

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА ПЕРЕНОС ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В АЗОВСКОМ МОРЕ

*А.В. Клещенков, А.Ю. Московец*

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр  
Российской академии наук, Ростов-на-Дону  
geo@ssc-ras.ru, alexazov@mail.com

**Аннотация.** В статье представлены результаты изучения влияния ветрового волнения на перенос взвешенных веществ в Азовском море.

Цель данной работы – анализ влияния ветрового взмучивания на концентрацию взвешенных веществ в водной толще моря.

Во время морских экспедиций на НИС «Денеб» осенью 2023 г. отмечались значительные изменения концентрации взвешенных веществ. В условиях умеренного ветра (4–7 м/с) в центральной части Азовского моря концентрация взвеси в поверхностном слое находилась в диапазоне 2–8 мг/л. При развитии штормовых условий концентрация взвеси увеличивалась почти до 33 мг/л. В Таганрогском заливе при западном ветре (6–8 м/с) концентрация взвеси достигала 25–32 мг/л, а при сильном шторме – 220–270 мг/л.

Наблюдения показали, что штормы значительно увеличивают концентрацию взвешенных веществ в воде, особенно в прибрежной зоне. В условиях сильного восточного ветра (6–9 м/с) мутность в прибрежной зоне была зафиксирована на уровне 657 мг/л, что связано с высоким сдвиговым напряжением в придонном горизонте. В статье делается вывод о необходимости комплексного подхода к исследованию воздействия ветрового волнения на перенос взвешенных веществ, который предполагает использование современных методов, таких как дистанционное зондирование, высокоточные измерения параметров волнения и компьютерное моделирование.

**Ключевые слова:** взвешенное вещество, Азовское море, ветровое взмучивание.

Азовское море со всей его уникальной природной средой представляет собой объект комплексного экологического интереса, который требует глубокого исследования для полного понимания сложной динамики процессов, воздействующих на его состояние. Несмотря на значительные успехи в изучении океанографии и экологии данного региона, вопросы, связанные с воздействием ветрового волнения на перенос взвешенных веществ в Азовском море, требуют дальнейшего изучения.

Взаимодействие между ветровым волнением и переносом взвешенных веществ в Азовском море приобретает особое значение в контексте биогеохимических циклов, транспорта вещества и сохранения и управления его уникальной экосистемой. Регион, обладающий богатым биоразнообразием и высокой экологической значимостью, сталкивается с вызовами, требующими более глубокого понимания влияния внешних факторов, таких как влияние ветрового волнения на динамику взвешенных веществ в водной среде.

Имеющиеся в настоящее время в литературе оценки содержания взвеси в водной толще Азов-

ского моря во время штормов находятся в широком диапазоне значений. Так, Ю.А. Федоров [1] отметил, что в периоды штиля и шторма в Таганрогском заливе в 1996 и 1995 гг. максимальное содержание взвешенных веществ составляло 30 и 60 мг/л соответственно. В середине 1950-х гг. исследователи фиксировали содержание взвесей во время шторма около 4000 мг/л [2]. М.К. Спичак отмечал [3], что при ветре, дующем со скоростью 9–12 м/с средняя концентрация взвешенных веществ в Таганрогском заливе составляет примерно 470 мг/л, в то время как в Азовском море под влиянием того же ветра содержание взвеси возрастает до 250 мг/л. Содержание взвешенных веществ, согласно исследованию Л.З. Ганичевой [4], колеблется в диапазоне от 3 до 100 мг/л и даже превышало указанные значения. Это проявлялось сложным распределением по акватории Азовского моря. В своих наблюдениях она отметила, что в период штормового воздействия количество взвешенных веществ в воде моря существенно увеличивается по сравнению с их содержанием в условиях тихой погоды. Более резкие изменения концентрации характерны, особенно для

мелководной восточной части моря и Таганрогского залива.

Наблюдения, проведенные во время морских экспедиционных исследований в Азовском море на НИС «Днеб» в ходе двух рейсов с 01.11.2023 по 14.11.2023 и с 21.11.2023 по 01.12.2023 (рис. 1) показали следующее. Во время первого рейса в центральной части моря в условиях умеренного ветра 4–7 м/с и при средней глубине на станциях 11 м, количество взвеси в поверхностном

слое варьировало в диапазоне 2–8 мг/л. Прозрачность по белому диску составляла от 1,5 до 4 м. На прибрежных станциях были зафиксированы близкие значения мутности 7–10 мг/л. Однако при развитии штормовых условий 10.11.2023–11.11.2023 на ст. 134, расположенной в центральной части моря, при юго-восточном ветре 10–11 м/с концентрация взвеси в поверхностном слое возросла с 4,3 до 32,7 мг/л через 15 ч от начала шторма.

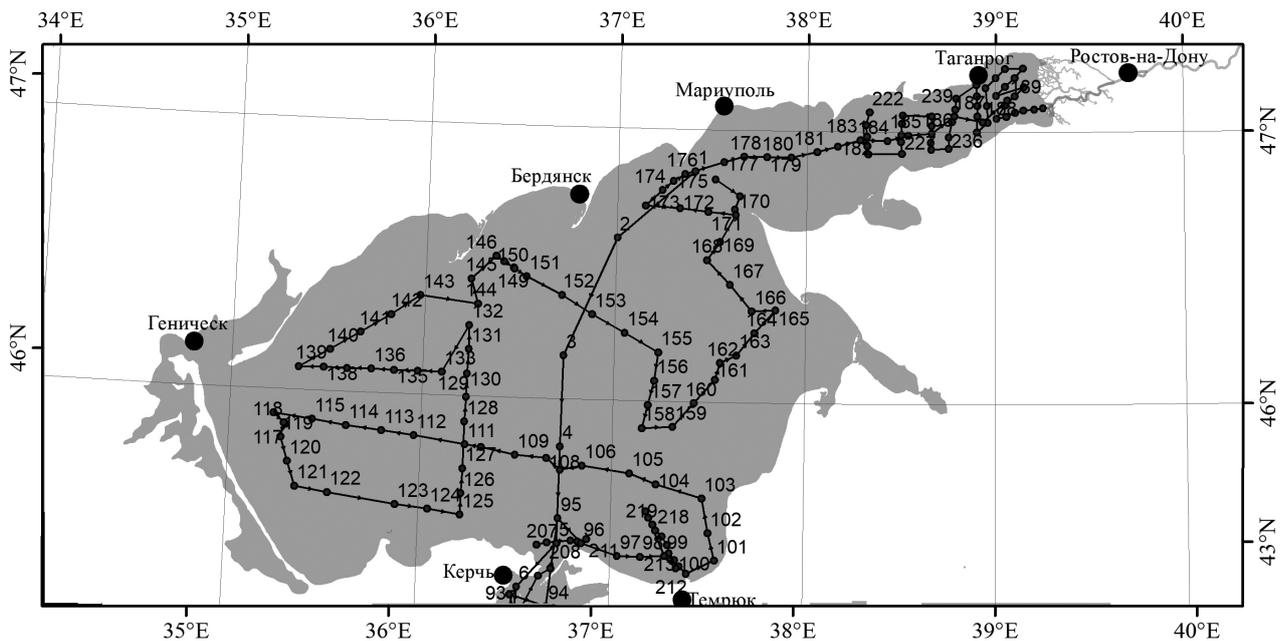


Рис. 1. Карта станций экспедиций на НИС «Днеб» в периоды 01.11.2023–14.11.2023 и 21.11.2023–01.12.2023

В ходе океанологической съемки во время первой экспедиции в Таганрогском заливе 13.11.2023 господствовал ветер западных румбов, дующий с силой 6–8 м/с. Условия умеренного шторма обусловили в результате концентрацию взвеси в воде на уровне 25–32 мг/л и снижение прозрачности вод до 0,5–0,6 м по белому диску.

Во время второй экспедиции, в период с 21.11.2023 по 01.12.2023, работы в которой совпали с прохождением через Азовское море сильного южного циклона и «шторма века» 27.11.2023, наблюдалась резкая смена ветровых условий и наблюдаемых концентраций взвеси с воде. Так, в начале на ст. 173, расположенной в Азовском море, в условиях умеренного северного ветра мутность в поверхностном горизонте составляла 6 мг/л, а прозрачность 1,5 м по белому диску, что близко

к значениям предыдущего рейса. Позже с усилением ветра и развитием трехбалльного шторма, концентрация взвеси в воде увеличилась до 60–80 мг/л.

В дальнейшем, при переходе в Таганрогский залив, ветер сменился на юго-западный и стал дуть с силой 5–8 м/с, что привело к взмучиванию вод в Таганрогском заливе и формированию полей мутности на уровне 35–50 мг/л в поверхностном слое, что несколько больше значений, зафиксированных в первой экспедиции. Позже, 27.11.2023, при прохождении «шторма века» и усилении ветра до 12–15 м/с, а волнения до 5–6 баллов (рис. 2) концентрация взвеси в поверхностном горизонте достигла значений 220–270 мг/л.

Значительно большие концентрации взвеси наблюдались нами в штормовых условиях в при-

брежной зоне. Так, во время проведения наблюдений 10.08.2023 на траверзе Сазальницкой косы при действии восточного ветра, дующего со скоростью 6–9 м/с в прибрежной зоне мутность достиг-

ла значений 657 мг/л, глубина на станции отбора проб составляла 1,5 м, скорость течения достигала 16 см/с (что формировало значительное сдвиговое напряжение в придонном горизонте).



**Рис. 2.** Состояние поверхности моря в районе Сазальницкой косы (место штормования к югу от ст. 185, 27.11.2023), характерное для штормовых условий

Стоит отметить, что по некоторым оценкам [5] обычный шторм на Азовском море взмучивает в толщу воды верхний слой осадков мощностью порядка 5 мм, на образование которого затрачивается около двух лет. Таким образом, предполагается, что поступающие в водоем и образующиеся в нем взвешенные вещества многократно подвергаются трансформации и минерализации в течение двух лет, прежде чем осесть на дно.

В своем исследовании, А.В. Михайленко и ее коллеги [6] отмечают возможность формирования верхнего слоя донных осадков в Таганрогском заливе, подверженного взмучиванию, с толщиной, достигающей 10 мм и более. Принимая во внимание объемный вес грунта, равный  $1,4 \text{ г/см}^3$ , было вычислено, что содержание взвешенных веществ при перемещении в водную толщу слоя осадка в 10 мм составит 3136 мг/л. Весьма значительная масса взвешенных веществ в воде залива была оценена приблизительно в 80,0 млн т. В работе [6] указывается, что шторм средней силы может привести к взмучиванию и переходу в водную толщу такого слоя осадков, который формировался в те-

чение 4–5 лет. Следовательно, при однократном выносе взвешенных веществ в открытую часть Азовского моря из Таганрогского залива через Должанский пролив во время шторма с северо-восточным ветром, может образоваться слой осадков толщиной около 1,9 мм.

В заключение стоит отметить, что комплексный подход к исследованию воздействия ветрового волнения на перенос взвешенных веществ предполагает помимо натуральных наблюдений использование современных методов исследования, таких как дистанционное зондирование, высокоточные измерения параметров волнения и компьютерное моделирование. Эти методы позволяют улучшить наше представление о взаимосвязи физико-химических процессов, происходящих под воздействием ветрового волнения, и переносе взвешенных веществ в различных слоях водной толщи.

Исследование этих вопросов позволит расширить теоретическое понимание экологических процессов в Азовском море, и на основании этих данных возможно будет создать базу для

разработки более эффективных стратегий управления морскими ресурсами и поддержания баланса в прибрежной зоне. Осознание важности воздействия ветрового волнения на перенос взвешенных веществ в этом регионе открывает новые перспективы для последующих исследований, направленных на сохранение и устойчивое развитие уникального морского бассейна Азовского моря.

*Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 123071900007-8 и 122011900153-9. При выполнении работ использовалось оборудование ЦКП ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)».*

#### Список литературы

1. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: МО РФ Центр «Истина», 1999. 370 с.
2. Курпин В.С. Процесс перемещения и отложения илистых наносов и его значение для заносимости морских каналов // Известия АН СССР. Сер.: География. 1956. № 2. С. 17–24.
3. Спичак М.К. Современный и будущий режим и продуктивность Азовского моря: дис. ... канд. географ. наук. Ростов-н/Д.: Рост. гос. ун-т, 1964. 335 с.
4. Ганичева Л.З. Закономерности седиментогенеза в Азовском море (взвеси и условия их образования): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов-н/Д.: Южгеология, 1985. 27 с.
5. Воловик С.П. и др. Экосистема Азовского моря: режим, продуктивность, проблемы управления. Ч. 1: Режим и продуктивность в период до зарегулирования стока рек: монография. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2008. 347 с.
6. Михайленко А.В., Федоров Ю.А., Доценко И.В. Тяжелые металлы в компонентах ландшафта Азовского моря. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2018. 214 с.

---

**STUDY OF THE EFFECT OF WIND WAVES  
ON THE TRANSPORT OF SUSPENDED SOLIDS IN THE SEA OF AZOV**

---

*A.V. Kleshchenkov, A.Yu. Moskovets*

Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don  
geo@ssc-ras.ru, alexazov@mail.com

---

**Abstract.** The article presents the results of studying the effect of wind waves on the transport of suspended solids in the Sea of Azov.

The purpose of this work was to analyze the effect of wind mixing on the concentration of suspended solids in the sea water column.

During the marine expeditions on the Deneb research vessel, which were conducted in the fall of 2023, significant changes in the concentration of suspended solids were observed. In conditions of moderate winds of 4–7 m/s in the central part of the sea, the concentration of suspended matter in the surface layer was in the range of 2–8 mg/l. With the development of storm conditions, the concentration of the suspension increased to almost 33 mg/l. In the Taganrog Bay, with a westerly wind blowing at a speed of 6–8 m/s, the concentration of the suspension reached 25–32 mg/l. During a strong storm, the concentration of suspended matter in the Taganrog Bay reached 220–270 mg/l.

Observations show that storms significantly increase the concentration of suspended solids in the water, especially in the coastal zone. In conditions of a strong easterly wind of 6–9 m/s, turbidity in the coastal zone was recorded at 657 mg/l, which is associated with high shear stress in the bottom horizon. The article concludes that there is a need for an integrated approach to the study of the effects of wind waves on the transport of suspended solids, which involves the use of modern methods such as remote sensing, high-precision measurements of wave parameters and computer modeling.

**Keywords:** suspended matter, the Sea of Azov, wind turbulence.

#### References

1. Fedorov Yu.A. 1999. *Stabil'nye izotopy i evolyutsiya gidrosfery*. [Stable isotopes and the evolution of the hydrosphere]. Moscow, Ministry of Defense of the Russian Federation Center "Truth": 370 p. (In Russian).
2. Kuprin V.S. 1956. [The process of movement and deposition of silty sediments and its significance for the drift of marine channels]. *Izvestia of the USSR Academy of Sciences, Geography series*. 2: 17–24. (In Russian).
3. Spichak M.K. 1964. *Sovremennyy i budushchiy rezhim i produktivnost' Azovskogo moray: dissertatsiya ... kandidata geograficheskikh nauk*. [The modern and future regime and productivity of the Sea of Azov. PhD Abstract (Geographic Sciences)]. Rostov-on-Don: Rostov State University Publ.: 335 p. (In Russian).
4. Gancheva L.Z. 1985. *Zakonomernosti sedimentogeneza v Azovskom more (vzvesi i usloviya ikh obrazovaniya)*. [Regularities of sedimentogenesis in the Sea of Azov (suspensions and conditions of their formation). PhD (Geological Sciences) Abstract]. Rostov-on-Don: Yuzhgeologiya Publ.: 27 p. (In Russian).
5. Volovik S.P. et al. 2008. *Ekosistema Azovskogo morya: rezhim, produktivnost', problemy upravleniya. Chast'. 1: Rezhim i produktivnost' v period do zaregulirovaniya stoka rek*. [The ecosystem of the Sea of Azov: regime, productivity, management problems. Part 1: Regime and productivity in the period before the regulation of river flow]. Krasnodar: Kuban State University. Publ.: 347 p. (In Russian).
6. Mikhaylenko A.V., Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V. 2018. *Tyazhelye metally v komponentakh landshafta Azovskogo morya*. [Heavy metals in the components of the landscape of the Sea of Azov]. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press: 214 p. (In Russian).