

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ЗАМОРНЫХ ЗОН В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ

Никитина А.В.², Руднева Т.В.¹, Камышникова Т.В.¹, Дурягина В.В.¹, Бокарева Т.А.¹

¹ЮФУ «Южный федеральный университет», Таганрог, Россия (347928, Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44), email: cheese_05@mail.ru

²НИИ МВС «Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. А.В. Каляева Южного Федерального Университета», Таганрог, Россия (347928, Таганрог, ГСП 284, ул. Чехова, 2), e-mail: nikitina.vm@gmail.com

В работе описан неизвестный ранее механизм формирования заморных условий в Азовском море, напрямую не связанный с установлением стратификации за счет поступления более соленых вод Черного моря и перегревом поверхностного слоя водной толщи. В зоне влияния стока Кубани акватории с дефицитом кислорода могут образовываться при сочетании трех факторов: формирования вихревой структуры, концентрации планктона в ее центре и поступления холодных речных вод, за счет большей плотности перемещающихся в придонном слое и быстро теряющих кислород. Приведены результаты экспедиционных исследований, проведенные на акватории Азовского моря исследователями Южного федерального университета в 2010-2013 годах.

Ключевые слова: Азовское море, заморные условия, сток Кубани, вихревое течение, «цветение воды».

ON THE PROBLEM OF ANOXIA FORMATION ON THE SEA OF AZOV EASTERN PART

Nikitina A.V.², Rudneva T.V.¹, Kamyshnikova T.V.¹, Duriagina V.V.¹, Bokareva T.A.¹

¹«Southern Federal University», Taganrog, Russia, (347928, Taganrog, Nekrasovskiy, 44), email: cheese_05@mail.ru

²«Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems named after Acad. A.V. Kalyaev of Southern Federal University», Taganrog, Russia (347928, Taganrog, GSP 284, Chekhov street, 2), e-mail: nikitina.vm@gmail.com

The new type of anoxia formation in Azov Sea water body is described in this paper. It was found out that the zones of anoxia can be formed not only as a result of advection of chill saline Black sea water mass in the period of summer hot but by the invasion of cold fresh waters of Kuban' river flow in the bottom layer, formation of circulation caused by the winds effect and phytoplankton bloom in the center of the circulation in summer time. The results of expeditionary research are presented which conducted in the Sea of Azov researchers of Southern Federal University in 2010 – 2013 years.

Keywords: Sea of Azov, anoxia, Kuban' river flow, water circulation, algal bloom.

Азовское море – мелководный солоноватый водоем, наполнение которого зависит от речного и материкового стоков и поступления черноморских вод. Высокая продуктивность водоема, большая концентрация органической взвеси и слабый водообмен в летние месяцы приводят к дефициту кислорода – формированию заморных зон, где зообентос погибает на площади в несколько десятков, а зачастую – сотен квадратных километров. Это явление широко известно [1], однако до настоящего времени специального исследования этого явления не производили, оно просто регистрировалось во время рутинных рейсов по программе мониторинга рыбных запасов, которые проводит Азовский НИИ рыбного хозяйства.

Цель исследования заключалась в изучении и описании нового механизма формирования заморной зоны в Центрально-Восточной части Азовского моря с помощью

научных экспедиционных исследований и средств математического моделирования. В 2010 году климатические условия: аномальная жара при маловетрии, способствовали формированию заморных условий, и специалистами Южного федерального университета была предпринята попытка исследования глубоководной акватории восточной части Азовского моря для выявления и подробного обследования заморных зон [2]. Сложность заключалась в том, что гипоксия развивается достаточно быстро, за несколько суток, и так же быстро исчезает, поэтому съемка должна была быть проведена в кратчайшие сроки.

Материал и методы исследования

Экспедиционные исследования проводились одновременно на двух научно-исследовательских судах (рис. 1) в июле 2010 года, августе 2013 года.

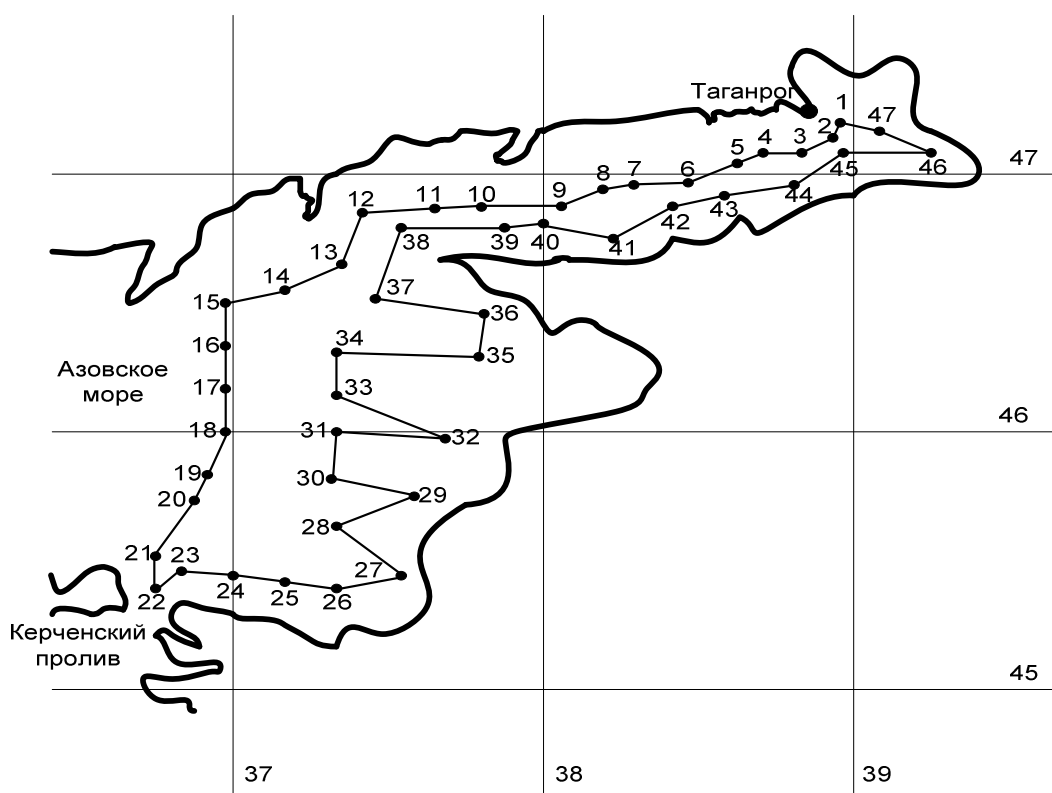


Рис. 1. Маршрут экспедиций 2010, 2013 гг.

Натурные измерения профиля температуры, солёности и растворенного кислорода производили при помощи Гидрофизического зонда «Sea Bird Electronics 19 Plus». По завершению экспедиционных исследований было проведено сопоставление результатов. При помощи акустического профилографа «ADCP Workhorse 600 Sentinel» произведены измерения компонент вектора скоростей и рассчитан неоднородный по глубине коэффициент вертикального турбулентного обмена.

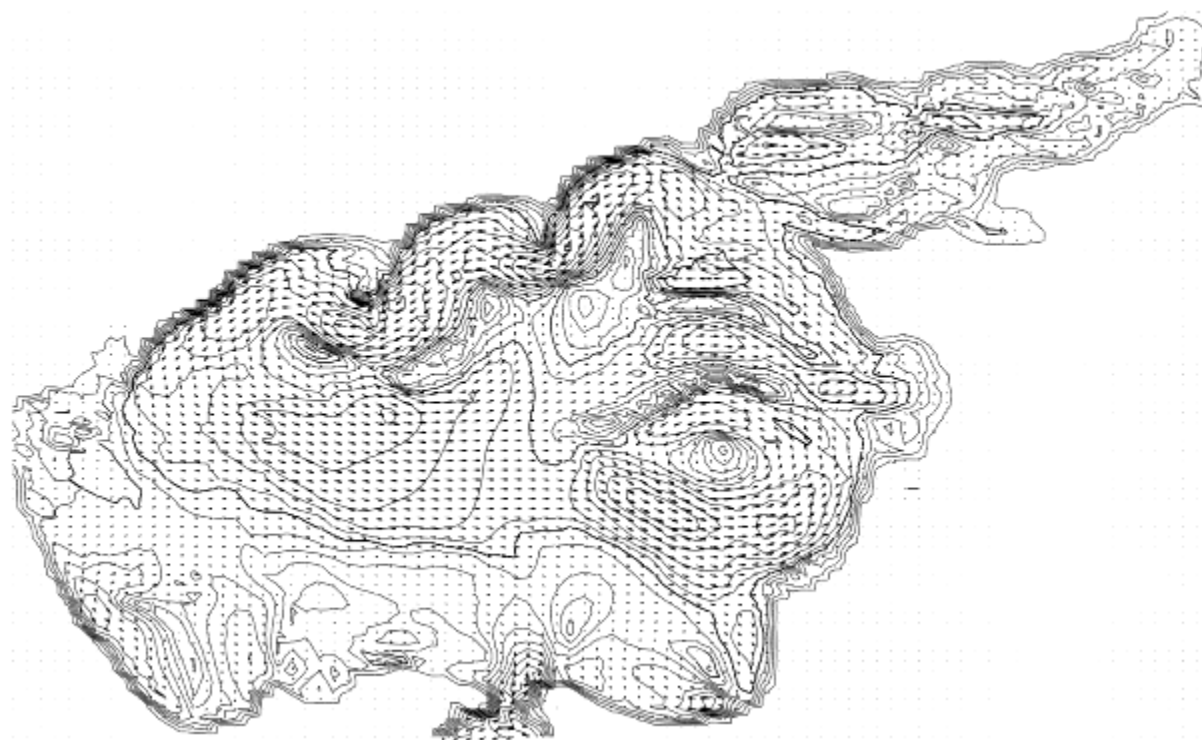
Для исследования количественного развития фитопланктона на станциях, где по данным зондирования наблюдалась стратификация, были отобраны пробы на глубинах:

поверхность, 1,5 м; 2,5 м; 5 м; 9 м; 13 м, на прочих станциях – на поверхности и в придонном слое.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ результатов показал, что на акватории Азовского моря присутствовали зоны аноксии и гипоксии, были выявлены районы со слабой интенсивностью течений, которые подвергаются заморным явлениям.

Для реконструкции экологической катастрофы была построена трехмерная математическая модель, описывающая гидрофизические процессы, происходящие в мелководных водоемах [5, 6].



*Рис. 2. Результаты математического моделирования движения водной среды
(баротропные течения)*

Моделирование перемещения водных масс Азовского моря показало, что в восточной части водоема образуются вихревые структуры течений, так называемые S – структуры [10] (рис. 2). При наличии замкнутого вихревого движения водной среды значительное число органических веществ захватывается течениями в этом районе. Далее эти вещества, опускаясь в придонный горизонт, и образуют органический осадок – морской снег [8]. При температурах воды, характерных для летнего периода, начинается интенсивное окисление образовавшегося осадка, что неизбежно приводит к снижению парциального давления кислорода (рис. 3). При возникновении устойчивой стратификации достаточно быстро наступает явление аноксии.

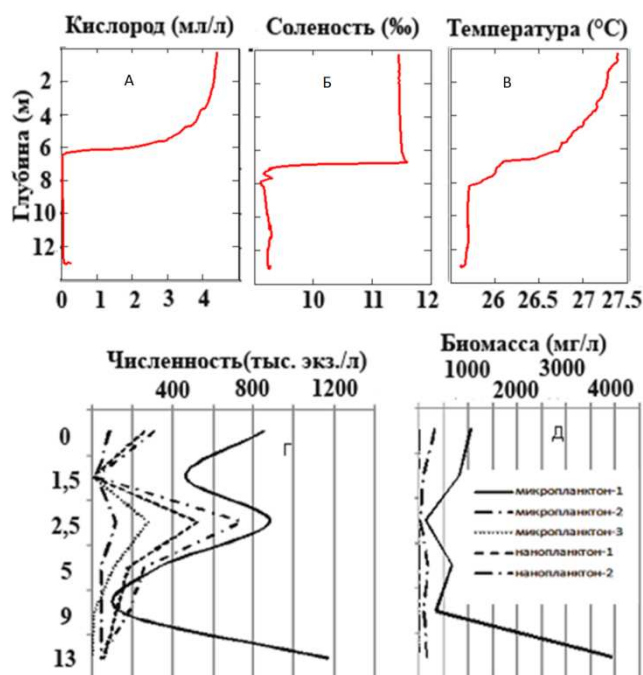


Рис. 3. Распределение кислорода, солености, температуры и фитопланктона (численность, биомасса) в водной толще в центре заморной зоны Азовского моря

Ситуацию усугубляло массовое развитие фитопланктона, по интенсивности достигавшее пиковых значений, наблюдаемых при «цветении воды» в Азовском море [9]. В центре вихревой структуры были обильны крупноклеточные диатомовые водоросли *Chaetoceros peruvianus* Brightwell, *Pseudosolenia calcar-avis* (Schultze) B.G.Sundström, *Ditylum brightwellii* (T. West) Grunow, занимавшие верхние слои водной толщи до зоны температурного скачка. В относительно холодных придонных слоях, находящихся вне фотического слоя и бедных кислородом, в массе встречалась бесцветная динофлагеллята *Gymnodinium arcuatum* Kofoid. Необычно слабое количественное развитие нанопланктонных водорослей (рис. 3, Г, Д). Пик численности нанофракции (рис. 3, Г) приходится на горизонты, где наблюдается максимальное турбулентное перемешивание (рис. 4), которое благоприятно для активно подвижных форм в большей степени, нежели для вегетативно неподвижных планктонных диатомей.

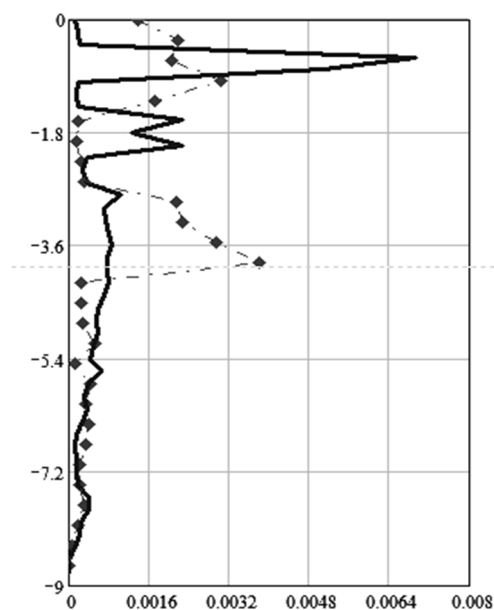


Рис. 4. Коэффициент вертикального турбулентного обмена на уровнях глубины (m^2/c), полученный при численном моделировании (подход Смагоринского – непрерывная линия) в сравнении с данными экспедиционных измерений (пунктирная)

Примечательно, что внутри S-структуры состав фитопланктона резко менялся, появлялись динофлагелляты *Prorocentrum cordatum* Ostensfeld, мелкоклеточные *Cyclotella tuberculata* Makarova & Loginova, а также *Chaetoceros socialis* Lauder с размером клеток всего 4-5 мкм. Среди нанопланктонных форм были обильны криптонады *Plagioselmis prolunga* Butcher, единично отмечены золотистые – *Chromulina parvula* Conrad, *Ch. rosanoffii* (Woronin) Bütschli, *Ch. truncata* Conrad, доминировавшие в планктоне Азовского моря на протяжении предшествующего десятилетия [7]. Возможно, слабое количественное развитие представителей данного рода связано с интенсивным прогревом водной толщи.

Обычно стратификацию водоема связывают с прогревом верхних слоев водной толщи и установлением термоклина. Помимо прогрева верхнего слоя водной за счет солнечной радиации, высокая устойчивость водной массы должна была определяться дополнительным фактором. По всей вероятности, этим фактором было поступление относительно холодных вод Кубани, сформировавших слой опресненной воды с температурой, на $2^{\circ}C$ более низкой, чем на поверхности (рис. 3, Б, В) – за счет этого более плотной.

Примерно на глубине 5 метров и ниже значения коэффициента вертикального турбулентного обмена очень малы и близки к нулю. Это означает минимальный турбулентный обмен по вертикали в данной области и объясняет явление аноксии (рис. 4).

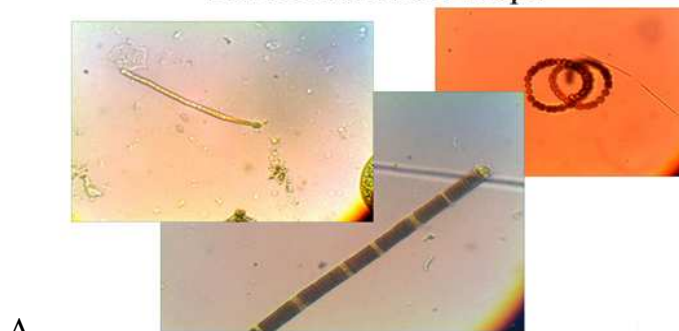
В центре вихревой структуры были отмечены трихомы *Nodularia spumigena* Mertens in Jürgens и *Anabaenopsis arnoldii* Aptekar'. Эти виды цианопрокариот тривиальны для Азовского моря, но тяготеют к опресненной зоне и лиманам побережья.

Описание видового состава и результаты измерений концентраций планктона в ходе проведенных и описанных выше экспедиционных работ были занесены в специально созданную регулярно пополняемую многолетнюю базу данных, содержащую, кроме того, и информацию по основным гидрохимическим и гидрофизическим параметрам. Информация в разработанной базе данных может быть отфильтрована по тем типам данных, которые интересуют исследователей в настоящий момент. По фитопланктону база содержит следующую информацию: год исследования, номер станции, глубина, значение концентрации, вид водоросли, размерный ряд, фото и др.

Примеры фотографий для планктона Азовского моря и Таганрогского залива, полученные с помощью электронного микроскопа, представлены на рисунке 5, А.

На каждой странице созданного ресурса (базы данных) присутствуют две навигационные панели: справа и слева страницы. Главная навигационная панель представлена в виде отдельной страницы (рис. 5, Б).

Цианопрокариоты из центральной части Азовского моря



А

список видов	название вида	Группа	Размерный кл.	Жизненная форма	Добавить поле
1	? Reticulata (Cyanoph)	Синезеленые	микропланктон-2	перфорированная колония в	
2	Actinactium hantzschii	Зеленые	наопланктон-2	звездчатый ценобий	
3	Amphidinium rotundatum	Динофитовые	наопланктон-2	голый жгутикооцет	
4	Amphidinium crassum	Динофитовые	наопланктон-2	голый жгутикооцет	
5	Amphidinium rhychocefal	Динофитовые	микропланктон-3	голый жгутикооцет	
6	Anabaena bergii	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцистный триком	
7	Anabaenopsis arnoldii	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцистный триком	
8	Anabaenopsis tangaiikae	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцистный триком	
9	Arhanizomenon floe-aqua	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцистный триком	
10	Arhanizomenon floe-aqua	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцистный триком	
11	Arhanizomenon gracilis	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцистный триком	
12	Arhanizomenon ovalisporu	Синезеленые	микропланктон-3	гетероцистный триком	
13	Achnanthes granulata	Диатомовые	микропланктон-3	бромидрическая колония	
14	Bitudicella huterbornii	Зеленые	микропланктон-3	триком	
15	Cerataulina bergonii	Диатомовые	микропланктон-3	цепочка с осами	
16	Chaetoceros abnormis f. sin	Диатомовые	наопланктон-1	хетогериды	
17	Chaetoceros affinis	Диатомовые	микропланктон-1	цепочка с осами	
18	Chaetoceros lorentianus	Диатомовые	микропланктон-1	цепочка с осами	
19	Chaetoceros maellieri	Диатомовые	наопланктон-1	хетогериды	
20	Chaetoceros pallidus	Диатомовые	наопланктон-1	хетогериды	
21	Chaetoceros persimianus	Диатомовые	микропланктон-2	хетогериды	
22	Chaetoceros simplex	Диатомовые	микропланктон-1	хетогериды	
23	Chaetoceros socialis	Диатомовые	наопланктон-1	цепочка с осами	
24	Chaetoceros willii	Диатомовые	микропланктон-2	цепочка с осами	
25	Chlamydomonas vesterisii	Зеленые	наопланктон-1	голый жгутикооцет	
26	Chromulina nebulosa	Золотистые	наопланктон-2	голый жгутикооцет	
27	Chromulina parva	Золотистые	наопланктон-1	голый жгутикооцет	
28	Chromulina rosanoffii	Золотистые	наопланктон-2	голый жгутикооцет	
29	Chromulina truncata	Золотистые	наопланктон-2	голый жгутикооцет	
30	Chroomonas salina	Криттомонады	наопланктон-2	голый жгутикооцет	

Б

Рис. 5. А - планктон центральной части Азовского моря; Б – главная навигационная панель базы данных по Азовскому морю

Ранее подобные явления аноксии имели место в устье рукава Протока, где в августе 1998 года наблюдалась массовая гибель промысловых рыб. В целом, для Восточной части

Азовского моря характерно более низкое видовое разнообразие планктона и бентоса по сравнению с остальными районами этого водоема.

Выводы и заключение

Таким образом, в результате экспедиционных исследований в Центрально-Восточной части Азовского моря был установлен и описан новый для Азовского моря механизм формирования заморной зоны, напрямую не связанный с установлением стратификации за счет поступления более соленых вод Черного моря и перегревом поверхностного слоя водной толщи. В зоне влияния стока Кубани могут образовываться участки акватории с дефицитом кислорода при сочетании трех факторов: формирования вихревой структуры, концентрации планктона в ее центре и поступления холодных речных вод, за счет большей плотности перемещающихся в придонном слое и быстро теряющих кислород. Проведенные экспедиционные исследования акватории Азовского моря использовались при разработке сценариев биологической реабилитации его вод с помощью методов математического моделирования [3, 4].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Задания №2014/174 в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ по проектам № 15-01-08619, № 15-07-08626, № 15-07-08408.

Список литературы

1. Зенкевич Л. А. Фауна и биологическая продуктивность моря. – М.; Л.: Сов. наука. – Т. 2: Моря СССР, их фауна и флора, 1947. – 588 с.
2. Сухинов А.И., Никитина А.В. Математическое моделирование и экспедиционные исследования качества вод в Азовском море // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. - №8(121). – С. 62-73.
3. 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.– 2013. – Т.14. – С. 103-112.
4. 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.

5. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежной зоне мелководных водоемов // Математическое моделирование. – 2013. – Т. 25, № 12. – С. 65-82.
6. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежных водных системах на многопроцессорной вычислительной системе// Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2014. – Т. 15, № 4. – С. 610-620.
7. Усачев П.И. О фитопланктоне Азовского моря. В кн.: Сборник в честь профессора Н.М. Книповича. 1885-1925. М. – 1927. – С. 405-429.
8. Herndl G.J. Microbial dynamics in marine snow // Proceedings of the symposium Seasonal dynamics of planktonic ecosystems and sedimentation in coastal Nordic waters. Edited by: Sören Floderus, A.-S. Heiskanen, Michael Olesen and P. Wassman. Helsinki. – 1991. – P. 81-106.
9. Matishov G.G., Fushtey T.V. Factors Contributing to Long-Term Variation in the Species Composition of Phytoplankton in the Sea of Azov // Doklady Biological Sciences. – 2001. – Vol. 378. – P. 244-245.
10. Sukhinov A.I., Sukhinov A.A. Reconstruction of 2001 Ecological Disaster in the Azov Sea on the Basis of Precise Hydrophysics Models // Parallel Computational Fluid Dynamics, Multidisciplinary Applications, Proceedings of Parallel CFD 2004 Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, ELSEVIER, Amsterdam-Berlin-London-New York-Tokyo. – 2005. – P. 231-238.

Рецензенты:

Сухинов А.И., д.ф.-м.н., профессор, декан факультета физики, математики, информатики Таганрогского института имени А.П. Чехова (филиала) «Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), г. Таганрог;

Илюхин А.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры математики факультета физики, математики, информатики Таганрогского института имени А.П. Чехова (филиала) «Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), г. Таганрог.