \dots$ получается сумма произведений. При вычислении общей суммы используется метод сдвигания.
- 4) На 0-м процессоре мы получаем значение итерационного параметра и передаем его остальным процессорам в группе.
- 5) Каждый процессор находит новое приближение по формуле

$$y_{k+1} = y_k - \tau_{k+1}\omega_k, \quad k=0,1, \dots$$



Результат работы алгоритма k-means для разбиения модельной двумерной области на 9, 38, 150 подобластей; для трехмерной на 6 и 10.

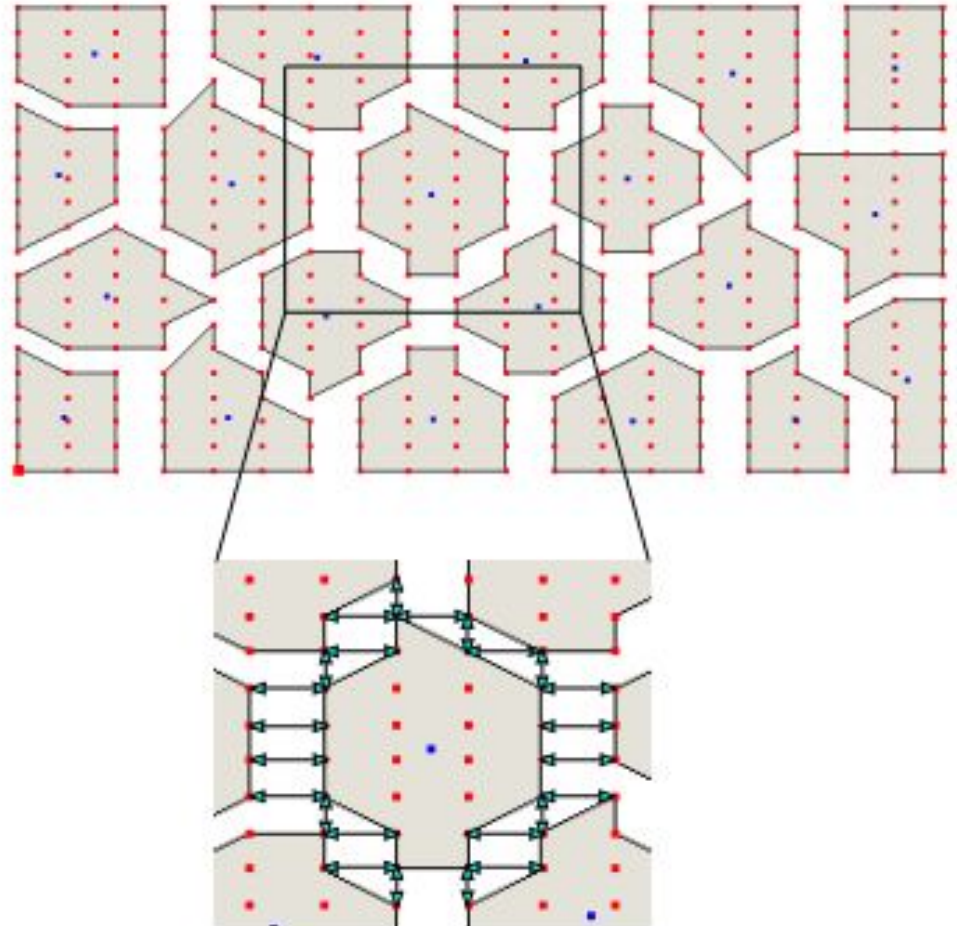


$S_p(N)$ – ускорение, $E_p(N)$ – эффективность, N – размер входных данных
 p – число процессоров

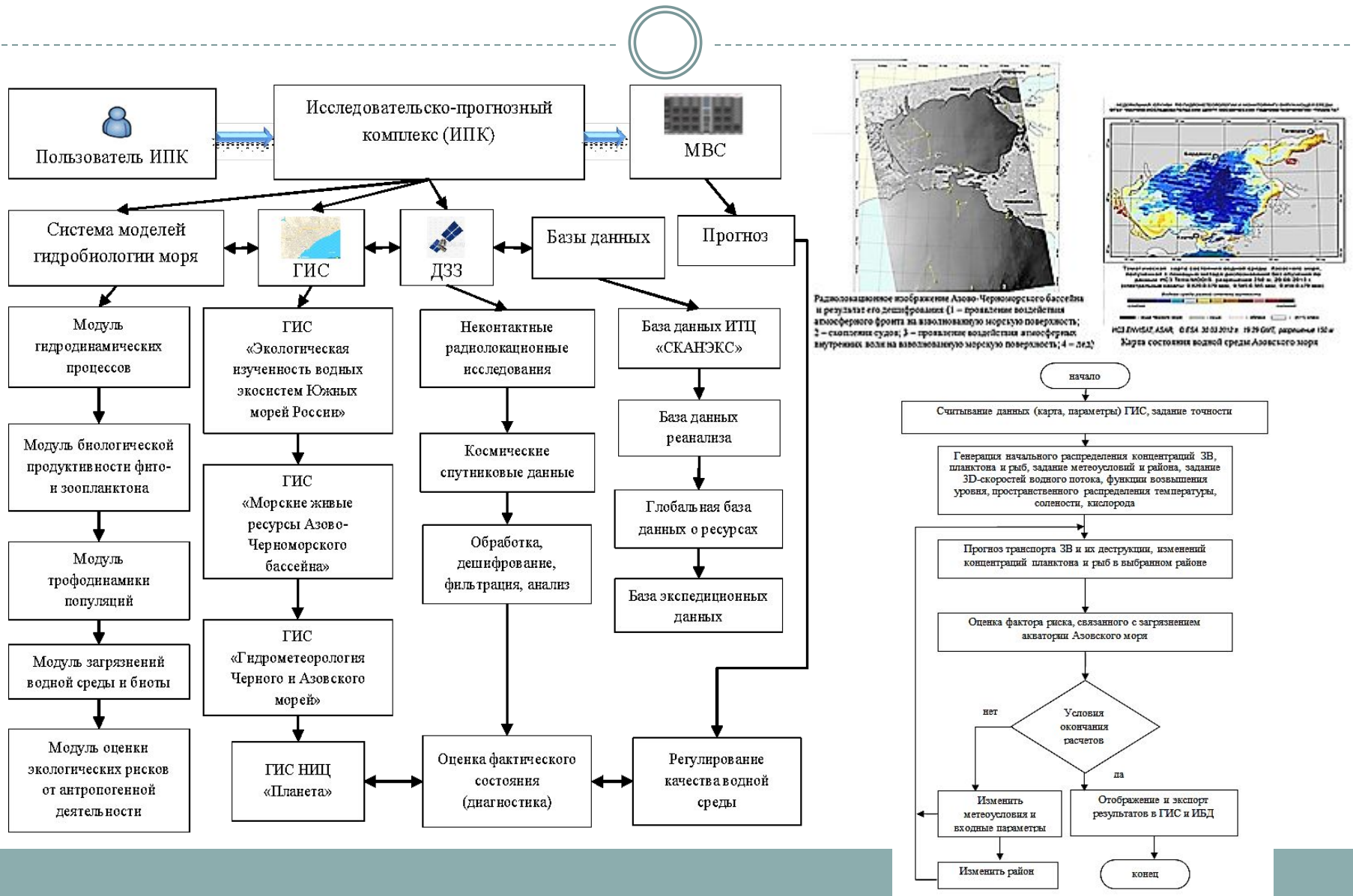
Пример декомпозиции расчетной области. Алгоритм пересылки данных между подобластями



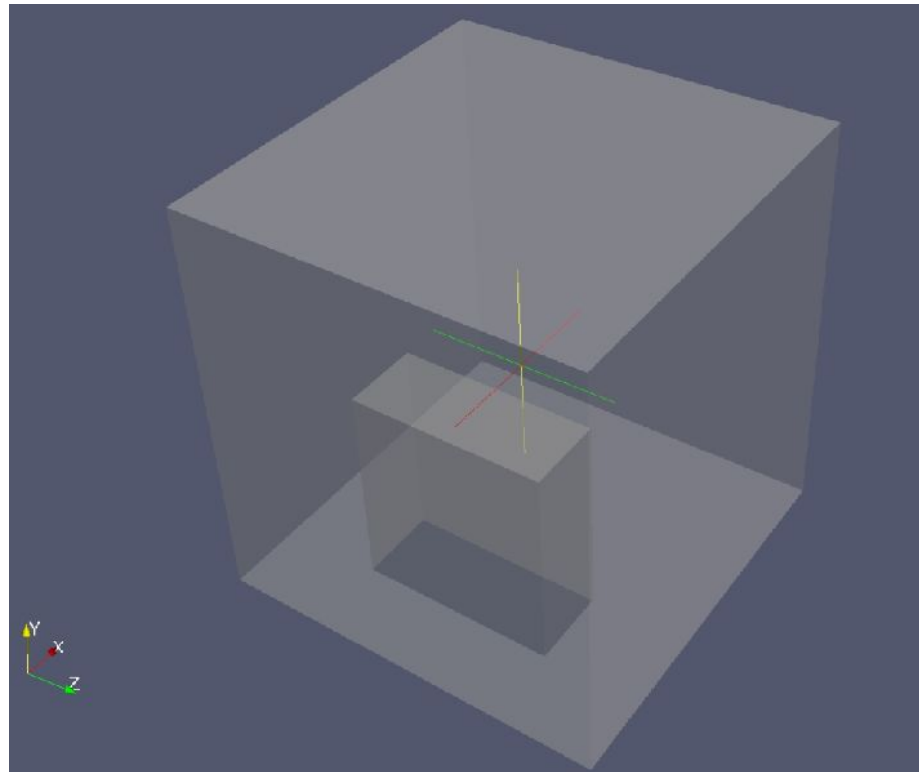
- Для организации обмена данными в вычислительном процессе требуется найти все точки, лежащие на границе каждой подобласти. Для этой цели использовался алгоритм Джарвиса (задача построения выпуклой оболочки).
- Был сформирован список соседних подобластей для каждой подобласти и разработан алгоритм пересылки данных между подобластями.
- Результат работы метода k-means для модельной двумерной области (стрелками указаны обмены между подобластями)



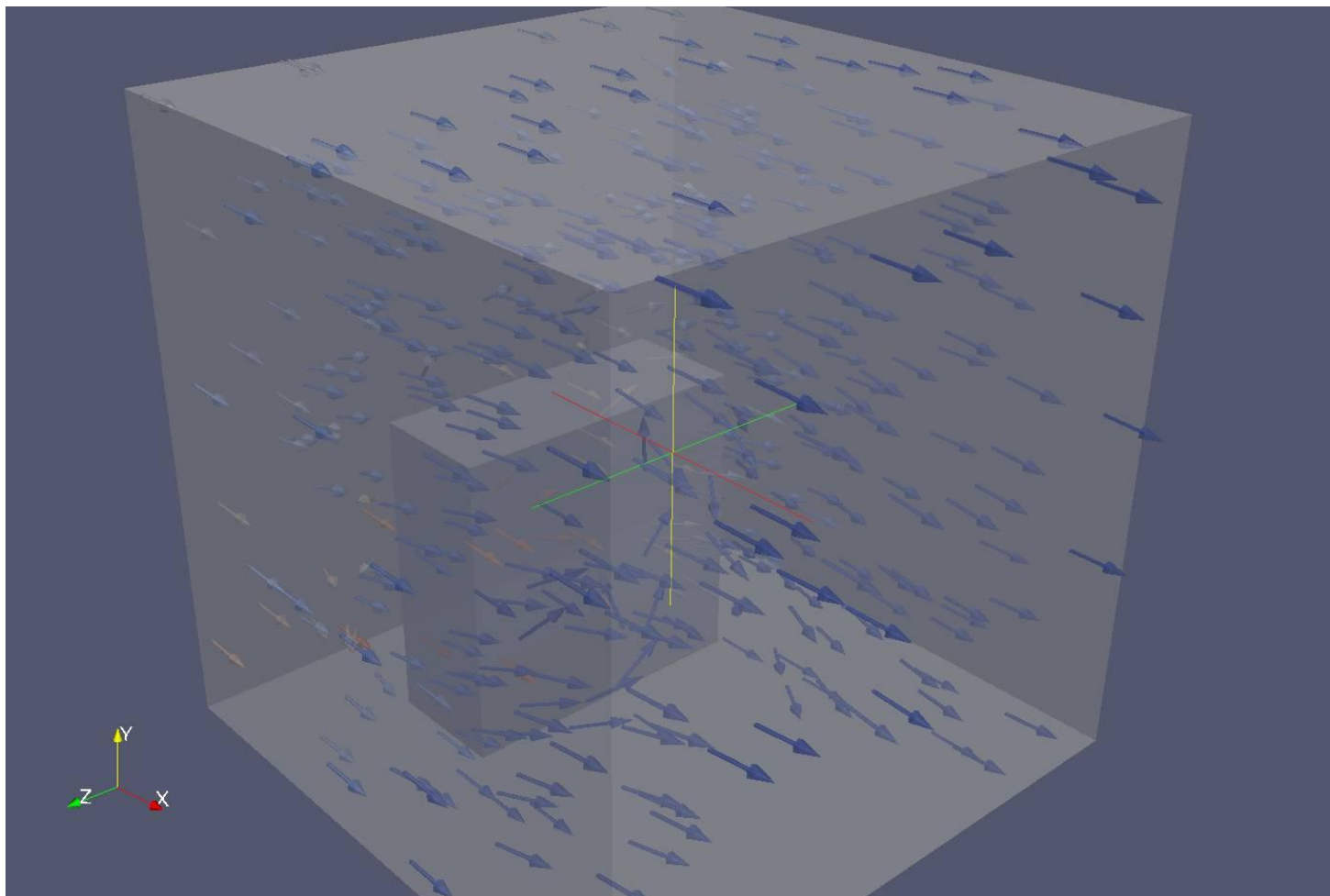
Исследовательско-прогнозный комплекс экосистемы Азовского моря



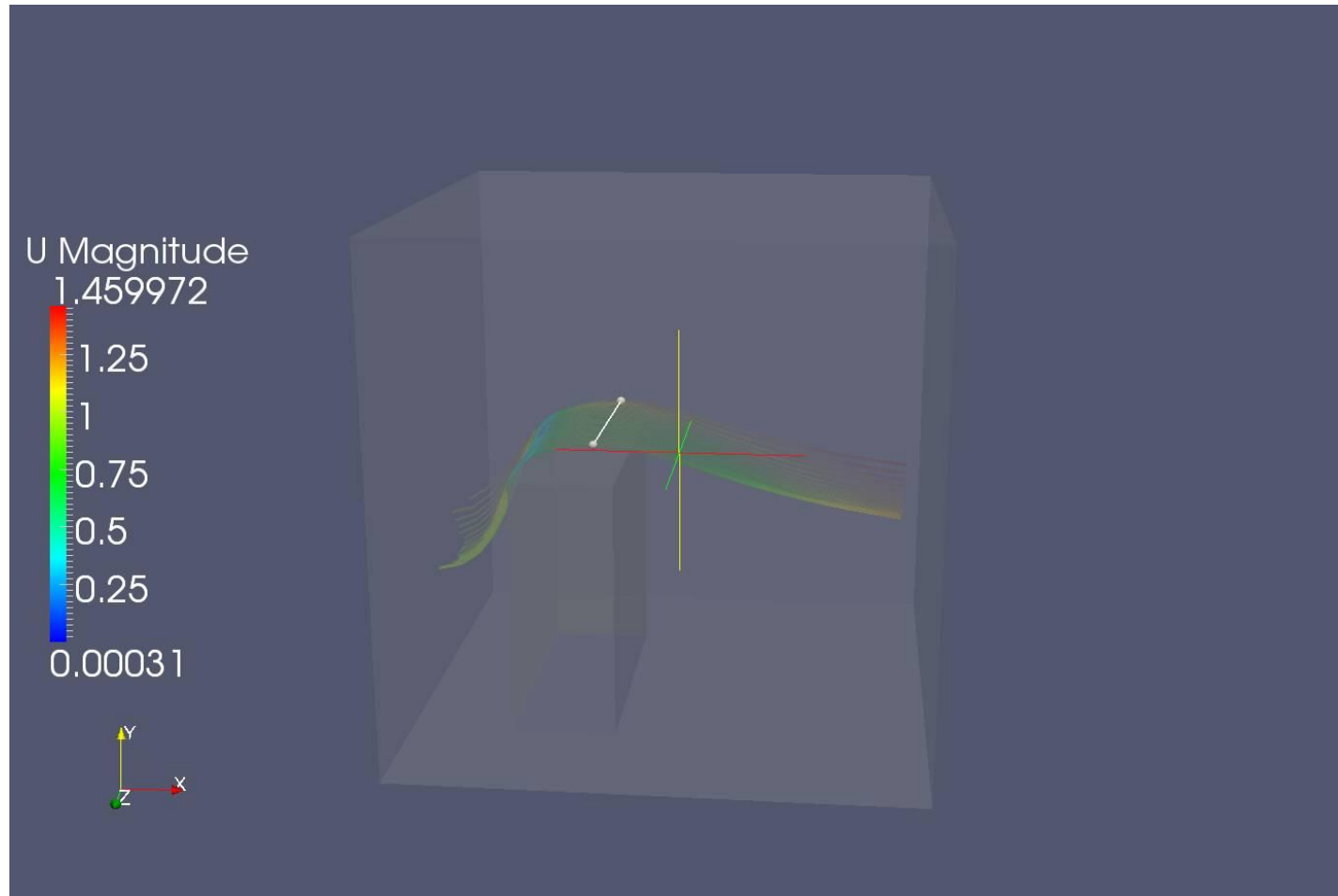
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM



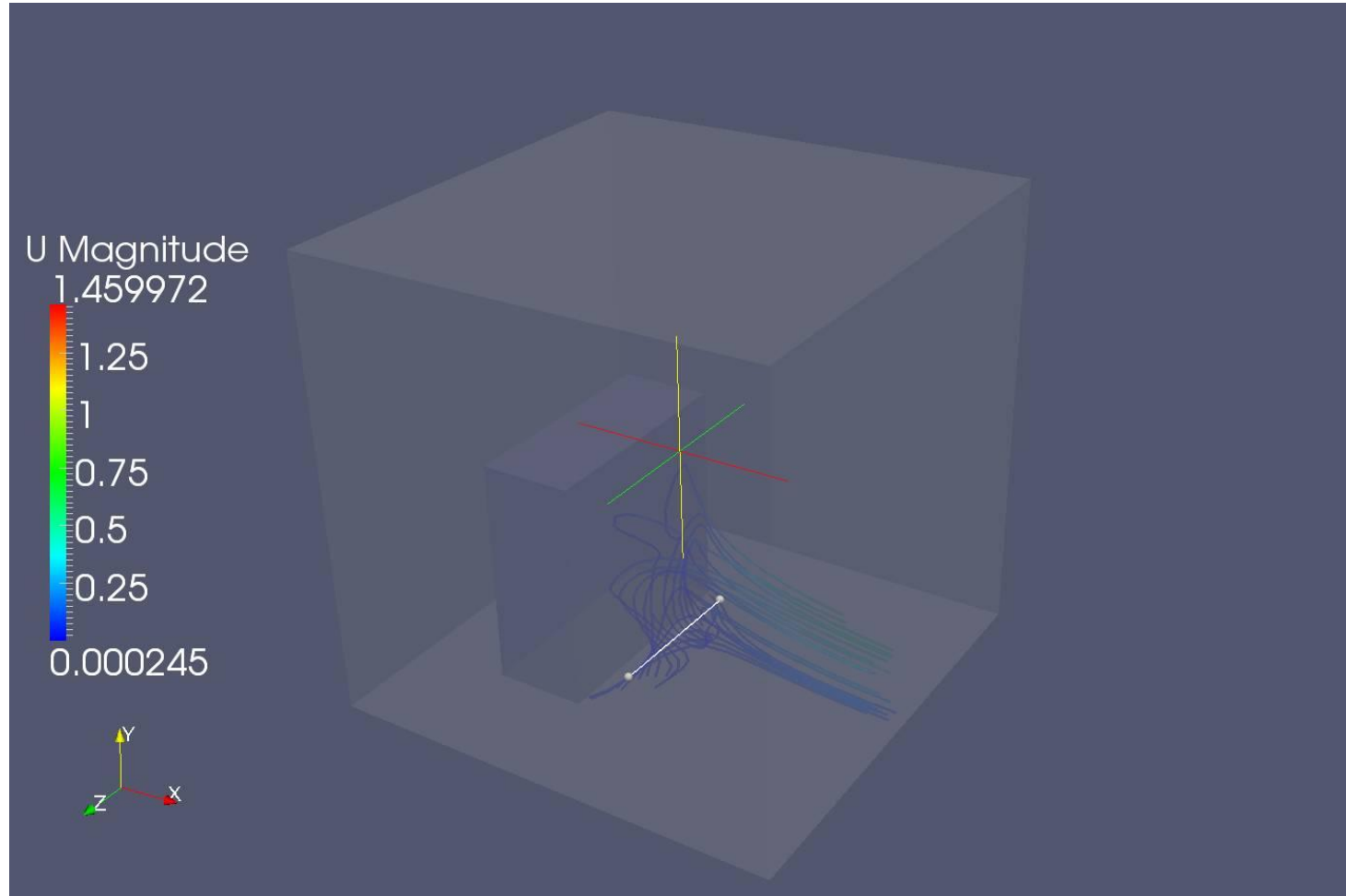
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM



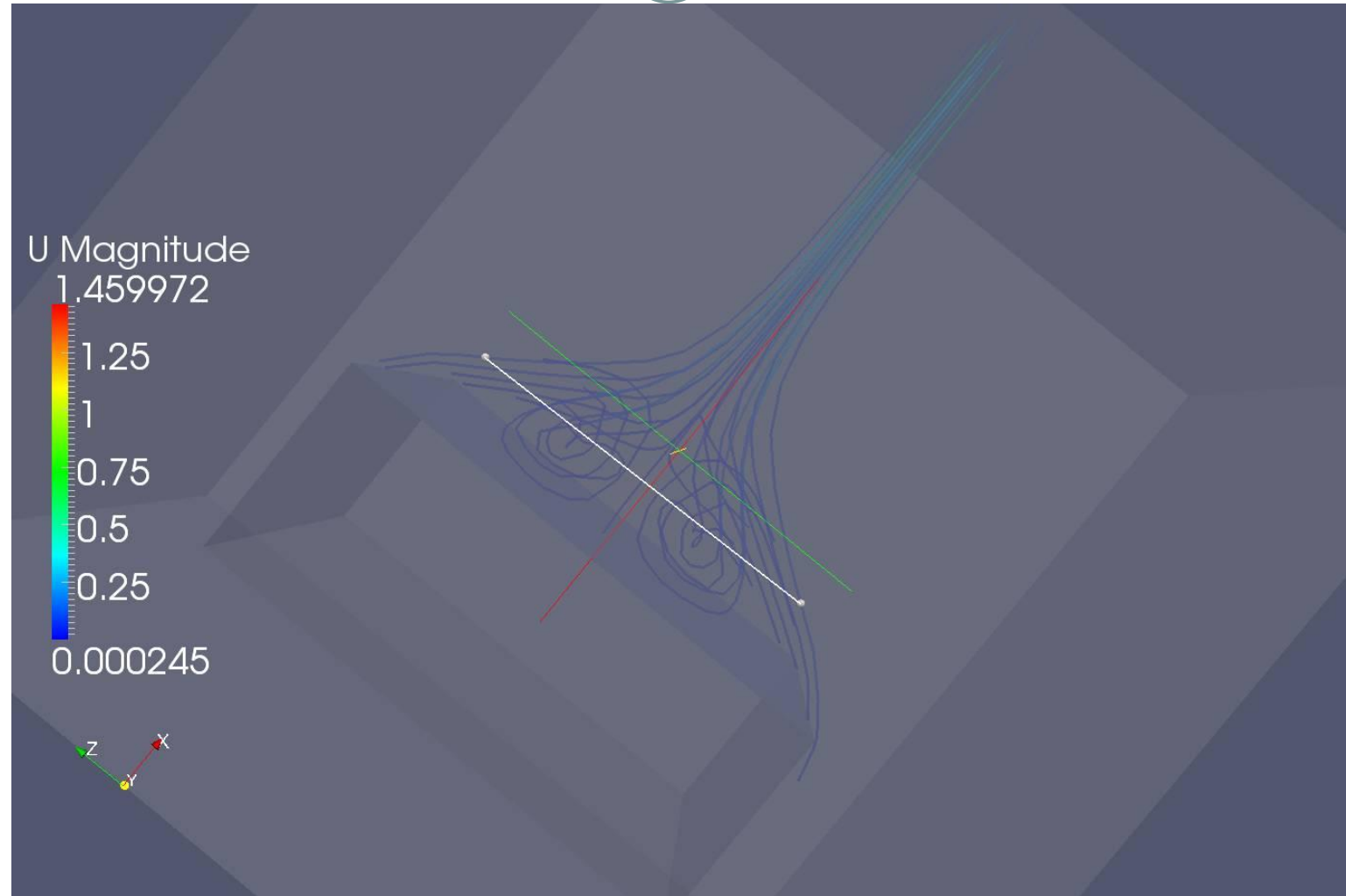
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM



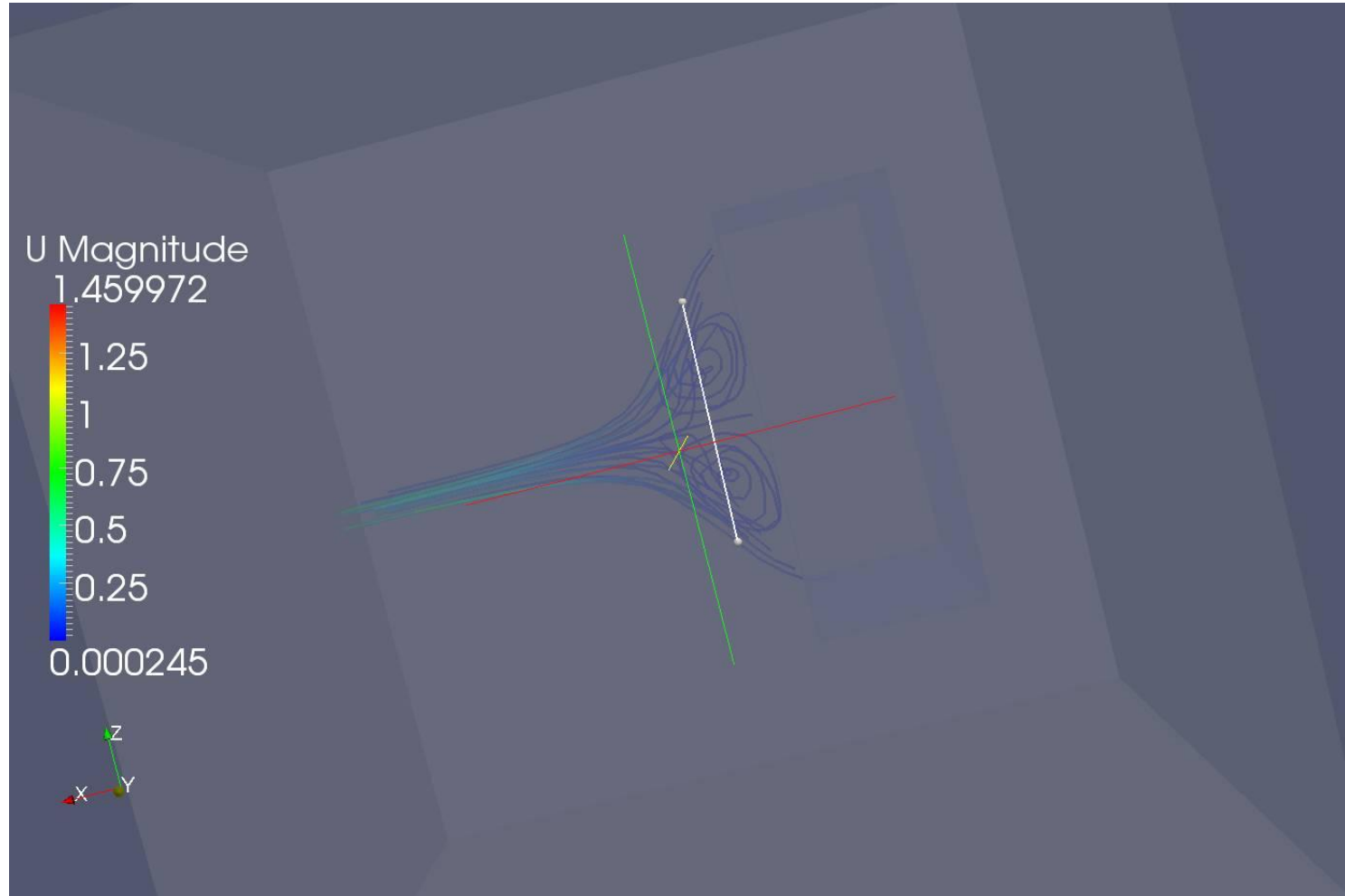
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM



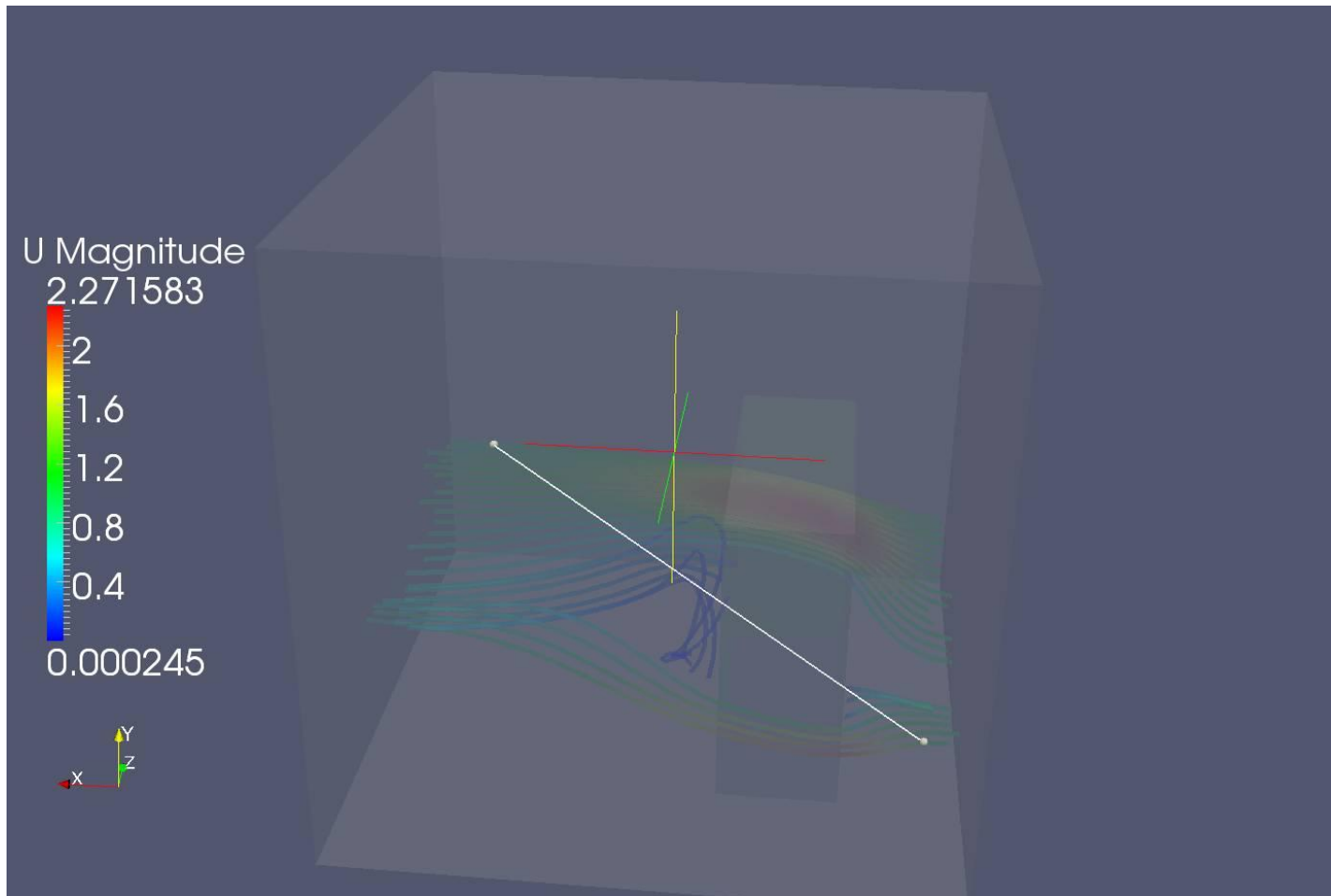
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM



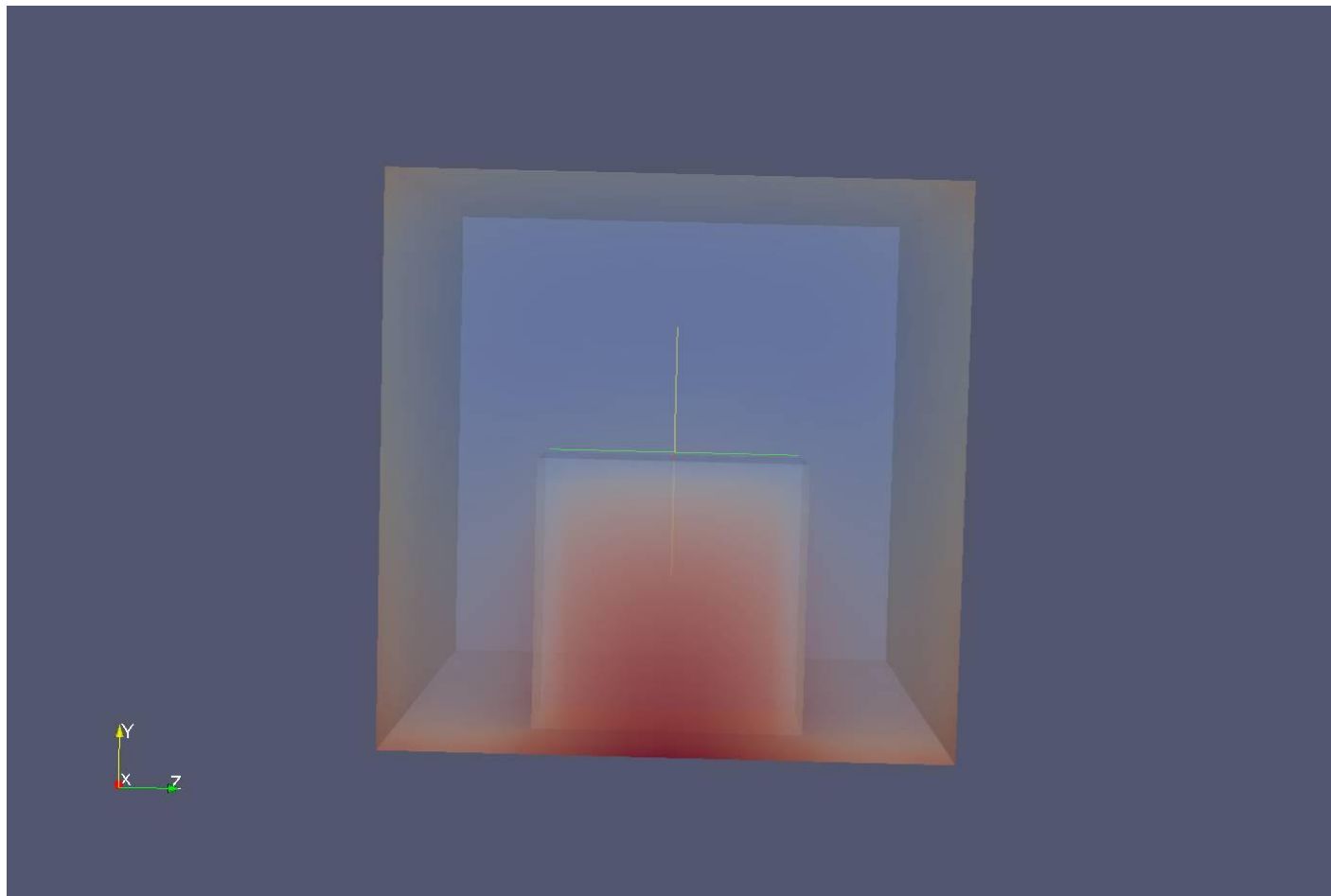
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM



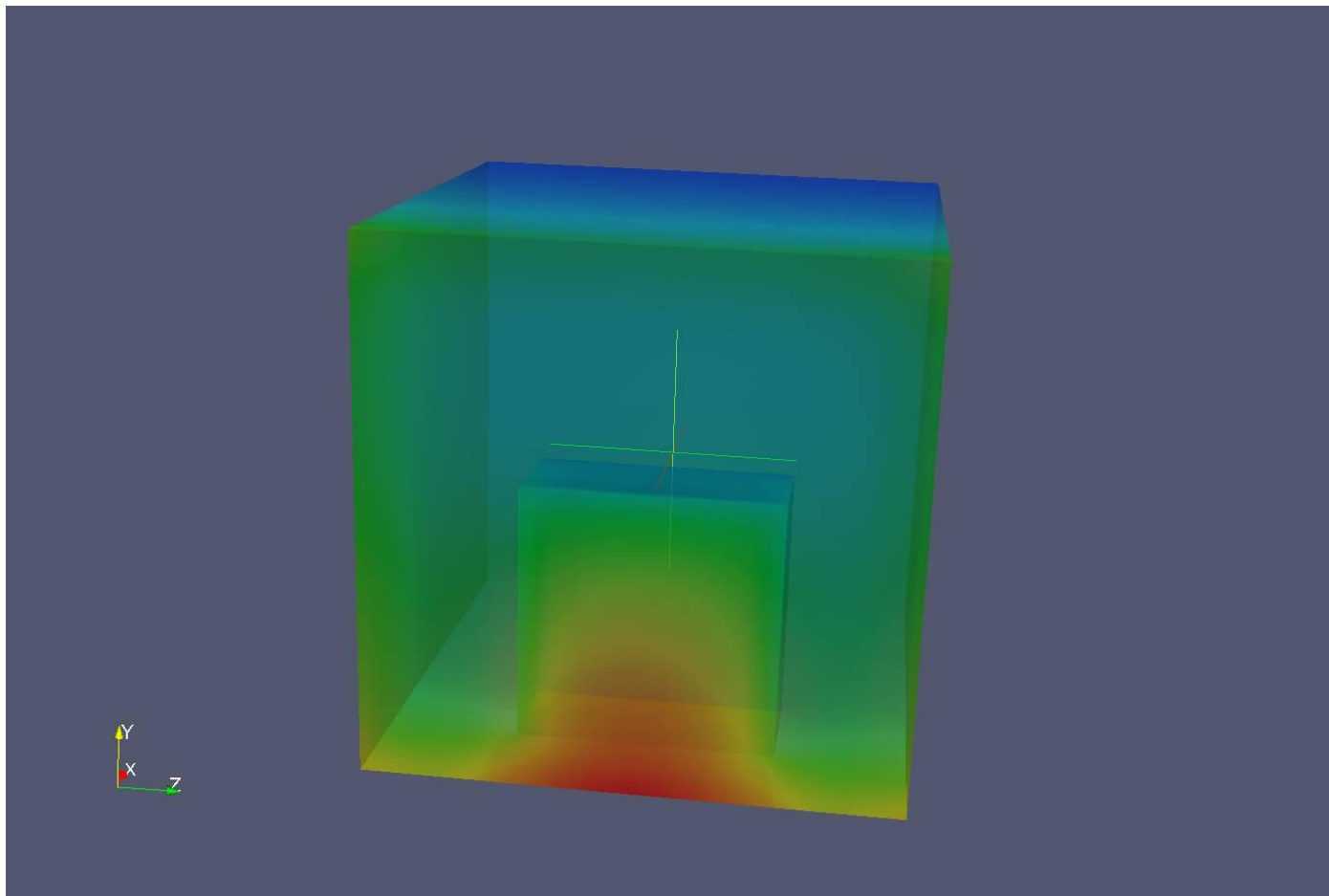
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM



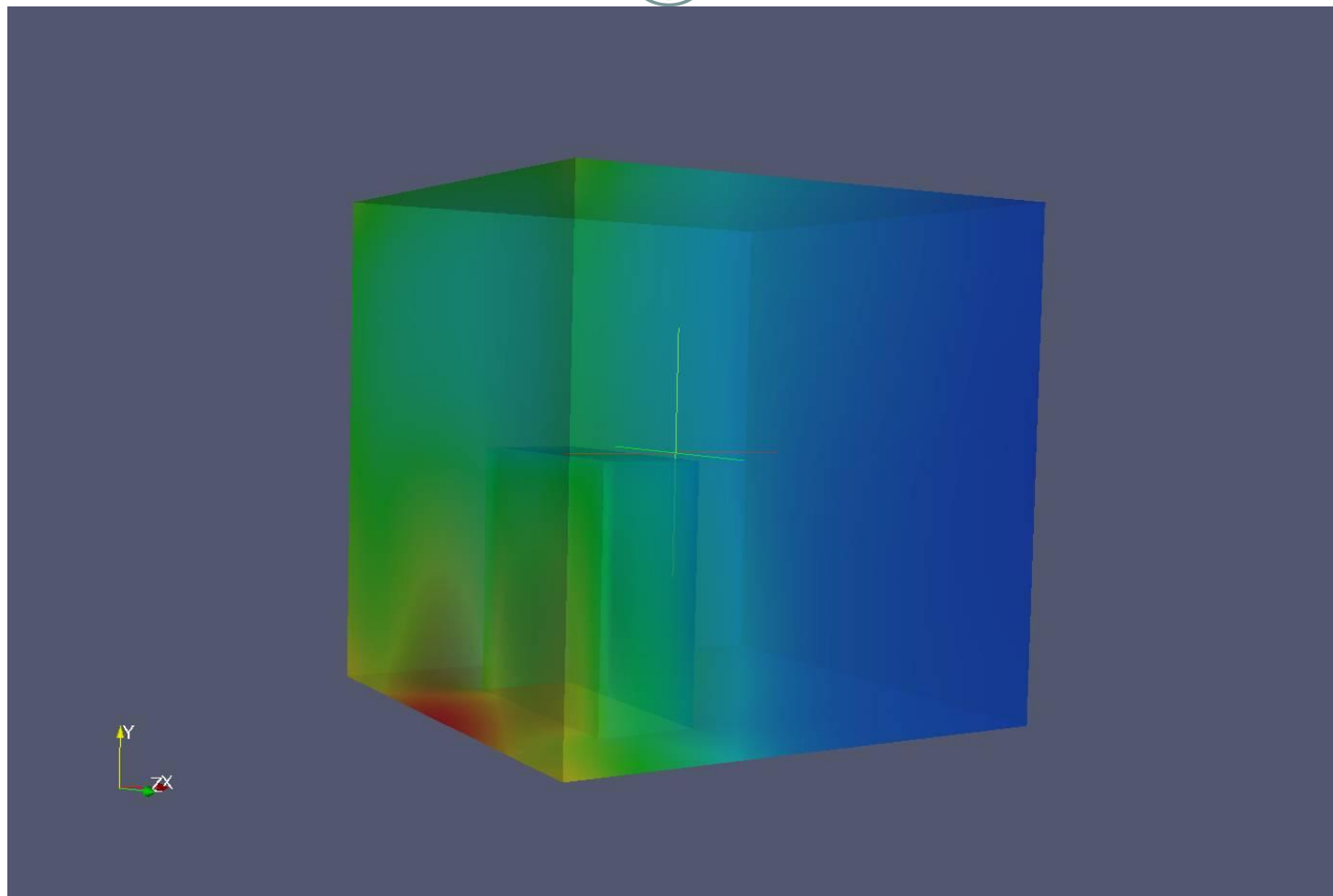
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM



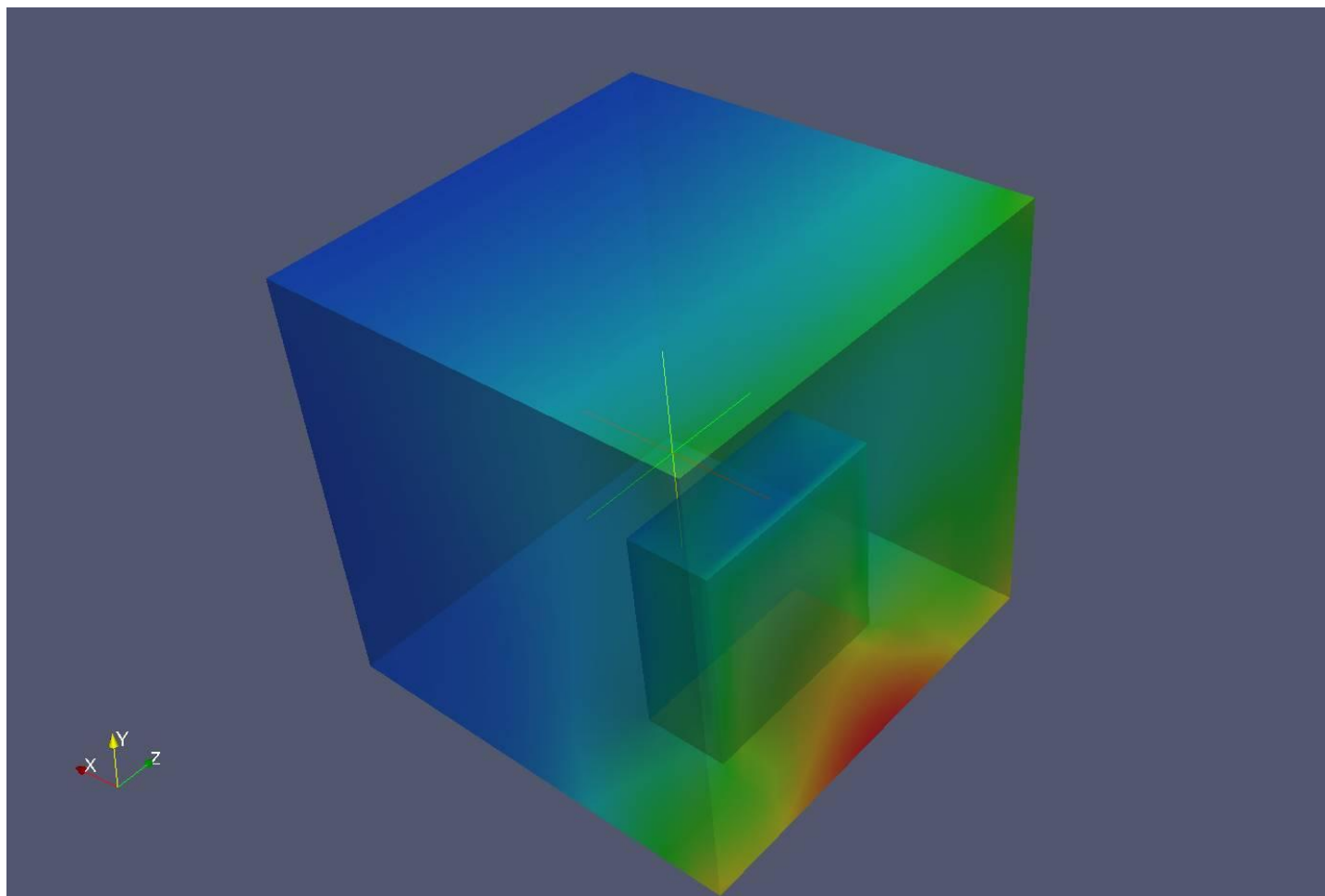
Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM

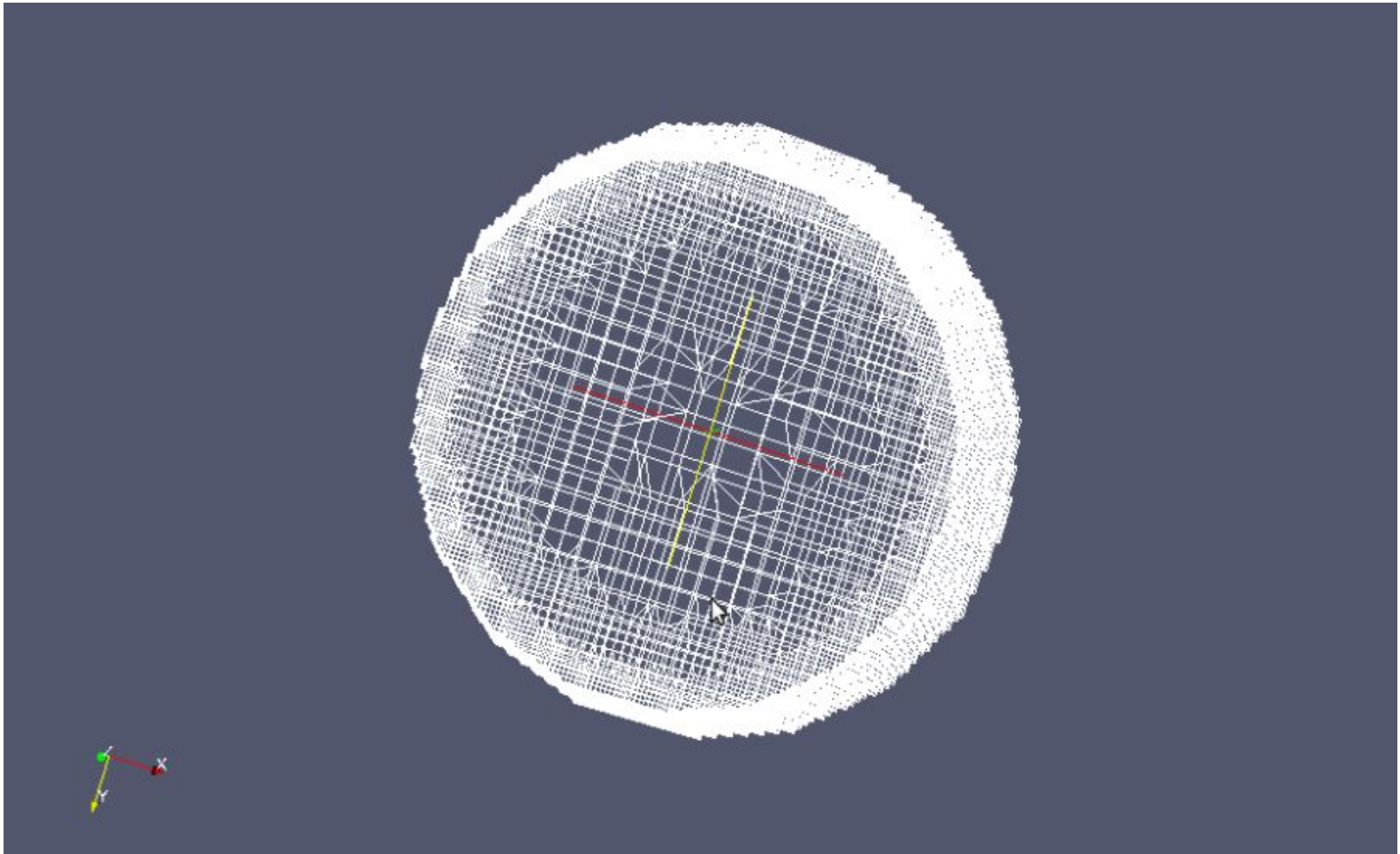


Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM

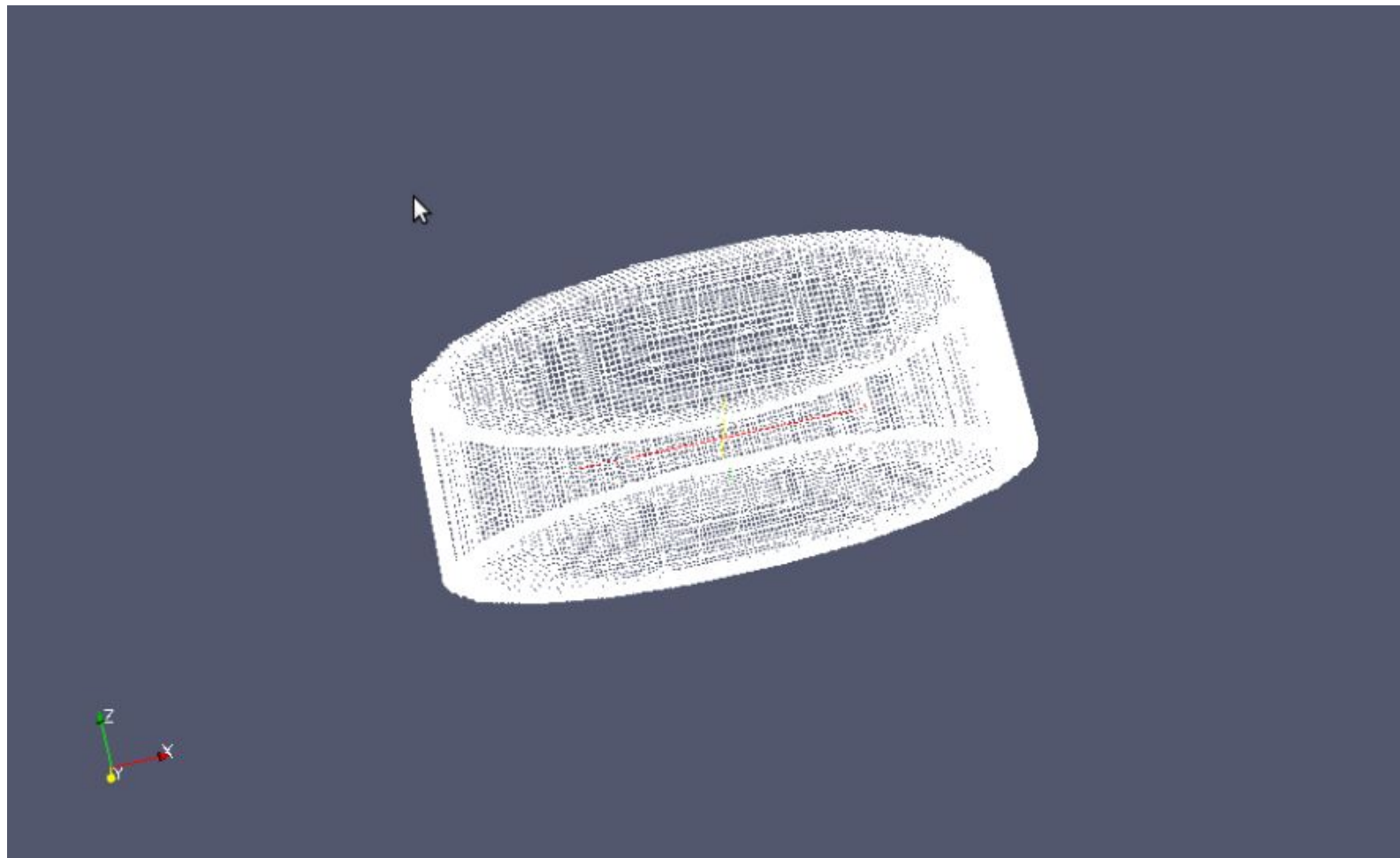


Моделирование распространения загрязнений в Азовском море с помощью пакета OpenFOAM

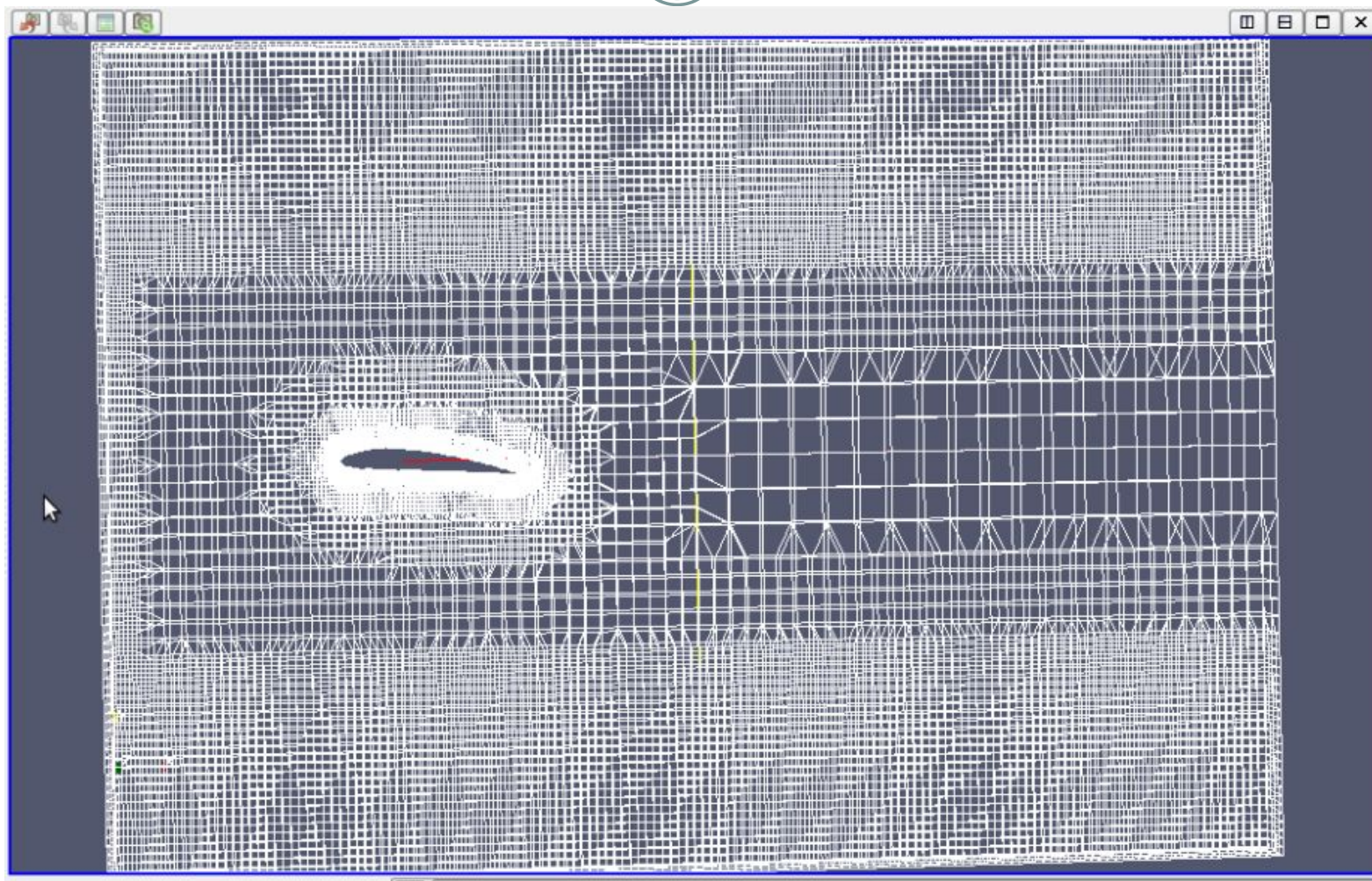




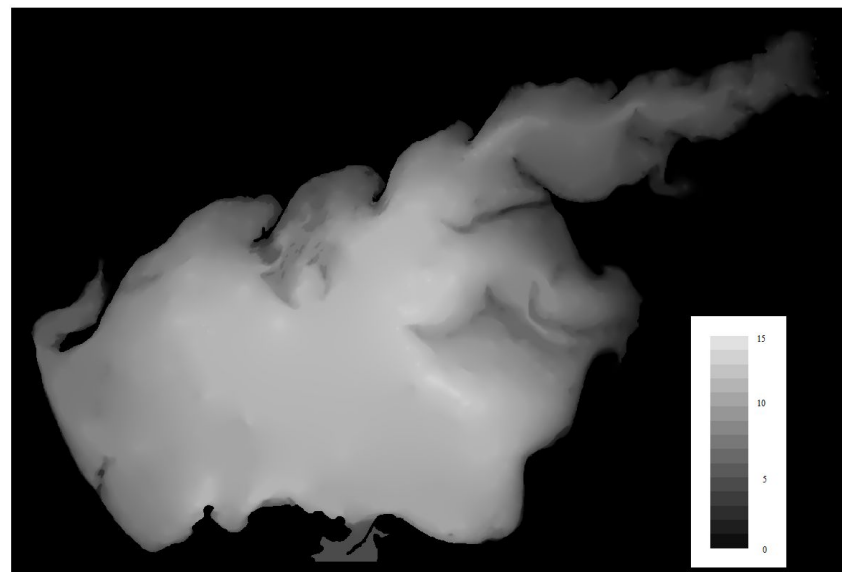
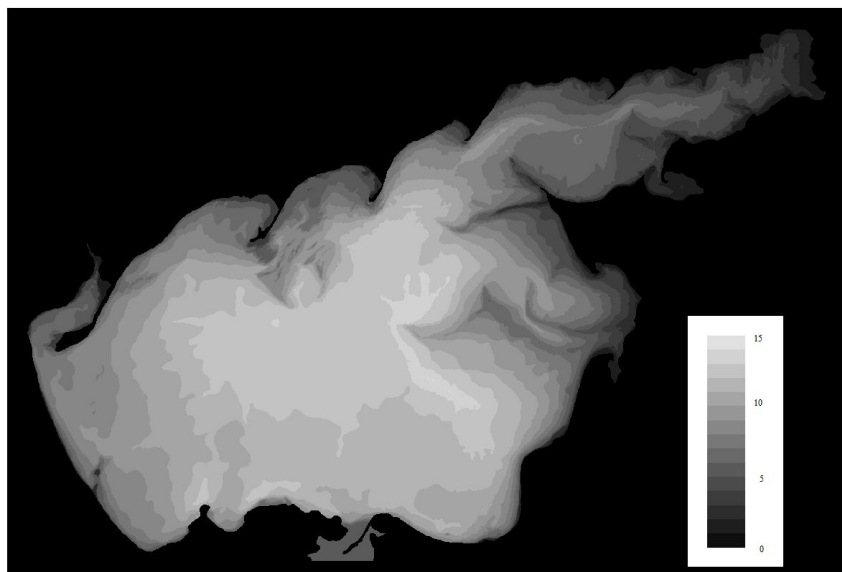
Моделирование с помощью пакета OpenFOAM



Моделирование с помощью пакета OpenFOAM



Результаты восстановления донной поверхности мелководного водоема



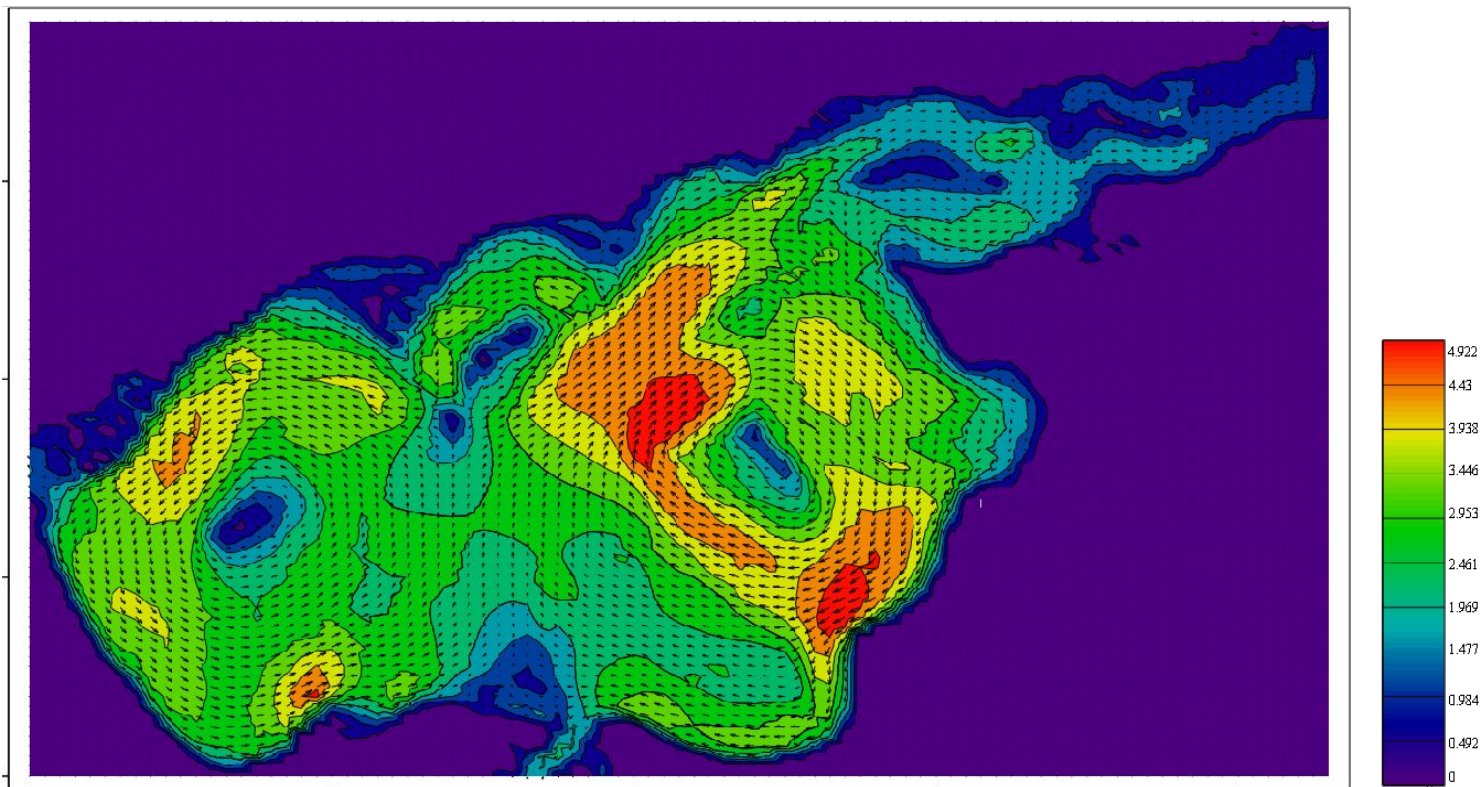
Исходное изображение рельефа дна Азовского моря Восстановленная поверхность дна Азовского моря

Предложенный алгоритм обладает достаточной степенью гладкости в точках склейки функций и обладает меньшими выбросами по сравнению с кубической функцией, использованной в расчетах.

Результаты численного эксперимента



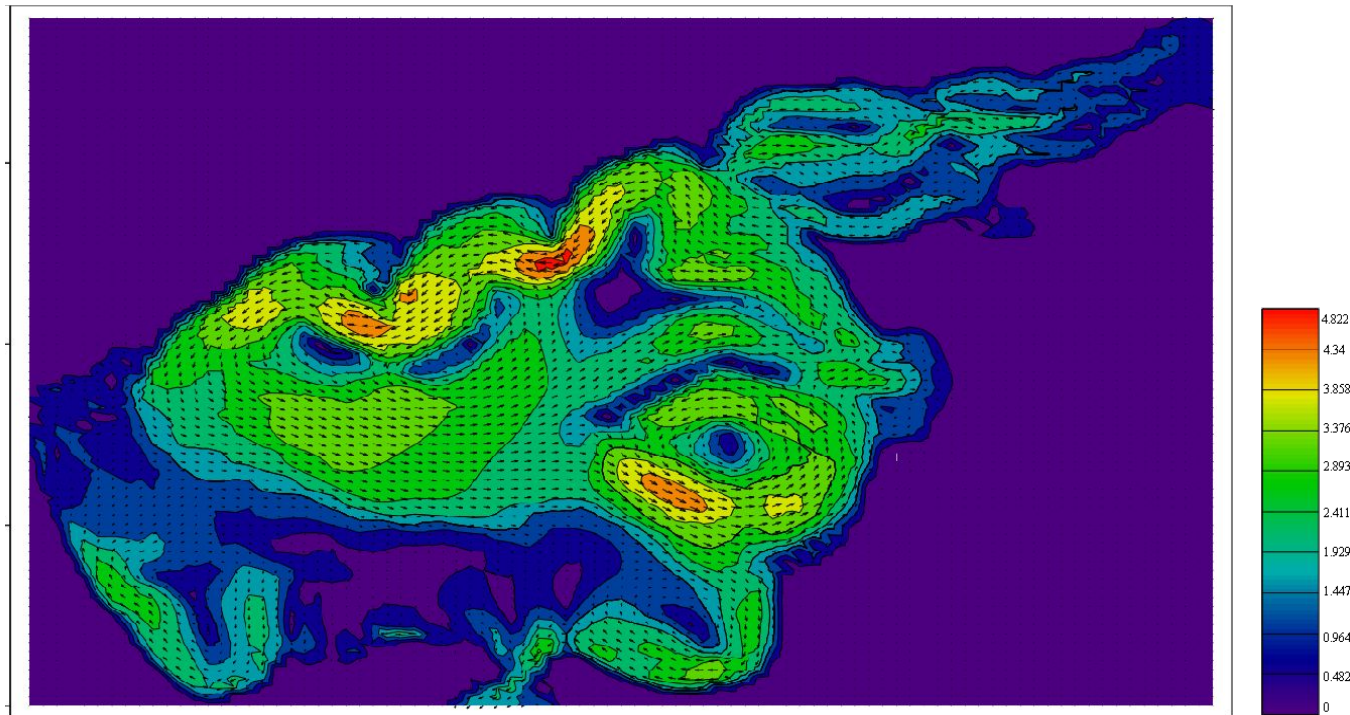
Поле вектора скорости движения водной среды при восточном ветре 5 м/с
(баротропные течения)



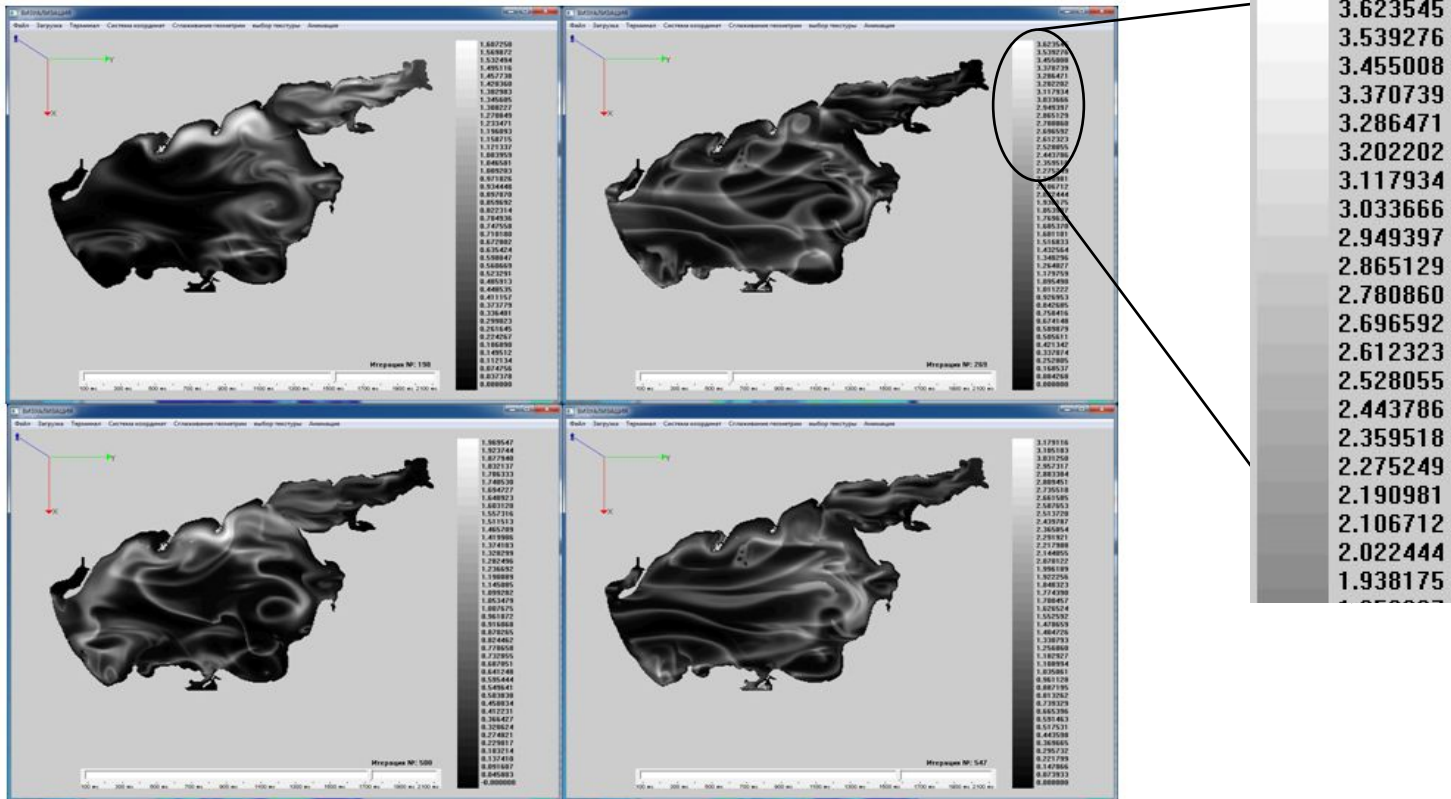
Результаты численного эксперимента



Поле вектора скорости движения водной среды при северном ветре 5 м/с
(баротропные течения)



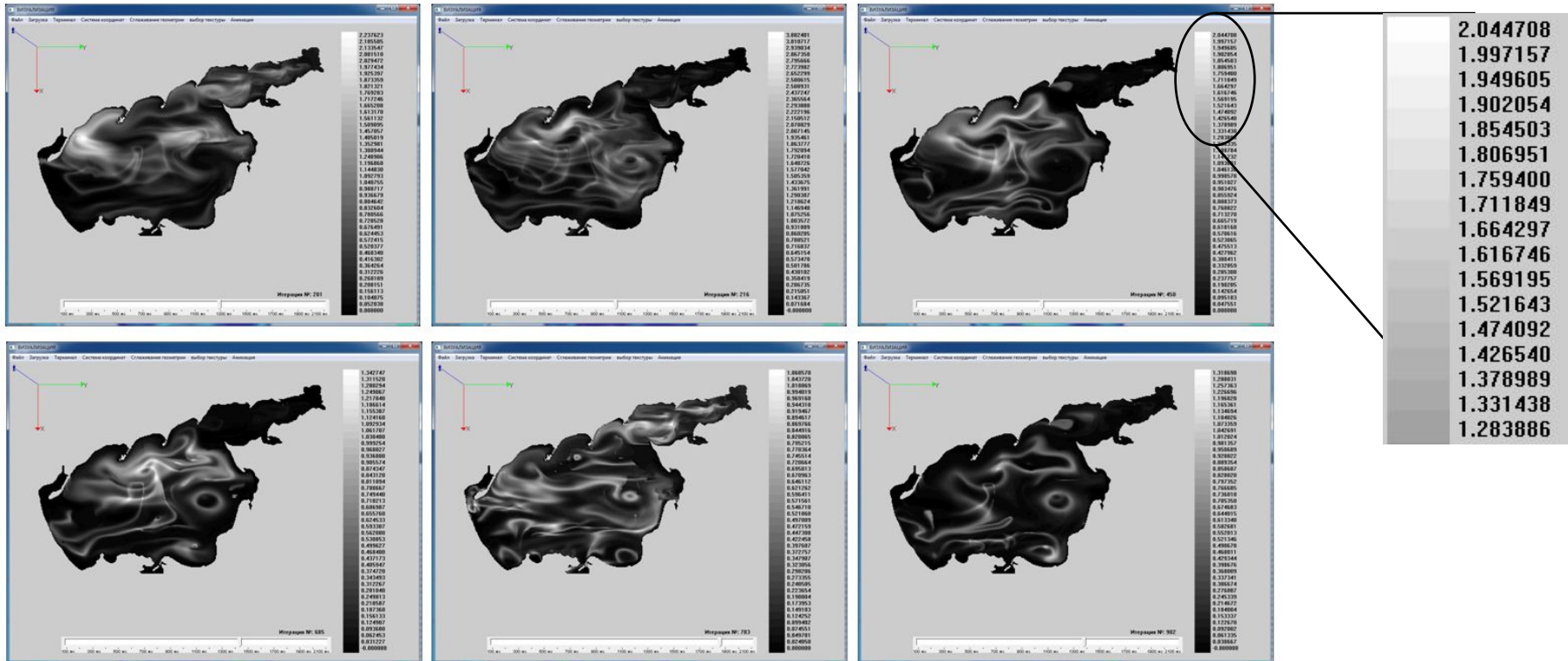
Результаты численного моделирования для задачи динамики вредоносного фитопланктона



Изменение концентрации вредоносной водоросли в различные моменты времени (N=198, N=269, N=500, N=547). Начальное распределение полей течений в Азовском море для западного ветра. При моделировании учитывался период вегетации диатомовой водоросли *Scletonema costatum*: май – сентябрь.

$$\mu_X = 5 \cdot 10^{-9}; \nu_X = 10^{-9}; \alpha_0 = 0,0833; \gamma = 0,0416; \delta = 0,5; \varepsilon_1 = 1; \mu_M = 5 \cdot 10^{-11}; \nu_M = 10^{-11}; k_M = 0,006; \varepsilon = 0,5; \tau_\varphi = 0,1; \varphi \in \{X, S, M\}$$

Результаты численного моделирования для задачи динамики вредоносного фитопланктона

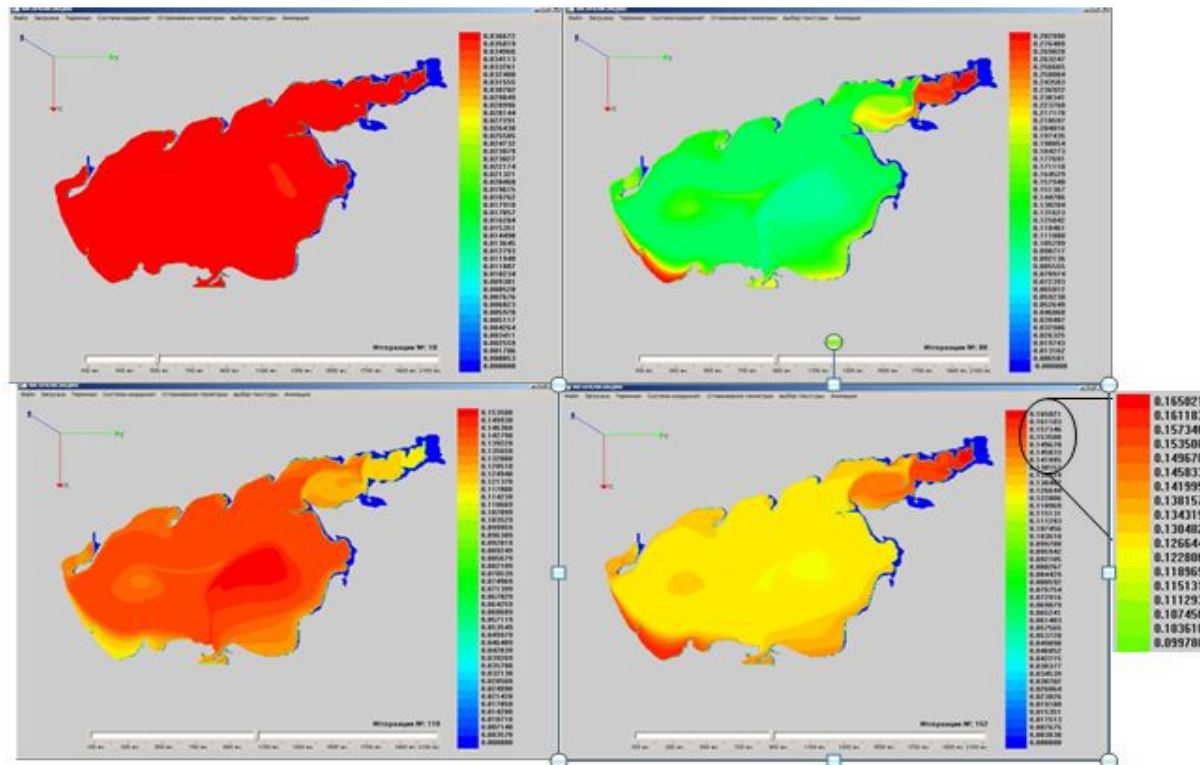


Изменение концентрации вредоносной водоросли в различные моменты времени ($N=201$, $N=216$, $N=450$, $N=685$, $N=793$, $N=902$). Начальное распределение полей течений в Азовском море для восточного ветра

$$\tau_X = 0,1; \mu_X = 5 \cdot 10^{-9}; \nu_X = 10^{-9}; \alpha_0 = 0,0833; \gamma = 0,0416; \delta = 0,5; \varepsilon_1 = 1;$$

$$\mu_M = 5 \cdot 10^{-11}; \nu_M = 10^{-11}; k_M = 0,006; \tau_\varphi = 0,1; \varphi \in \{X, S, M\}; \varepsilon = 0,5; \varepsilon_3 = 0,7$$

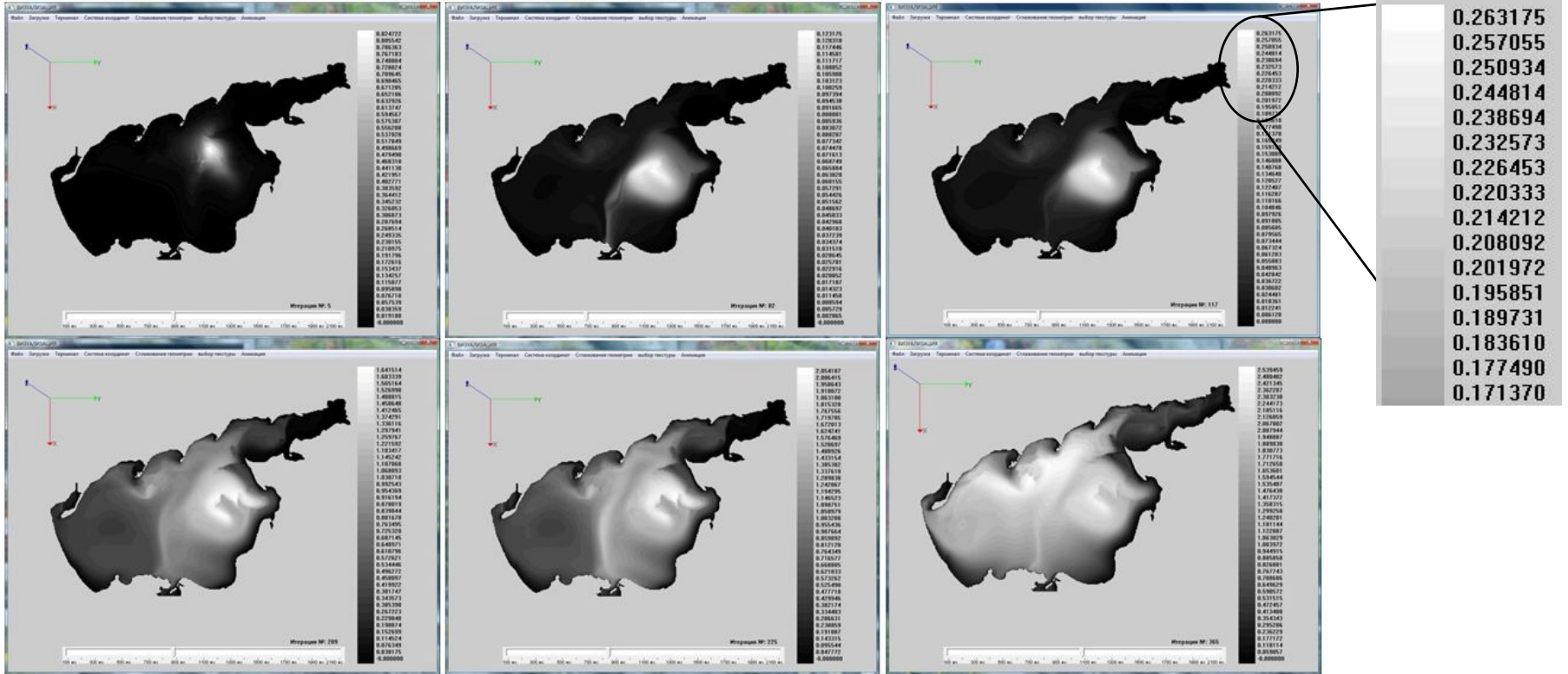
Результаты численного моделирования для задачи динамики вредоносного фитопланктона



Изменение концентрации загрязняющего вещества. Начальное распределение полей течений в Азовском море для северного ветра

$$\mu_s = 5 \cdot 10^{-10}; \nu_s = 10^{-10}; B = 0,001; S_p = 1; f = 3; \tau_\varphi = 0,1; \varphi \in \{X, S, M\}; \varepsilon_2 = 0,8$$

Результаты численного моделирования для задачи взаимодействия фито- и зоопланктона

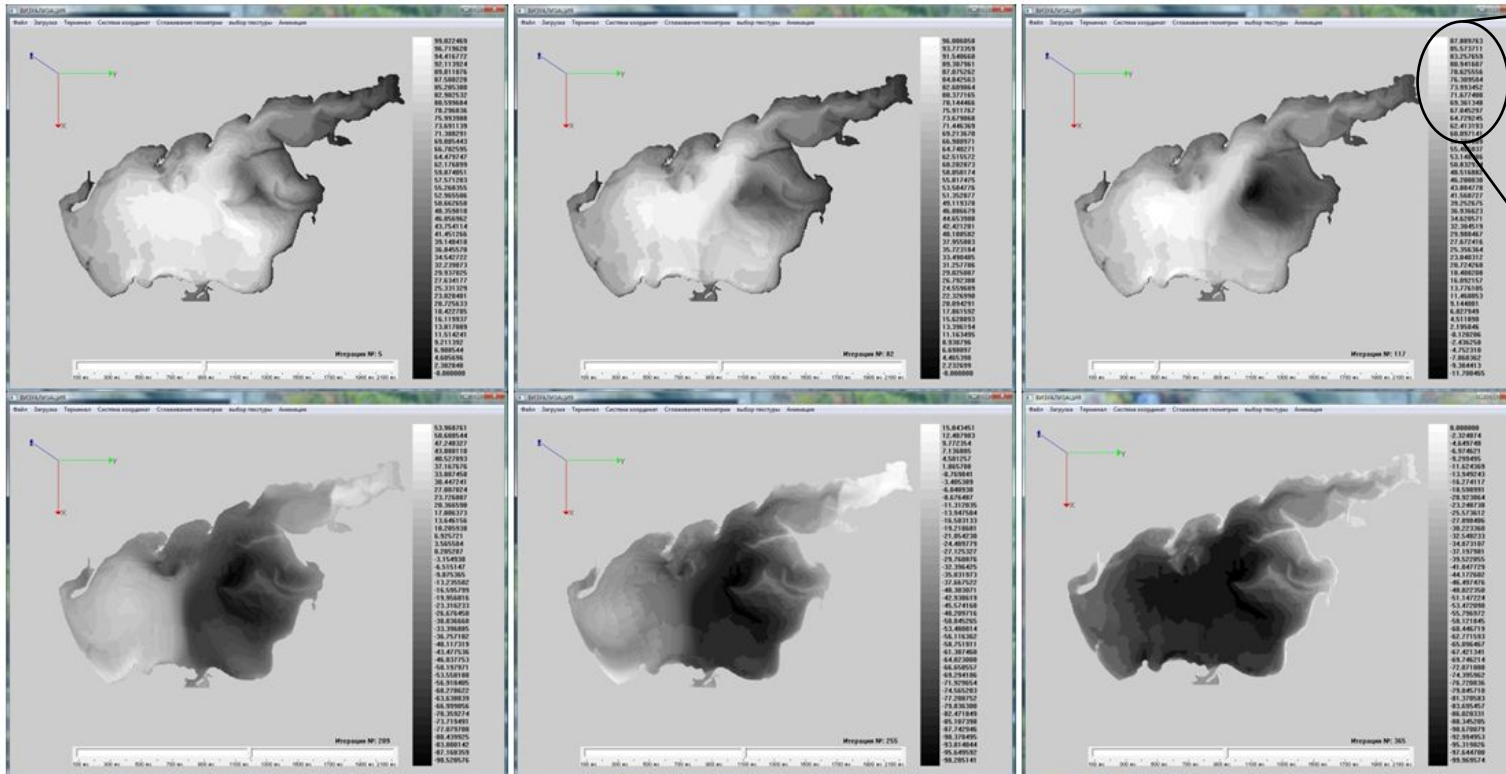


Динамика изменения концентрации зеленой водоросли для временных интервалов $T=2, 27, 39, 70, 85, 122$ дней (после начала вегетационного периода фитопланктона (март – сентябрь)).

Начальное распределение полей течений в Азовском море для северного ветра

$$\tau_1 = 0,3; \mu_1 = 5 \cdot 10^{-7}; \nu_1 = 10^{-7}; \alpha_{01} = 0,1; \delta_1 = 0,5; \gamma_1 = 0,0416; \varepsilon_1 = 0,0116; \delta_1 = 0,5; \theta_1 = 0,3; \xi_1 = 0,5$$

Результаты численного моделирования для задачи взаимодействия фито- и зоопланктона



87.889763
85.573711
83.257659
80.941607
78.625556
76.309504
73.993452
71.677400
69.361348
67.045297
64.729245
62.413193
60.097141
57.781089
55.465037
53.148986

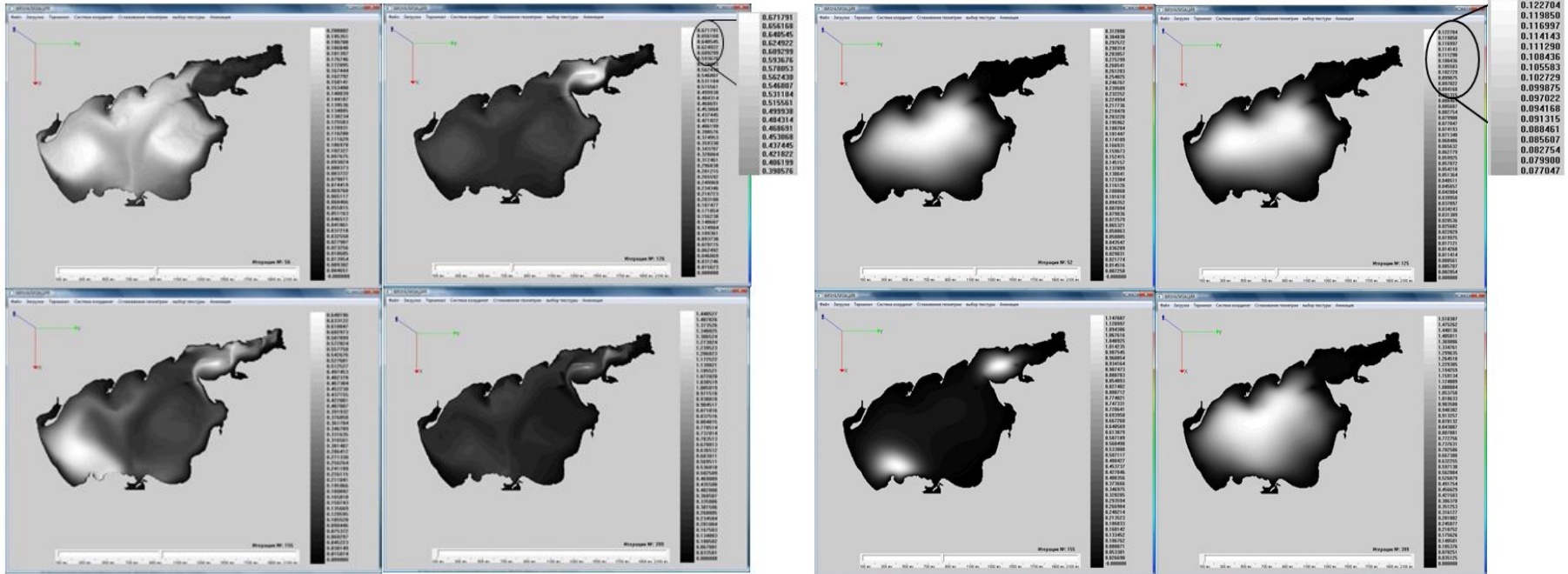
Совместное распределение концентраций синезеленой и зеленой водорослей для временных интервалов $T=2, 27, 39, 70, 85, 122$ дней. Начальное распределение полей течений в Азовском море для северного ветра

$$\tau_{\varphi} = 0,3; \mu_i = 5 \cdot 10^{-7}; \nu_i = 10^{-7}; \mu_s = 5 \cdot 10^{-10}; \nu_s = 10^{-10}; \mu_z = 1,6 \cdot 10^{-3}; \nu_z = 1,5 \cdot 10^{-3}; \mu_m = 5 \cdot 10^{-11}; \nu_m = 10^{-11}; B = 0,001; S_p = 1;$$

$$\delta_1 = 0,5; \delta_2 = 0,3; \varepsilon_1 = 0,0116; \varepsilon_2 = 0,116; \varepsilon_z = 0,115; \varepsilon_3 = 0,5; \varepsilon_4 = 0,5; \delta_1 = 0,5; \delta_2 = 0,3; \beta_{0i} = 1,5; \theta_1 = 0,3; \theta_2 = 0,1; p_1 = 0,95;$$

$$p_2 = 0,085; f = 3; \varphi \in \{X_i, S, Z, M_i\}, i \in \{1, 2\}, m \in \{3, 4\}$$

Результаты численного моделирования для задачи динамики пеленгаса



Распределение концентраций детрита, временной интервал $T=26, 62, 76, 195$ дней. Начальное распределение полей течений в Азовском море для северного ветра

Распределение концентраций пеленгаса, временной интервал $T=25, 61, 76, 195$ дней. Начальное распределение полей течений в Азовском море для северного ветра

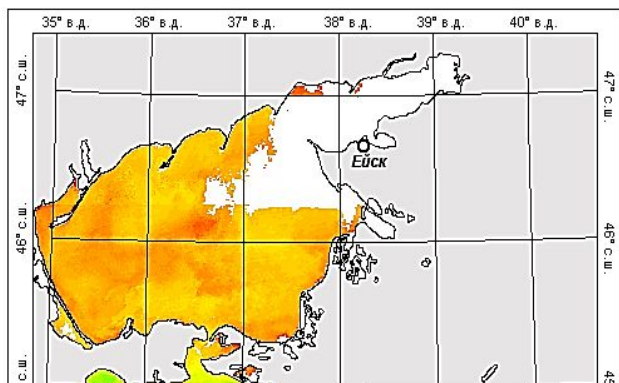
$$\mu_P = 1,5 \cdot 10^{-3}; \nu_P = 1,6 \cdot 10^{-3}; \gamma_P = 0,125; \varepsilon_P = 1,16 \cdot 10^{-3}; \xi_P = 0,8; \varepsilon_5 = 0,47; \delta_P = 0,05$$

$$\mu_D = 5 \cdot 10^{-11}; \nu_D = 10^{-11}; \varepsilon_D = 1,9 \cdot 10^{-5}; \beta_D = 0,1; \varepsilon_4 = 0,4$$

Схема прогнозного моделирования с помощью ИПК

Взаимодействие ИПК с существующими ГИС

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ "НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ "ПЛАНЕТА"



ИСЗ AQUA (MODIS), разрешение 1000м, 2 декада декабря 2013 г.

0.01 0.10 1.00 10.00 64.00

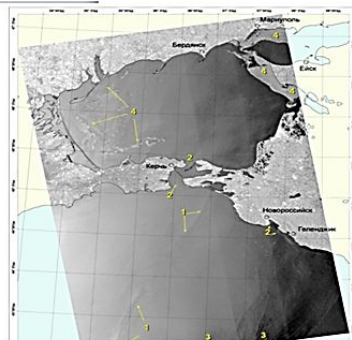


ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ "НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ "ПЛАНЕТА"

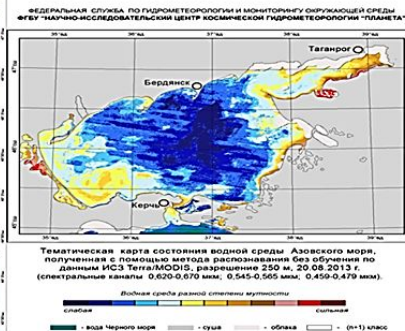


- примерное положение Основного черноморского течения
- антициклонические вихри
- циклонические вихри
- граница азово-черноморских вод
- вихревые диполи
- зона интенсивно взмученных вод
- зона слабо взмученных вод
- зона речного стока
- зона повышенного содержания фитопланктона
- зона умеренного содержания фитопланктона

Обобщенная карта-схема состояния и загрязнения водной среды в Азово-Черноморском бассейне в первой декаде января 2014 г.



Радиолокационное изображение Азово-Черноморского бассейна и результат его дешифрования (1 – проявление воздействия атмосферного фронта на взволнованную морскую поверхность; 2 – скопления судов; 3 – проявление воздействия атмосферных внутренних волн на взволнованную морскую поверхность; 4 – лед)



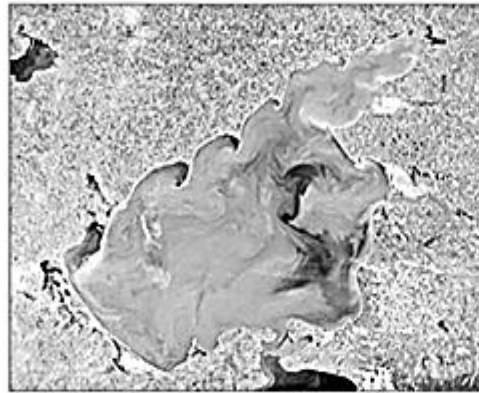
Тематическая карта состояния водной среды Азовского моря, полученная с помощью метода распознавания без обучения по данным ИСЗ Terra/MODIS, разрешение 250 м, 20.08.2013 г. (спектральные каналы 0.620-0.670 нм, 0.545-0.565 нм, 0.459-0.479 нм).

Водная среда различной степени мутности: слабая, средняя, сильная.
- вода Черного моря - суша - облака - (H+1) класс

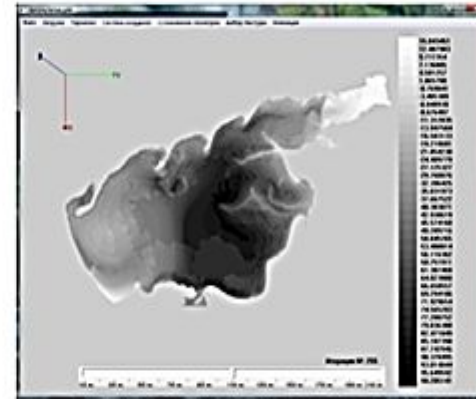
ИСЗ ENVISAT, ASAR, © ESA 30.03.2012 г. 19:29 GMT, разрешение 150 м

Карта состояния водной среды Азовского моря

Исследование качественного соответствия результатов моделирования данным дистанционного зондирования Земли



А



Б

А: спутниковая фотография Азовского моря, выполненная в ультрафиолетовом спектре.
Взято с сайта NASA (<http://veimages.gsfc.nasa.gov/1326/S1998282101838.jpg>)

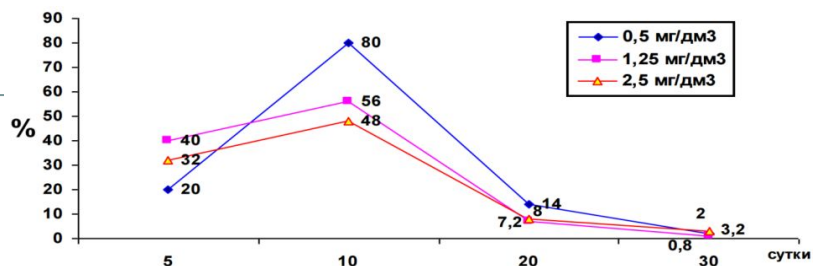
Б: результат работы ИПК: совместное распределение концентраций синезеленой и зеленой водорослей для временного интервала 85 дней.
Начальное распределение полей течений при северном ветре

- Качественное соответствие полей хлорофилла и биомассы фитопланктона, восстановленных по спутниковым данным и рассчитанных по моделям.
- Высокая степень пространственной согласованности гидрофизических и гидробиологических показателей.
- При тестировании работы ИПК использовались пакеты прикладных программ и библиотеки: OpenFoam фирмы OpenFOAM®Foundation, 3D STUDIO MAX, BLAS, LAPACK и др.
- Групповой анализ экспериментальных данных проводился с помощью приложения Hamster, использующего базы научных обзоров, позволяющего проводить верификацию математических моделей экспериментов и их реальных аналогов, а также сравнивать результаты схожих экспериментов.

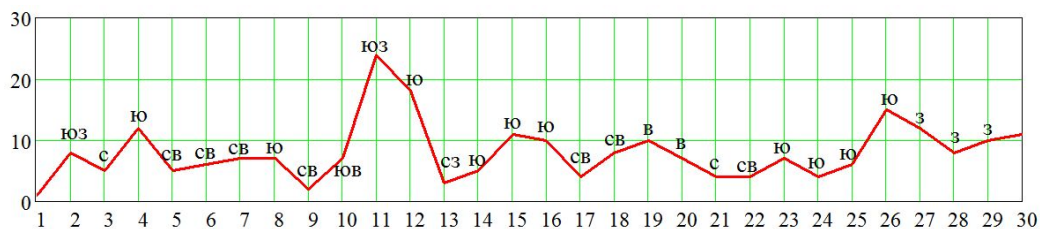
NOAA (The National Oceanic and Atmospheric Administration) – is a federal agency focused on the condition of the oceans and the atmosphere
(федеральное агентство, занимающееся состоянием океана и атмосферы)

NASA (National Aeronautics and Space Administration) – национальное управление по авиации и исследованию космического пространства

Задача транспорта нефтепродуктов в прибрежных системах



Динамика деструкции сырой нефти

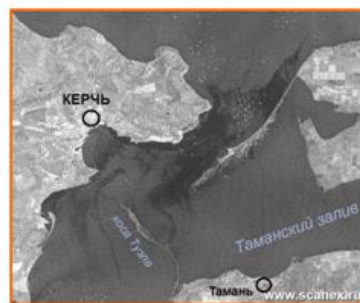


Скорость ветра в районе Керченского пролива в ноябре 2007 года



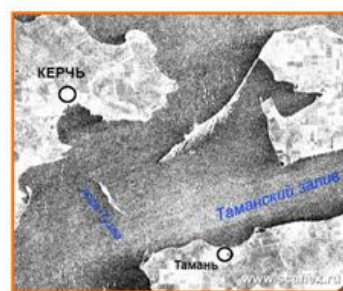
ИСЗ Radarsat-1, 15 ноября 2007 г.

Скорость ветра по данным метеостанции Керчь составляла 2 м/с.



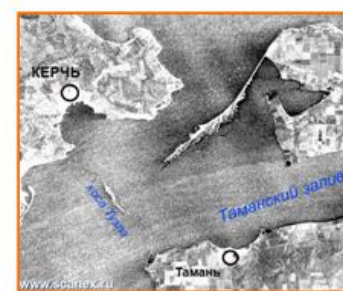
ИСЗ Radarsat-1, 16 ноября 2007 г.

Скорость ветра по данным метеостанции Керчь составляла 3 м/с.
Общая площадь пленок нефтяных загрязнений - 117,6 км².



ИСЗ Radarsat-1, 22 ноября 2007 г.

Средняя скорость ветра по данным метеостанции Керчь составляла 5-7 м/с (СВ).

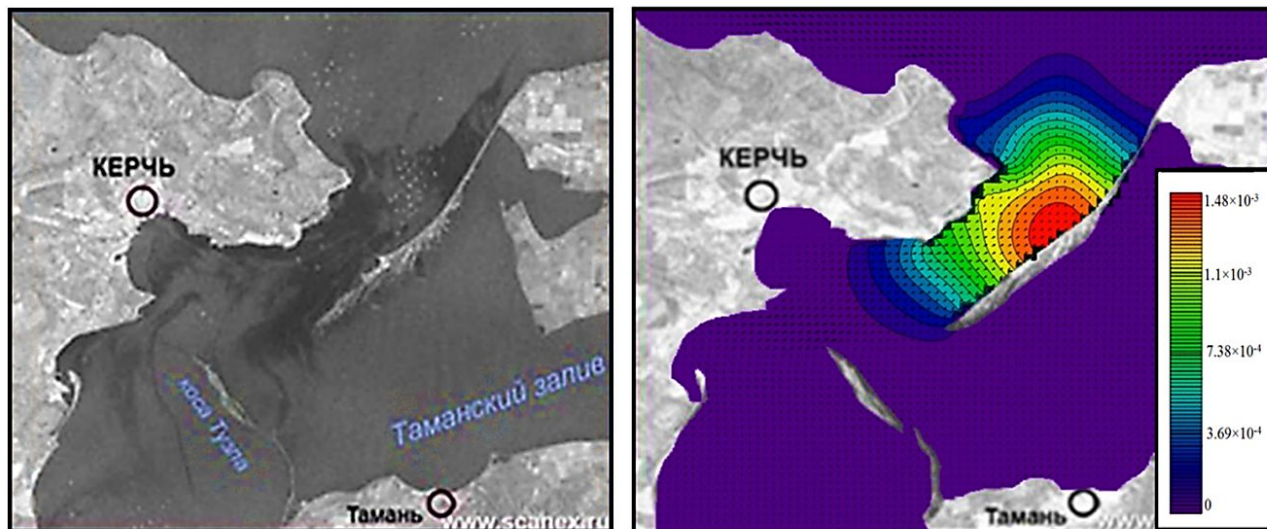


ИСЗ Radarsat-1, 23 ноября 2007 г.

Средняя скорость ветра по данным метеостанции Керчь составляла 5-7 м/с (В).

Радиолокационные снимки участка катастрофического разлива нефти в Керченском проливе

Результаты вычислительных экспериментов по ретроспективному анализу аварийного разлива нефти в Керченском проливе в ноябре 2007 г.



А

Б

Сравнение результатов моделирования с данными дистанционного зондирования Земли.

А: радиолокационное изображение участка разлива нефти на 16 ноября 2007 г.

Взято с сайта НИЦ «Планета» (http://planet.iitp.ru/Prik_pr/BlackSea/black_frameset.htm);

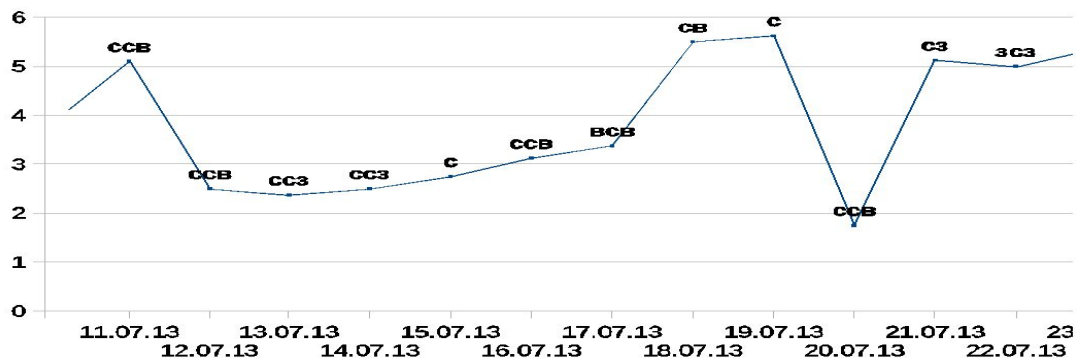
Б: результаты работы модернизированного программного комплекса «Azov3d»

ФГБУ «НИЦ «Планета» - ведущая организация по эксплуатации и развитию национальных космических систем гидрометеорологического, океанографического, гелиогеофизического назначения и мониторинга окружающей среды, а также по приему и обработке данных с зарубежных спутников, взаимодействующая с национальными гидрометеорологическими службами и космическими агентствами более 30 стран: США, ЕС, Японии, Индии, Китая, Кореи и др.

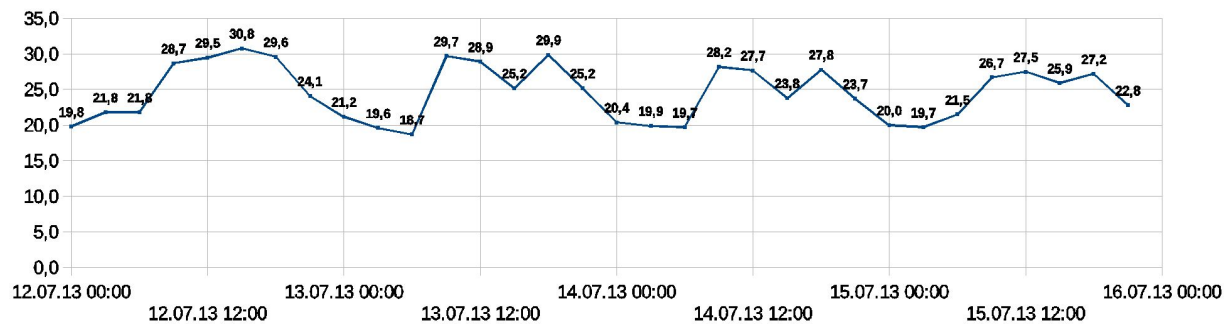
Входные данные для реконструкции процессов цветения в Азовском море в июле 2016 г.



Для реконструкции процесса «цветения вод», вызвавшего замор рыбы в Юго-Восточной части Азовского моря в июле 2013 года, была разработана пространственно-неоднородная математическая 3D модель, информация о скорости и направлении ветра в Темрюкском заливе в июле 2016 года, предоставленная метеостанцией в г. Керчь (WMO_ID 33983), использовались для нее в качестве входных данных.

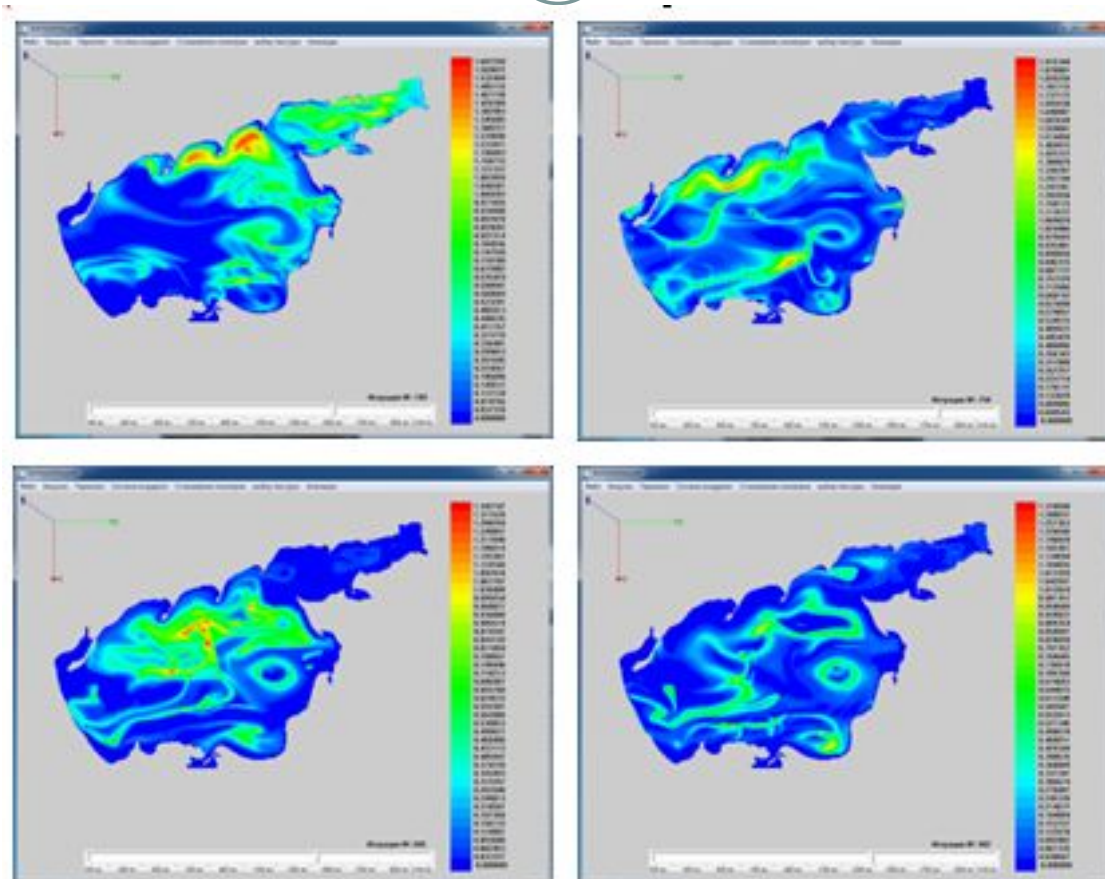


Скорость и направления ветра в июле 2013 года



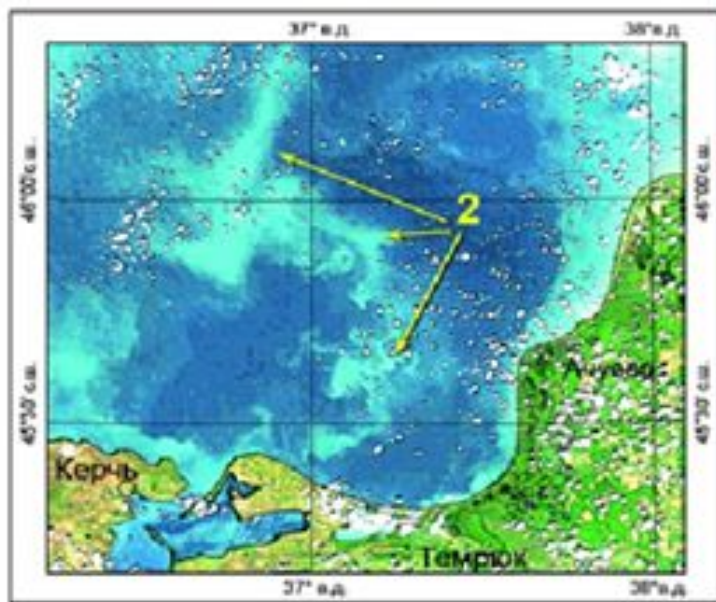
Температура воды в июле 2013 года

Результаты численных экспериментов



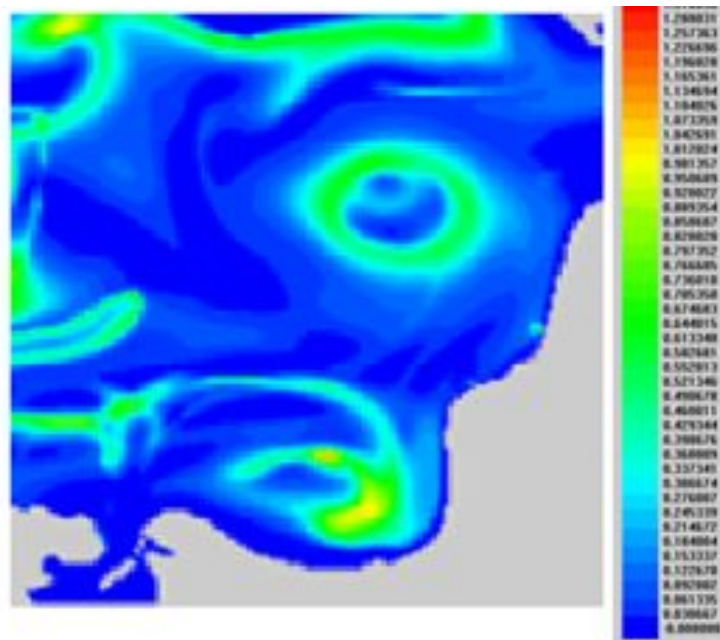
Изменение концентрации фитопланктона в Азовском море

Реконструкция процесса «цветения вод», вызвавшего замор рыбы в Юго-Восточной части Азовского моря в июле 2013 года



ИСЗ Aqua, MODIS, разрешение 250 м
22.07.2013 10:40 UTC

А



Б

А: спутниковая фотография Азовского моря НИЦ «Планета»
Б: результат работы ПК (изменение концентрации фитопланктона)

Использование результатов научной работы

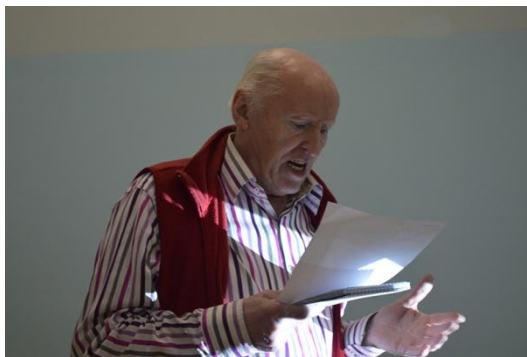


Организация, вид работы	Характеристика внедряемых материалов
Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН), г. Ростов-на-Дону	<p>Непрерывная и дискретная модели биологической кинетики на примере многовидовых моделей взаимодействия зеленого фитопланктона <i>Chlorella vulgaris</i> BIN и токсичного синезеленого <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>, зоопланктона <i>Bosmina longirostris</i>.</p> <p>Пространственно-неоднородные двух- и трехмерные непрерывные и дискретные модели биологической кинетики на примере ихтиологических задач динамики промысловых рыб: судак – тюлька, планктон – пеленгас – детрит.</p> <p>Необходимые и достаточные условия устойчивости (ограничения на шаг по времени) для дискретных моделей гидробиологии мелководного водоема с использованием различных методов: принципа максимума, метода гармоник, а также энергетического метода.</p> <p>Модернизированные численные методы вариационного типа для решения сеточных задач гидробиологии моря.</p>
Администрация г. Таганрога, отдел по охране окружающей среды и природных ресурсов	<p>Усовершенствованная трехмерная пространственно-неоднородная модель динамики вредоносного фитопланктона <i>Skeletonema costatum</i>.</p> <p>Методы решения гидробиологических задач на основе расщепления по физическим процессам и по координатам с использованием ЛОС и экономичных, в смысле суммарных временных затрат на МВС, ЛДС.</p> <p>ИПК по Азовскому морю, объединяющий библиотеку прикладных программ и многолетнюю базу экспедиционных данных.</p>
ФГУ «Информационно-аналитический центр по водопользованию и мониторингу Азовского моря», «АЗОВМОРИНФОРМЦЕНТР», г. Таганрог	<p>Трехмерные, пространственно-неоднородные модели биологической кинетики: модель взаимодействия зеленого фитопланктона <i>Chlorella vulgaris</i> BIN и токсичного синезеленого <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>, зоопланктона <i>Bosmina longirostris</i>.</p> <p>Ихтиологические модели динамики промысловых рыб: судак – тюлька, планктон – пеленгас – детрит.</p> <p>Методы вариационного типа, оптимизированные для решения поставленных сеточных задач гидробиологии моря: скорейшего спуска (МСС) по невязке и по поправке; минимальных невязок (ММН); минимальных поправок (ММП).</p> <p>ИПК по Азовскому морю, объединяющий библиотеку прикладных программ и многолетнюю базу экспедиционных данных.</p>
НИИ многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева ЮФУ	<p>Модернизированные численные методы вариационного типа для решения сеточных задач гидробиологии моря, учитывающие специфику многовидовых моделей, использующие усовершенствованные процедуры расчета итерационных параметров: МСС по невязке и по поправке; варианты ММН и ММП.</p> <p>Методы решения гидробиологических задач на основе расщепления по физическим процессам и по координатам с использованием ЛОС и экономичных, в смысле суммарных временных затрат на МВС, ЛДС.</p> <p>Структура ИПК, включающая блок управления, базы океанологических и метеорологических данных, систему интерфейсов, библиотеку программ решения сеточных задач гидробиологии, системы ввода – вывода и визуализации.</p> <p>Параллельные алгоритмы решения задач гидробиологии моря, использующие новую передачу данных между процессорами на основе метода k-means для разбиения расчетной области.</p> <p>Библиотека программ для вычислительной системы гибридного типа, предназначенная для моделирования гидробиологических процессов в мелководных водоемах.</p>
В учебном процессе кафедры интеллектуальных и многопроцессорных систем ЮФУ	<p>Оптимизированные численные методы решения сеточных задач гидробиологии мелководного водоема, в том числе ММП.</p> <p>Параллельные алгоритмы решения задач гидробиологии моря, позволяющие уменьшить время решения задач в десятки раз.</p> <p>Библиотека прикладных программ, позволяющая совместно моделировать гидробиологические процессы динамики фито- и зоопланктона, а также промысловых рыб.</p>
В учебном процессе кафедры высшей математики ЮФУ	<p>Методы решения гидробиологических задач на основе расщепления по физическим процессам и по координатам с использованием ЛОС и экономичных, в смысле суммарных временных затрат на МВС, ЛДС.</p> <p>ИПК по Азовскому морю, объединяющий библиотеку прикладных программ и многолетнюю базу экспедиционных данных.</p>

Международные конференции. Параллельные вычислительные технологии ПАВТ (Scopus, WoS)



Международные конференции. THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON STOCHASTIC METHODS / THEORY PROBAB. APPL. 2018 Society for Industrial and Applied Mathematics (Scopus, WoS)



Публикации по теме исследования



Публикации: по теме диссертационной работы опубликовано 68 печатных работ, из них 32 статьи в ведущих научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ. Имеется 8 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ РФ, зарегистрированных в Реестре программ для ЭВМ.

РАБОТЫ В ИЗДАНИЯХ, ВХОДЯЩИХ В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК РФ

- Никитина А.В., Пескова О.Ю. Разработка пространственных моделей биологических процессов // Известия ТРТУ. – 1999. – № 2(12). – С. 203-207.
- Гончарова М.В., Лященко Т.В., Никитина А.В. Трехмерное моделирование гидротермодинамических процессов в Таганрогском заливе // Известия ТРТУ. – 1999. – №4(14). – С. 170-175.
- Сухинов А.И., Никитина А.В. Об исследовании условий существования и единственности решений для системы уравнений динамики фитопланктона // Известия ТРТУ. – 2000. – № 1 (15). – С. 222 - 227.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Пескова О.Ю. Математическое моделирование процессов распространения загрязнений и эволюции фитопланктона применительно к акватории Таганрогского залива // Известия ТРТУ. – 2001. – №2(20). – С. 32 - 36.
- Никитина А.В. Моделирование динамики численности рыбных популяций в акватории Таганрогского залива // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. № 7(96). – С. 169 - 173.
- Никитина А.В. Модели таксиса, стабилизирующие экологическую систему Таганрогского залива // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 7 (96). – С.173-177.
- Никитина А.В. Модели биологической кинетики, стабилизирующие экологическую систему Таганрогского залива // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – №8 (97). – С.130-134.
- Никитина А.В. Численное решение задачи динамики токсичных водорослей в Таганрогском заливе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С.113-116.

Публикации по теме исследования



- Никитина А.В., Третьякова М.В. Моделирование процесса альголизации мелководного водоема путем вселения в него штамма зеленой водоросли *Chlorella vulgaris bin* // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1. – С. 128-133.
- Никитина А.В., Лозовская К.А. Численное моделирование процессов взаимодействия планктона и популяции промысловой рыбы пеленгас // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 8. – С. 98-104.
- Сухинов А.И., Никитина А.В. Математическое моделирование и экспедиционные исследования качества вод в Азовском море // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 8. – С. 62 - 73.
- Никитина А. В., Семенов И. С. Параллельная реализация модели динамики токсичной водоросли в Азовском море с применением многопоточности в операционной системе Windows // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №1 (138). – С. 130-135.
- Никитина А.В., Чистяков А.Е., Фоменко Н.А. Применение адаптивного модифицированного попеременно-треугольного итерационного метода для численной реализации двумерной математической модели движения водной среды // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т.20, №2, – С. 335 - 339.
- Никитина А.В., Камышникова Т.В., Семенов И.С. Расщепление по физическим процессам для расчета задач биологической кинетики в трехмерных областях сложной формы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 4 (141). – С.223 - 235.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Семенов И.С. Реализация параллельных алгоритмов решения модельной задачи биологической кинетики в Азовском море // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 4(141). – С.132 - 140.
- Никитина А.В., Семенов И.С. Моделирование процессов эвтрофикации мелководного водоема // Известия ЮФУ. Технические науки. – № 4 (141). – 2013. – С.37 - 44.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Чистяков А.Е. Моделирование сценария биологической реабилитации Азовского моря // Математическое моделирование. – Т. 24. №9. –2012. – С. 3-21.

Публикации по теме исследования



- Никитина А.В., Семенов И.С. Численная реализация методов решения задач биологической кинетики в Азовском море // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 1(150). – С. 138-143.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Чистяков А.Е., Семенов И.С. Математическое моделирование условий формирования заморов в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2013. – Т.14. №1.– С. 103-112.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Семенов И.С. Реализация параллельных алгоритмов решения модельной задачи взаимодействия фито- и зоопланктона в Азовском море // Вестник УГАТУ (Уфимского авиационного института). – 2014. Т. 18, №14(65). – С. 216 - 224.
- Чистяков А.Е., Хачунц Д.С., Никитина А.В., Проценко Е.А., Кузнецова И.Ю. Библиотека параллельных итерационных методов решателей СЛАУ для задачи конвекции-диффузии на основе декомпозиции по одному пространственному направлению // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/121-19510>.
- Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Семенякина А.А., Никитина А.В. Параллельная реализация задач транспорта веществ и восстановления донной поверхности на основе схем повышенного порядка точности // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2015. – Т.16. – С. 256-267.
- Никитина А.В., Руднева Т.В., Камышникова Т.В., Бокарева Т.А., Дурягина В.В. К вопросу о формировании заморных зон в восточной части Азовского моря // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL:<http://www.science-education.ru/121-19509>.
- Сухинов А.И., Тимофеева Е.Ф., Григорян Л.А., Тебуева Ф.Б., Никитина А.В., Хачунц Д.С. Параллельное численное решение задачи фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости на основе усовершенствованного попеременно-треугольного метода // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-3. – С. 526-530; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39574> (дата обращения: 29.12.2015).
- Никитина А.В., Семенякина А.А., Чистяков А.Е., Проценко Е.А., Яковенко И.В. Применение схем повышенного порядка точности для решения задач биологической кинетики на многопроцессорной вычислительной системе // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-3. – С. 500-504; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39569> (дата обращения: 29.12.2015).
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Семенякина А.А., Проценко Е.А. Комплекс программ и алгоритмов для расчета транспорта наносов и многокомпонентных взвесей на многопроцессорной вычислительной системе // Инженерный вестник Дона, №4 (2015) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3462.
- Никитина А. В., Пучкин М. В., Семенов И. С., Сухинов А. И., Угольницкий Г.А., Усов А.Б., Чистяков А. Е. Дифференциально-игровая модель предотвращения заморов в мелководных водоемах // Управление большими системами, Выпуск 55. М.: ИПУ РАН. – 2015. – С. 343-361.

Публикации по теме исследования



- Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Семенякина А.А., Никитина А.В. Численное моделирование экологического состояния Азовского моря с применением схем повышенного порядка точности на многопроцессорной вычислительной системе // Компьютерные исследования и моделирование. - 2016. – Т. 8, № 1. – С.151 - 168.
- Семенякина А.А., Никитина А.В., Чистяков А.Е. , Сухинов А.И. Комплекс моделей, явных регуляризованных схем повышенного порядка точности и программ для предсказательного моделирования последствий аварийного разлива нефтепродуктов // Сборник трудов конференции «Параллельные Вычислительные технологии: ПАВТ-2016»/- 2016. –С. 308 – 319.
- Семенякина А.А., Никитина А.В., Чистяков А.Е., Сухинов А.И., Савицкий О.А. Математическое моделирование излучения акустической антенной на многопроцессорной системе // Сборник трудов конференции «Параллельные вычислительные технологии: ПАВТ-2016»/- 2016. – С. 699 – 709.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Семенякина А.А. , Чистяков А.Е. , Хачунц Д.С., Семенов И.С. Математическое моделирование процессов эвтрофикации в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе // Сборник трудов конференции «Параллельные вычислительные технологии: ПАВТ-2016»/- 2016. –С. 320 – 333.
- Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Nikitina A.V., Semenyakina A.A., Korovin I.S., Schaefer G. Modelling of the Oil Spill Spread // Proceedings of the 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). Dhaka, Bangladesh, 2016.
- Sukhinov A.I., Levin I.I., Chistyakov A.E., Nikitina A.V., Semenov I.S., Semenyakina A.A. Solution of the Problem of Biological Rehabilitation of Shallow Waters on Multiprocessor Computer System // Proceedings of the 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). Dhaka, Bangladesh, 2016.

Публикационная активность



Публикации в базах MathSciNet, Math-Net.Ru

Журналы «Математическое моделирование», «Вычислительные методы: новые вычислительные технологии».

Публикации в базе Scopus, Web of Science Core Collection

«Mathematical Models and Computer Simulations», «Компьютерные исследования и моделирование», «Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ-2016, 2017)», «5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)», «Автоматика и телемеханика»:

- Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Семенякина А.А., Никитина А.В. Численное моделирование экологического состояния Азовского моря с применением схем повышенного порядка точности на многопроцессорной вычислительной системе // Компьютерные исследования и моделирование. - 2016. - Т. 8, № 1. - С.151 - 168.
- Семенякина А.А., Никитина А.В., Чистяков А.Е., Сухинов А.И. Комплекс моделей, явных регуляризованных схем повышенного порядка точности и программ для предсказательного моделирования последствий аварийного разлива нефтепродуктов // Сборник трудов Международной конференции «Параллельные вычислительные технологии: ПАВТ-2016» / Архангельск. - 2016. - С. 308 – 319.
- Семенякина А.А. , Никитина А.В., Чистяков А.Е., Сухинов А.И., Савицкий О.А. Математическое моделирование излучения акустической антенной на многопроцессорной системе // Сборник трудов Международной конференции «Параллельные вычислительные технологии: ПАВТ-2016» / Архангельск. - 2016. - С. 699 – 709.
- Сухинов А.И., Никитина А.В., Семенякина А.А. , Чистяков А.Е. , Хачунц Д.С., Семенов И.С. Математическое моделирование процессов эвтрофикации в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе // Сборник трудов Международной конференции «Параллельные вычислительные технологии: ПАВТ-2016»/ Архангельск. - 2016. - С. 320 – 333.
- Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Nikitina A.V., Semenyakina A.A., Korovin I.S., Schaefer G. Modelling of the Oil Spill Spread // Proceedings of the 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). Dhaka, Bangladesh, 2016.
- Sukhinov A.I., Levin I.I., Chistyakov A.E., Nikitina A.V., Semenov I.S., Semenyakina A.A. Solution of the Problem of Biological Rehabilitation of Shallow Waters on Multiprocessor Computer System // Proceedings of the 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). Dhaka, Bangladesh, 2016.
- Сухинов А.И., Чистяков А. Е., Угольницкий Г.А. , Усов А.Б., Никитина А.В., Пучкин М.В., Семенов И.С. Теоретико-игровые регламенты механизмов управления устойчивым развитием мелководных экосистем // Автоматика и телемеханика, 2017:6, 122–137 (Scopus и Web of Science Core Collection).

Апробация работ

Грант Дж. Сорроса, 1998; грант благотворительного фонда им. В. Потанина, 2002; стипендия благотворительного фонда А. Фроловой, 2005; грант на проведение научных исследований в рамках программы IREC, 2007; проект по разработке и внедрению учебно-методических комплексов в области параллельных компьютерных технологий и высокопроизводительных вычислений корпорации INTEL, 2006, 2007; российско-французский проект IREC (International Research Educational Centers), 2006, 2007; проект программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» Минобразования РФ и Американского Фонда гражданских исследований и развития (CRDF) 2004 – 2011; грант Программы Фулбрайт, 2008; договор с «Касптрансформ», Астрахань, 2008; грант фирмы Yandex, 2009; хоздоговор с ЗАО «Навител», 2009; РНПВШ 2.1.1/6584 «Комплекс математических моделей для системы обеспечения геоэкологической безопасности Юга России», АВЦП Минобразования РФ, 2009 – 2011; хоздоговор №14715 «Натурные испытания спектрофотометрического комплекса», 2010; договор № 01/10-10 «Контрольный промер Таганрогского подходного канала (ТПК). Съёмка рельефа дна автоматизированным гидрографическим комплексом способом промера», 2010; г/б работа П458 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» №14717, 2009 – 2012; г/б работа №14756 Минобразования РФ, 2009 – 2011; г/б работа №14757 Минобразования РФ, 2011, 2012; х/д работа по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы» №14763, 2009 – 2011; г/б работа РНП.2.2.1.1/7176 «Создание научно-образовательного центра математического моделирования и вычислительной механики ЮФУ и ЮРГТУ на базе корпоративной научно-исследовательской кафедры», 2008 – 2010; г/б работа №12.9.11 ВЦП Минобразования РФ, 2011, 2012; х/д работа с ФГУП «РОСМОРПОРТ» по проведению промерных работ у причала порта №14720, г. Новороссийск, 2011; х/д работа с ФГУП «РОСМОРПОРТ» по проведению промерных работ №14721, 2011, 2012; х/д работа по проведению промерных работ в районе порта «Тамань «Черного моря»» №14722 с ГНЦ ФГУП «Южморгеология», 2011 – 2013; г/б НИР № 5-5745.2011, 2011-2013; грант ЮФУ № 213.01-24/2013-77, 2013; задание №2014/174 в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России, 2015, 2016; «Построение и исследование объединенного комплекса моделей гидродинамики и гидробиологии и явных регуляризованных схем для предсказательного моделирования прибрежных систем Юга России на вычислительных системах с массовым параллелизмом» Программа фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П «Фундаментальные проблемы математического моделирования. Фундаментальные проблемы факторизационных методов в различных областях. Алгоритмы и математическое обеспечение» (№ гр. АААА-А16-116080310053-2, 0256-2015-0078) грант РФФИ № 15-07-08626, 2015, 2016; грант РНФ, проект №17-11-01286, 2017, 2018.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ





5th International Conference on Informatics, Electronics & Vision

13-14 May, 2016, University of Dhaka



Author Certificate

for the paper entitled

Paper ID : 679

Modelling of Oil Spill Spread

Alexandr I. Sukhinov (Don State Technical University); Alexandr E. Chistyakov (Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems at Southern Federal University); Alla V. Nikitina (Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems at Southern Federal University); Alena A. Semenyakina (Scientific Research Center of Supercomputers and Neurocomputers); I. Korovin (Southern Federal University); G. Schaefer (Loughborough University)


 Matthew Turk
General Chair


 Md. Atiqul Rahman Akbar
General Chair


 Syed Khabib
General Chair












Благодарю за внимание!