

УДК 556.11

## ЭКОЛОГО-ГИДРОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА НА СОДЕРЖАНИЕ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ПРИДОННОМ СЛОЕ МЕЛКОВОДНОГО ВОДОЕМА

<sup>1</sup>Никитина А.В., <sup>2</sup>Сухинова Т.Г., <sup>3</sup>Проценко С.В., <sup>1</sup>Семенякина А.А., <sup>3</sup>Бедная Т.А.

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Таганрог, e-mail: nikitina.vm@gmail.com, j.a.s.s.y@mail.ru;

<sup>2</sup>Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону;

<sup>3</sup>Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону,  
e-mail: cheese\_05@mail.ru, rab55555@rambler.ru, bednayat@mail.ru

В статье представлены результаты гидрохимических наблюдений, полученных в ходе экспедиции на исследовательском судне «Денеб» в восточной части Азовского моря и Таганрогской бухты в июле 2017 г. В ходе экологических и гидрофизических исследований были обнаружены anomalously низкие уровни растворенного кислорода в нижнем слое Азовского моря. Загрязняющие вещества скапливаются в донных отложениях водоемов. В теплое время года, при благоприятном температурном режиме донные осадки прогреваются, иловые микроорганизмы освобождают вещества, вызывающие выделение сероводорода. Результатом распада существенного количества органических веществ за относительно небольшой период времени является значимое снижение концентрации кислорода, растворенного в воде, что может служить причинами отрицательных изменений водной экосистемы: замора рыбы, ухудшения качества воды. Экспериментальным путем получены распределения коэффициента вертикального турбулентного обмена. Проблемы обеспечения стабильного функционирования водных экосистем, предотвращения уменьшения биологического разнообразия, предупреждения негативных последствий антропогенного воздействия, обеспечения безопасного водопользования в процессе социально-экономического развития территории приобретают в настоящее время особую актуальность. Проведен численный эксперимент по определению коэффициента вертикального турбулентного обмена для некоторых точек Азовского моря. Получено соответствие результатов расчетов на основе статистических данных о поле скоростей водного потока и подсчетной модели Смагоринского с данными натурных измерений. Изучено влияние изменения значений коэффициента вертикального турбулентного обмена на содержание растворенного кислорода в придонном слое мелководного водоема. Выявлена прямая зависимость между значениями коэффициента вертикального турбулентного обмена и концентрацией растворенного кислорода в нижнем слое.

**Ключевые слова:** коэффициент вертикального турбулентного обмена, турбулентный поток, концентрация растворенного кислорода

## ECOLOGICAL AND HYDROPHYSICAL RESEARCH OF IMPACT THE VERTICAL TURBULENT EXCHANGE COEFFICIENT ON THE CONCENTRATION OF DISSOLVED OXYGEN IN THE BOTTOM LAYER OF SHALLOW WATER

<sup>1</sup>Nikitina A.V., <sup>2</sup>Sukhinova T.G., <sup>3</sup>Protsenko S.V., <sup>1</sup>Semenyakina A.A., <sup>3</sup>Bednaya T.A.

<sup>1</sup>Southern Federal University, Taganrog, e-mail: nikitina.vm@gmail.com, j.a.s.s.y@mail.ru;

<sup>2</sup>The Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov;

<sup>3</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: cheese\_05@mail.ru,  
rab55555@rambler.ru, bednayat@mail.ru

The paper presents the results of hydrochemical observations obtained during the expedition on the research vessel Deneb in the eastern part of the Azov Sea and Taganrog Bay in July 2017. In the course of ecological and hydrophysical studies, anomalously low levels of dissolved oxygen in the lower layer of the Azov Sea were discovered. Pollutants accumulate in the bottom sediments of water bodies. In the warm season, with a favorable temperature regime, the bottom sediments warm up, and the silt microorganisms release substances that cause the evolution of hydrogen sulfide. The result of the decay of a significant amount of organic substances in a relatively short period of time is a significant decrease in the concentration of oxygen dissolved in water, which can serve as the causes of negative changes in the aquatic ecosystem: fish freezing, deterioration of water quality. The distributions of the coefficient of vertical turbulent exchange were obtained experimentally. The problems of ensuring the stable functioning of aquatic ecosystems, preventing the reduction of biological diversity, preventing the negative effects of anthropogenic impact, ensuring safe water use in the process of socio-economic development of the territory are becoming especially urgent at the moment. A numerical experiment has been performed to determine the coefficient of vertical turbulent exchange for some points in the Azov Sea. The results of calculations are obtained on the basis of statistical data on the field of water flow velocities and the Smagorinsky subgrid model with the data of field measurements. The effect of changing the value of the coefficient of vertical turbulent exchange on the content of dissolved oxygen in the bottom layer of a shallow water body is studied. The direct relationship between the values of the coefficient of vertical turbulent exchange and the concentration of dissolved oxygen in the lower layer was revealed.

**Keywords:** coefficient of vertical turbulent exchange, turbulent flow, concentration of dissolved oxygen

Реальная экосистема водного объекта представляет собой сложную структуру взаимодействия органических веществ и растворенного кислорода с живыми организмами.

Происходящие в настоящее время увеличение объемов промышленного производства, сброс производственных отходов и загрязняющих веществ в водо-

емы резко увеличивают нагрузку на естественные экосистемы. Следствием растущего антропогенного воздействия на природу, аномальных климатических изменений, естественного старения водного объекта являются риски нарушения естественной жизнедеятельности в экосистеме водного объекта, возникновения необратимых отрицательных изменений водной экосистемы, процессов эвтрофикации водоемов – перенасыщения водоема биогенами, что влечет за собой быстрый рост фитопланктона. Экосистема мелководного водоема имеет сложную структуру, в рамках которой происходят взаимодействия органических и неорганических веществ с живыми организмами. Среди всех гидрохимических параметров, влияющих на биологическую продуктивность Азовского моря, особое место отводят растворенному кислороду – источнику дыхания гидробионтов и фактору, определяющему полноту и скорость минерализации органических веществ в водоеме. Особенностью кислородного режима Азовского моря является его нестабильность, которая определяется рядом постоянных и сезонных факторов: поглощением атмосферного кислорода поверхностным слоем воды, неравномерным притоком речных и черноморских вод, развитием и затуханием жизнедеятельности организмов, циркуляционными процессами, определяющими возможности проникновения кислорода в придонные слои, и другими процессами [1–2].

Концентрация растворенного кислорода в морской воде зависит от нескольких факторов, основными из которых являются: га-

зообмен между водой и атмосферой; интенсивность процесса фотосинтеза; процесс бактериального и химического окисления метаболитов морских организмов, остатков отмерших организмов растительного и животного происхождения; интенсивность конвективного перемешивания и поступление обедненных кислородом вод; адвекция водных масс, биохимическое потребление кислорода донными отложениями [3].

Летом в условиях плотностной стратификации возникает усиленное снижение концентрации кислорода в придонных горизонтах Азовского моря (в отдельных районах до 60%). Ведущими факторами формирования кислородного режима в поверхностных водах являются главным образом продукционные процессы, в придонных – биохимическое разложение донных отложений [4–5]. Принимая во внимание процессы вертикальной турбулентной диффузии в стратифицированных водоемах, кислород в процессе инвазии попадает в нижние слои. Цель настоящей работы состоит в проверке влияния гидродинамических условий на изменение концентрации растворенного кислорода в придонном слое мелководного водоема.

*Описание измерительной базы.  
Маршрут экспедиции*

Экспедиция с целью проведения научно-исследовательских работ в акватории Азовского моря «Денеб» (далее НИС «Денеб») Южного научного центра РАН (далее ЮНЦ РАН). Исследования проводились на 17 станциях в восточной части Азовского моря (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Научно-исследовательские работы в Азовском море (июль 2017 г.): а) маршрут экспедиции; б) НИС «Денеб»

Оборудование НИС «Денеб»: гидрологический CDT-зонд SEACAT SBE19; регистратор течений RCM 9LW; узлоуловочной параметрический профилограф SES-2000 light (Innomar Technologie GmbH); гравитационная грунтовая трубка 13,540 В с возможностью установления поршневой системы (Piston/Gravity corer Model 13,540 В); автоматический проточный анализатор San++ с сэмплером SA1100, вмещающим 2×50 позиций для образцов; глубоководный пробоотборный комплекс карусельного типа; оборудование НИС «Денеб» для гидробиологических и литологических исследований: батометры Молчанова и Нискина для отбора проб воды; дночерпатели Петерсена и Ван-Виина для отбора донных отложений; бентосная драга; планктонные сети Апштейна и Джеди для отбора проб планктона; икорная сеть для отбора проб ихтиопланктона; набор сетей и драг для проведения ихтиологических исследований; грунтовая прямооточная трубка с возможностью взятия колонки осадков 2–2,5 м.

Целью экспедиционных работ являлось получение систематической информации влияния химических и физических свойств воды на экологическое состояние акватории Азовского моря. В ходе экспедиции выполнен отбор проб, проведен анализ состава воды, представлен обзор программы наблюдений за качеством морских вод, включавшей следующие мероприятия: определение концентрации нефтяных углеводородов, растворенного кислорода, водородного показателя, хлорированных углеводородов, тяжелых металлов, фенолов и др.

Оборудование НИС «Денеб» для ихтиологических исследований: донный бимтрал; пелагический распорный трал (28 м по горизонтали, 8 м по вертикали); гидрофизический зонд SBE19 plus; датчик растворенного кислорода SBE43; ПК (персональный компьютер) с программным обеспечением для подключения гидрофизических зондов; батометры 3 л и 5 л; комплектное оборудование для измерения концентрации кислорода методом Винклера; профилограф (ADCP) WHS 600.

*Содержание выполненных экспедиционных работ*

Экспедиционные работы проводились с целью получения систематической информации влияния химических и физических свойств воды на экологическое состояние акватории Азовского моря. Программа наблюдений за качеством морских вод состояла в следующем. Была найдена концентра-

ция нефтяных углеводородов, мг/дм<sup>3</sup> (мг/л); растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup> (мг/л, %); водородного показателя pH; хлорированных углеводородов, в том числе пестицидов, мкг/дм<sup>3</sup> (мкг/л); тяжелых металлов, мкг/дм<sup>3</sup> (мкг/л); фенолов, мкг/дм<sup>3</sup> (мкг/л); других веществ, мкг/дм<sup>3</sup> (мкг/л). Были выявлены показатели содержания биогенных веществ, свойственных для района проведения экспедиции: нитритного азота, мкг/дм<sup>3</sup> (мкг/л); кремния, мкг/дм<sup>3</sup> (мкг/л); солёности воды, %; температуры воды и воздуха, °С; скорости и направления ветра, м/с; прозрачности воды (единицы цветности); волнения моря (баллы); проведение визуальных наблюдений за состоянием поверхности морского водного объекта.

*Измерение пульсаций вектора скоростей водного потока*

При моделировании полей течений водного потока мелководных водоемов возникает проблема параметризации коэффициента турбулентного обмена. От турбулентного перемешивания во многом зависит способность водоема к самоочищению, турбулентный обмен влияет на транспорт наносов и взвешенных веществ и на интенсивность деформации донной поверхности [6–7].

В ходе экспедиции были получены данные о пульсациях скоростей в некоторых точках мелководных систем на основе зонда ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) WHS600 Sentinel. ADCP-профилограф был зафиксирован на свободной поверхности водоема, измерения проводились от свободной поверхности до дна. Работа профилографа основана на доплеровском эффекте. Из значений лучевых скоростей вычисляют пульсации компонент скорости ( $u', v', w'$ ).

В ходе работы был выполнен отбор батометрических проб, проведены анализы состава воды. Представлена таблица с измеренными значениями концентрации растворенного кислорода в горизонтах исследуемого водоема на станциях, входящих в маршрут движения судна.

*Коэффициент вертикальной турбулентной вязкости*

Проведенные натурные эксперименты, в том числе измерение пульсации скоростей водного потока, позволяют при построении математических моделей учитывать коэффициент вертикального турбулентного обмена, неоднородный по глубине. Результаты, наиболее близкие к экспериментальным натурным данным, получены с помощью параметризации О.М. Белоцерковского [8].

## Концентрация растворенного кислорода в Азовском море

№ станции	Координаты станции	Измеренные значения растворенного кислорода			
		глубина, м	0	4	11,5
1(49)	46° 39, 569' N 37° 20, 743' E	O <sub>2</sub> , мг/л	9,02	8,53	5,32
		глубина, м	0	6	12
2(48')	46° 29,725' N 36° 59,786' E	O <sub>2</sub> , мг/л	12,69	13,03	0,66
		глубина, м	0	6	12
3(44')	46° 19, 693' N 36° 59, 683' E	O <sub>2</sub> , мг/л	5,75	4,94	0,61
		глубина, м	0	5,5	11
12(42)	45° 59, 906' N 37° 20, 128' E	O <sub>2</sub> , мг/л	9,21	9,87	1,41
		глубина, м	0	5,5	11

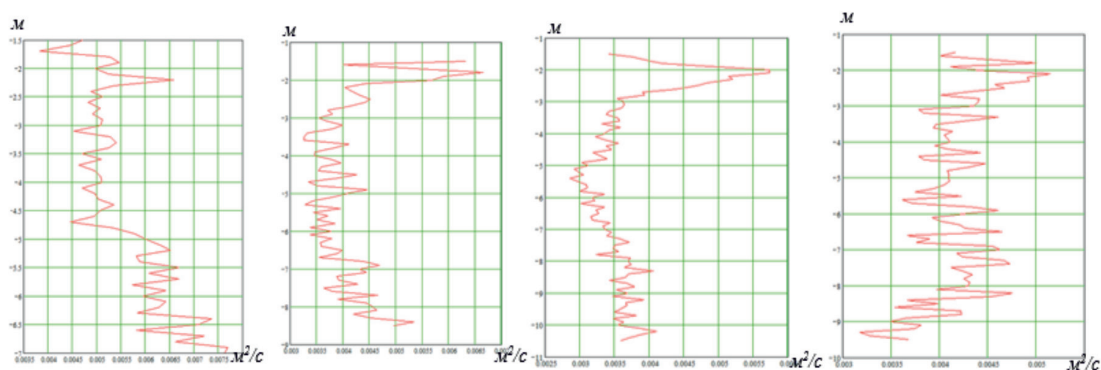


Рис. 2. Коэффициент вертикального турбулентного обмена в точках 1, 2, 3, 12, по горизонтали – значения в м<sup>2</sup>/с, по вертикали – уровень воды от свободной поверхности ко дну

Если вертикальное разрешение расчетной сетки позволяет воспроизвести все механизмы моделируемого процесса до масштабов вязкой диссипации очень мелких вихрей, то для расчета турбулентности используют уравнения Навье – Стокса и находят путем численного моделирования [3, 8]. Скорость диссипации может быть представлена как

$$\bar{\nu} = 2\bar{\nu}_{ij} \cdot \bar{\nu}_{ij},$$

где  $\bar{\nu}_{ij}$  – осредненный тензор скоростей деформации:  $\bar{\nu} \sim \epsilon^{2/3} \Delta^{-4/3}$ .

Выражение для турбулентной вязкости имеет вид

$$\nu = C_s^2 \Delta^2 \bar{\nu}^{-1/2},$$

где  $C_s$  – константа, значение которой зависит от однородной изотропной турбулентности. Значение константы  $C_s$  должно гарантировать соответствие результатов моделирования с экспериментальными измерениями. Значения константы  $C_s$  в ряде случаев изменяются от 0,1 до 0,2, при течении на канале до случая изотропной турбулентности соответственно.

Если размер сетки достаточно мал, то  $\bar{\nu}$  равна средней скорости деформации в параметризации Прандтля  $D$ , что позволяет перейти к аналогу Прандтля в виде

$$\nu = C_s^2 \Delta^2 \sqrt{2D_{ij} D_{ij}},$$

пренебрегая градиентами  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ , имеем равенство

$$\nu = C_s^2 \Delta^2 \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right)^2}.$$

#### Численный расчет коэффициента вертикальной турбулентной вязкости

Были выполнены численные эксперименты на основе описанных выше подходов для всех точек,  $\nu \sim \epsilon^{1/3} \cdot \Delta^{4/3}$ , в которых проводились натурные измерения в ходе экспедиционных работ (рис. 2).

Было изучено влияние изменения значений коэффициента вертикального турбулентного обмена на содержание растворенного кислорода в придонном слое мелководного водоема [1, 3]. Анализ результатов моделирования процессов ги-

дрозифики в Азовском море показал, что наибольшему значению коэффициента вертикального турбулентного обмена соответствует наибольшая концентрация растворенного кислорода в придонном слое Азовского моря (точка 12), наименьшему значению концентрации растворенного кислорода (точка 3) соответствует наименьшее значение. На глубине около и более трех метров значения данного коэффициента близки к 0, что означает пониженный турбулентный обмен по вертикали в указанной области и объясняет отсутствие кислорода в придонном слое центрально-восточной части Азовского моря.

### Выводы

В ходе экспедиционных исследований Азовского моря были получены значения концентраций растворенного кислорода и данные о пульсациях скоростей водного потока в некоторых точках водоема с помощью зонда ADCP WHS600 Sentinel. Обнаружены участки с низким содержанием растворенного кислорода в придонном слое.

Получено соответствие результатов расчетов на основе статистических данных о поле скоростей водного потока и подсчетной модели Смагоринского [9] с данными натурных измерений. Изучено влияние изменения значений коэффициента вертикального турбулентного обмена на содержание растворенного кислорода в придонном слое мелководного водоема.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П, проект № 0256-2015-0078.*

### Список литературы

1. Алексеенко Е.В. Сравнительный анализ классических и неклассических моделей гидродинамики водоемов с турбулентным обменом / Е.В. Алексеенко, Б.В. Сидоренко, О.В. Колгунова, А.Е. Чистяков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 8 (97). – С. 6–18.
2. Sukhinov A.I. Mathematical modeling of sediment transport in the coastal zone of shallow reservoirs / A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, E.A. Protsenko // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 351–363.
3. Дегтярева Е.Е. Программная реализация трехмерной математической модели транспорта взвеси в мелководных акваториях / Е.Е. Дегтярева, Е.А. Проценко, А.Е. Чистяков // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 23, № 4–2 (23). – С. 30.
4. Никитина А.В. Дифференциально-игровая модель предотвращения заморов в мелководных водоемах /

А.В. Никитина, М.В. Пучкин, И.С. Семенов, А.И. Сухинов, Г.А. Угольницкий, А.Б. Усов, А.Е. Чистяков // Управление большими системами: сборник трудов. – 2015. – № 55. – С. 343–361.

5. Проценко Е.А. Двумерная конечно-разностная модель формирования наносов в прибрежной зоне водоема и ее программная реализация / Е.А. Проценко // Инженерный вестник Дона. – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 23–31.

6. Проценко Е.А. Модель и алгоритмы решения задачи о транспорте наносов / Е.А. Проценко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 8 (97). – С. 71–75.

7. Protsenko S. Mathematical modeling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures / S. Protsenko, T. Sukhinova // MATEC Web Conf. Volume 132, 2017 XIII International Scientific-Technical Conference «Dynamic of Technical Systems» (DTS-2017) DOI. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204002>.

8. Белоцерковский О.М. Турбулентность: новые подходы / О.М. Белоцерковский, А.М. Опарин, В.М. Четчин. – М.: Наука. – 2003. – 286 с.

9. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment / J. Smagorinsky // Monthly Weather Review. – 1963. – Vol. 91, № 3. – P. 99–164.

### References

1. Alekseenko E.V. Sravnitelnyj analiz klassicheskikh i neklassicheskikh modelej gidrodinamiki vodoemov s turbulentnym obmenom / E.V. Alekseenko, B.V. Sidorenko, O.V. Kolgunova, A.E. Chistyakov // Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki. 2009. no. 8 (97). pp. 6–18.
2. Sukhinov A.I. Mathematical modeling of sediment transport in the coastal zone of shallow reservoirs / A.I. Sukhinov, A.E. Chistyakov, E.A. Protsenko // Mathematical Models and Computer Simulations. 2014. T. 6, no. 4. pp. 351–363.
3. Degtjareva E.E. Programmная realizacija trehmernoj matematicheskoj modeli transporta vzvesi v melkovodnyh akvatorijah / E.E. Degtjareva, E.A. Protsenko, A.E. Chistyakov // Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. T. 23, no. 4–2 (23). pp. 30.
4. Nikitina A.V. Differencialno-igrovaja model predotvrashhenija zamorov v melkovodnyh vodoemah / A.V. Nikitina, M.V. Puchkin, I.S. Semenov, A.I. Sukhinov, G.A. Ugolnickij, A.B. Usov, A.E. Chistyakov // Upravlenie bolshimi sistemami: sbornik trudov. 2015. no. 55. pp. 343–361.
5. Protsenko E.A. Dvumernaja konechno-raznostnaja model formirovanija nanosov v pribrezhnoj zone vodoema i ee programmная realizacija / E.A. Protsenko // Inzhenernyj vestnik Dona. 2010. T. 13, no. 3. pp. 23–31.
6. Protsenko E.A. Model i algoritmy reshenija zadachi o transporte nanosov / E.A. Protsenko // Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki. 2009. no. 8 (97). pp. 71–75.
7. Protsenko S. Mathematical modeling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures / S. Protsenko, T. Sukhinova // MATEC Web Conf. Volume 132, 2017 XIII International Scientific-Technical Conference «Dynamic of Technical Systems» (DTS-2017) DOI. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204002>.
8. Belocerkovskij O.M. Turbulentnost: novye podhody / O.M. Belocerkovskij, A.M. Oparin, V.M. Chechetkin. M.: Nauka. 2003. 286 p.
9. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment / J. Smagorinsky // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91, no. 3. pp. 99–164.