

## Особенности полей океанологических величин в заливе Сиваш (Азовское море)

П. Д. Ломакин

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
*p\_lomakin@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2021 г., после доработки – 28.04.2021 г.

*Цель.* Выявить закономерности структуры и изменчивости полей температуры, солёности, концентрации окрашенного растворенного органического вещества, концентрации общего взвешенного вещества и формирующие их факторы в заливе Сиваш; сопоставить полученный результат с известными свойствами полей исследуемых величин, типичными для прибрежной зоны Азово-Черноморского бассейна; оценить отклик в рассматриваемых полях на перекрытие Северо-Крымского канала – цель настоящей работы.

*Методы и результаты.* На основе данных 8 экспедиций, проведенных Морским гидрофизическим институтом в 2013–2016 гг., раскрыты закономерности структуры и изменчивости полей температуры, солёности, концентрации окрашенного растворенного органического вещества, концентрации общего взвешенного вещества и выявлены факторы, формирующие поля этих величин в заливе Сиваш. Приведены количественные показатели изменений в полях рассмотренных величин, которые возникли после перекрытия Северо-Крымского канала.

*Выводы.* В исследуемом регионе выявлен ряд постоянно действующих факторов, определяющих формирование особых, не типичных для прибрежных морских акваторий свойств полей океанологических величин. Это влияние вод Азовского моря и Северо-Крымского канала; реки, впадающие в западный берег Сиваша; изолированные озера, заболоченные мелководные заливы, изолированные относительно приглубые участки береговой линии. Через три года после перекрытия Северо-Крымского канала в северо-западной части Сиваша солёность увеличилась на 20 ЕПС. Подтверждено мнение о том, что Сиваш – не типичный морской залив, а сообщающийся с Азовским морем водоем с признаками соляного болота.

**Ключевые слова:** температура, солёность, окрашенное растворенное органическое вещество, общее взвешенное вещество, залив Сиваш, Северо-Крымский канал, Азовское море

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

**Для цитирования:** Ломакин П. Д. Особенности полей океанологических величин в заливе Сиваш (Азовское море) // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 696–709. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-696-709

# Features of the Oceanological Values Fields in the Sivash Bay (The Sea of Azov)

P. D. Lomakin

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
p\_lomakin@mail.ru*

*Purpose.* The study is aimed at revealing the structural regularities and variability of the fields of temperature, salinity, the colored dissolved organic matter and total suspended matter concentrations, and also the factors that form them in the Sivash Bay. Besides, the results obtained are to be compared with the already known features of the fields of the values under investigation which are typical of the Azov-Black Sea coastal zone; and the response in the considered fields to the North Crimean Canal damming is to be assessed.

*Methods and Results.* Based on the data of 8 expeditions carried out by Marine Hydrophysical Institute in 2013–2016, the structural regularities and variability of the fields of temperature, salinity, the colored dissolved organic matter and total suspended matter concentrations, and the factors that form the fields of these values in the Sivash Bay were revealed. The quantitative indicators of changes in the fields of the considered values, which arose after the North Crimean Canal was dammed, are represented.

*Conclusions.* In the region under study, a number of constantly acting factors that determine formation of special, not typical of the coastal area, features of the oceanological values fields are identified, namely: the influence of the Azov Sea and the North Crimean Canal waters, the rivers inflowing to the water area of the Sivash western coast, the isolated lakes, the swampy shallow bays and the isolated, relatively deep, parts of the coastline. Three years after the North Crimean Canal was dammed, in the northwestern Sivash salinity increased by 20 PSU. The opinion that Sivash is not a typical sea bay, but a connected with the Azov Sea reservoir with the signs of a salt swamp is confirmed.

**Keywords:** temperature, salinity, colored dissolved organic matter, total suspended matter, Sivash Bay, North Crimean Canal, Sea of Azov

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0005 “Comprehensive interdisciplinary studies of oceanological processes which determine functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black and Azov seas”.

**For citation:** Lomakin, P.D., 2021. Features of the Oceanological Values Fields in the Sivash Bay (The Sea of Azov). *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(6), pp. 647-659. doi:10.22449/1573-160X-2021-6-647-659

## Введение

Прибрежные водно-болотные угодья представляют собой ценные экосистемы, которые обеспечивают среду обитания для многочисленных морских и наземных видов животных и растений, улучшают качество вод, стабилизируют береговую линию, препятствуют затоплению прибрежных районов, усваивают атмосферный углерод [1–5]. К подобным угодьям и экосистемам, по-видимому, можно отнести залив (озеро) Сиваш – уникальный водоем Азово-Черноморского бассейна, отличающийся экстремально высокой соленостью и особым гидрологическим режимом, с признаками моря и соляного болота, который недостаточно изучен с точки зрения океанологии.

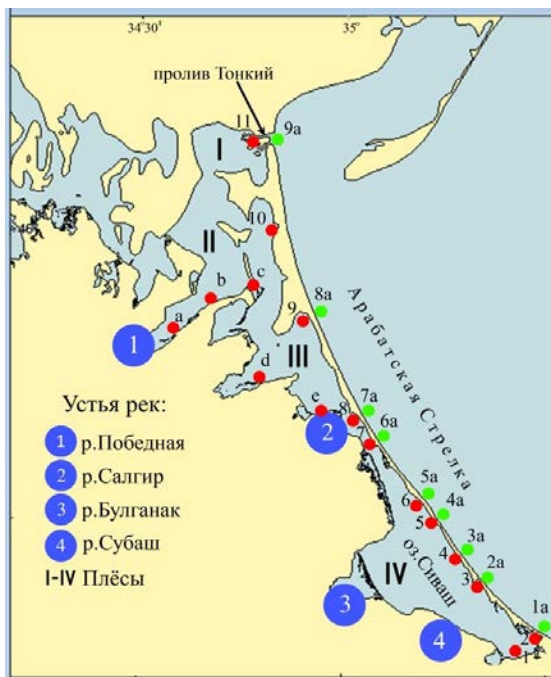
Сиваш – узкий изолированный мелководный залив, расположенный вдоль западного берега Азовского моря. От моря он отделен меридионально ориентированной косой – Арабатской Стрелкой. В северо-восточной части, у Геническа, Сиваш соединен с Азовским морем проливами Тонкий и Ара-

батский. Иногда Сиваш называют Гнилым морем, включающим систему лагун и болот, которая отделяет Крымский п-ов от материка [6] (рис. 1).

Цель настоящей работы заключалась в следующем: раскрыть закономерности структуры и изменчивости полей температуры, солёности, концентрации окрашенного растворенного органического вещества (РОВ) и концентрации общего взвешенного вещества (ОВВ) в заливе Сиваш; определить источники поступления РОВ в залив, а также места осаждения этого вещества; рассчитать и проанализировать корреляционную зависимость содержания РОВ от солёности для Сиваша и Азовского моря; оценить временные вариации в полях этих величин, которые обусловлены перекрытием Северо-Крымского канала.

### Исходные данные и методы исследования

Для анализа использованы данные 8 экспедиций, проведенных Морским гидрофизическим институтом в прибрежной области озера Сиваш в 2013–2016 гг. Экспедиции 2013 г. выполнены до перекрытия Северо-Крымского канала (рис. 1).



**Р и с. 1.** Рассматриваемая акватория с сеткой станций: 1–11 – станции вдоль западного берега Арабатской Стрелки; 1a – 9a – станции в Азовском море

**F i g. 1.** The investigated water area with a grid of stations: 1–11 are the stations along the western coast of the Arbat Spit; 1a – 9a are the stations in the Sea of Azov

В ходе первой экспедиции (июнь 2013 г.) в восточной части Сиваша, вдоль Арабатской Стрелки (протяженность 112 км), были выполнены прибрежные наблюдения (включавшие 11 станций) от крайней южной точки (хутор Львов) до пролива Тонкий на севере. Аналогичные наблюдения (9 стан-

ций) были проведены вдоль восточного берега Арабатской Стрелки в Азовском море. В октябре 2013 г. и в июне и октябре 2014–2016 гг. наблюдения велись в северо-западной части исследуемого региона на 5 станциях. Их выбор определялся физико-географическими и гидрологическими особенностями, свойственными прибрежной зоне Сиваша. Станция *a* располагалась в речной части устья р. Победная, станции *b* и *c* – в морской области устьев рек Победная и Салгир, станции *d* и *e* – между заболоченными устьями этих рек, вдоль открытого участка береговой линии (рис. 1).

На всех станциях измерялись температура воды, соленость, концентрация ОВВ и содержание окрашенного РОВ. Данные параметры синхронно фиксировались при помощи оптического биофизического зондирующего комплекса «Кондор» (комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный, URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeterkondor>).

Определение содержания ОВВ и РОВ основано на оптических методах, реализованных в измерительном комплексе «Кондор». Рассматривалась флюоресцирующая составляющая РОВ – окрашенное растворенное органическое вещество, которое в англоязычной литературе имеет стандартную аббревиатуру *fDOM* (*colored dissolved organic matter*). Размерность этой величины представлена в единицах калибровки – сульфат хинина (*QSU*) [7, 8].

Поскольку диапазон глубин не превышал 1 м, зонд использовался в «точечном» режиме. Для этого датчики прибора помещались в сосуд с отобранными пробами воды.

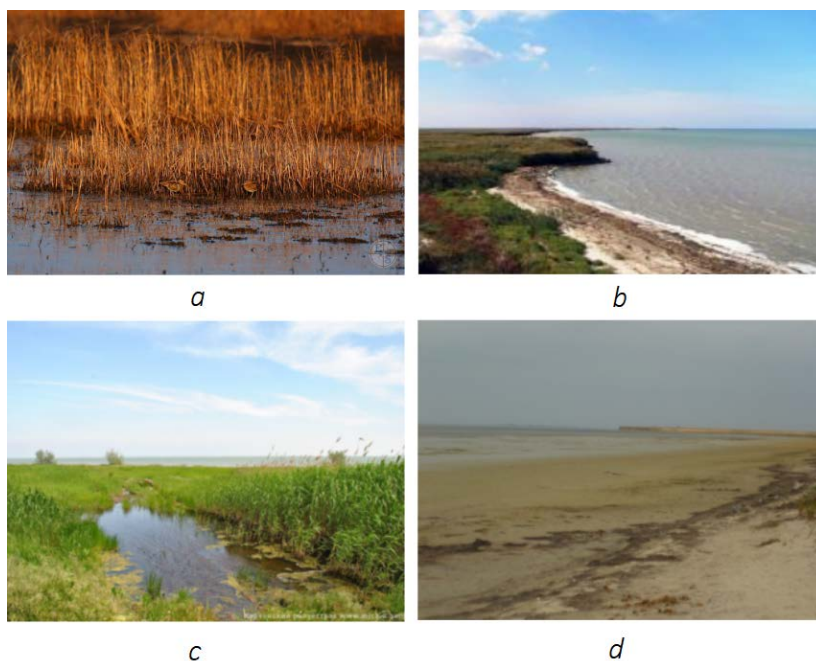
### Обсуждение результатов

Рассмотрим некоторые физико-географические и морфометрические особенности исследуемого региона, сведения о которых использованы при интерпретации данных экспедиционных исследований.

Берега Сиваша преимущественно низкие, пологие, топкие, летом покрываются солью. Дно представляет собой слой ила толщиной до 5 м и более. Водное зеркало анализируемой акватории разделено четырьмя относительно изолированными водоемами – плесами. Плесы I, II, III разграничены отмелями, цепочками островков, косами, мысами. Граница между плесами III и IV представлена самым узким участком рассматриваемой акватории – Шокалинским сужением (рис. 1).

Прибрежная зона Сиваша отличается разнообразием ландшафтов и морфометрическими особенностями, которые не свойственны открытому побережью Азово-Черноморского бассейна (рис. 2). Это определяет особую структуру полей океанологических элементов в прибрежных водах залива Сиваш, характеризуемую ярко выраженными неоднородностями [9, 10].

Выявлен ряд постоянно действующих факторов, которые способствуют формированию особых свойств полей океанологических величин на исследуемой акватории. Это наиболее масштабные (~ 100 км) факторы, воздействие которых распространяется на весь залив. Они связаны с влиянием вод Азовского моря, проникающих в Сиваш через проливы Тонкий и Арабатский, а также вод Северо-Крымского канала, запущенного в эксплуатацию в 1971 г. и перекрытого в 2014 г.



**Р и с. 2.** Характерные участки побережья залива Сиваш: *a* – заболоченная речная дельта у западного берега Сиваша; *b* – участок западного берега с относительно приглубым ракушечным дном; *c* – озеро в плавнях Арабатской Стрелки; *d* – прибрежная акватория плеса у Арабатской Стрелки (URL: <https://www.photoukraine.com/russian/articles?id=242>)

**Fig. 2.** Typical areas of the Sivash Bay coast: *a* – swampy river delta off the Sivash western coast; *b* – a part of the western coast with a relatively deep shell bottom; *c* – lake in the floodplains of the Arabat Spit; *d* – coastal water area of the reach near the Arabat Spit (URL: <https://www.photoukraine.com/russian/articles?id=242>)

К менее масштабным (от ~ 100 м до 10–30 км), но значимым факторам могут быть отнесены впадающие в акваторию вдоль западного берега Сиваша реки; изолированные озера в плавнях; расположенные на периферии плесов заболоченные мелководные заливы и изолированные участки береговой линии с относительно приглубым берегом.

По морфометрическим характеристикам и гидрологическому режиму западный берег Сиваша существенно отличается от восточного. В акваторию западной части залива Сиваш впадают крымские реки Победная, Салгир, Булганак, Субаш [9] (рис. 1). Заболоченные и поросшие густыми зарослями камыша и ивняка устья этих речек и прилегающие к ним участки берега представляют собой обширные соляные болота. Они мелководны (0,1–0,3 м), с покрытыми слоем ила черного цвета берегами и дном (рис. 2, *a*).

Болота западного Сиваша разделены обрывистыми, сложенными преимущественно из глинистых пород и покрытыми степной растительностью участками береговой линии. Берег здесь относительно приглубый (0,5–0,8 м), с ракушечным дном (рис. 2, *b*).

Восточный берег залива Сиваш (западный берег Арабатской Стрелки), вдоль которого в июне 2013 г. были выполнены наблюдения (рис. 1), по фи-

зико-географическим условиям отличен от западного берега. Он не заболочен, берега и дно здесь преимущественно песчано-ракушечные [10].

Для восточного берега Сиваша характерны две прибрежные области с различными физико-географическими условиями и свойствами полей анализируемых величин. Берега южной узкой (ширина ~ 300 м) части Арабатской Стрелки покрыты густыми зарослями камыша (плавни). Далее к северу, вдоль берега широкой (7,5 км) части Арабатской Стрелки находится мелководный залив, представляющий собой восточную периферию плеса II (рис. 2, *d*), а на восточной периферии акватории самого северного плеса I – проливы Тонкий и Арабатский (рис. 1).

Плавни у южной части Арабатской Стрелки имеют ширину ~ 0,1–1,5 км. Здесь в зарослях камыша расположен ряд небольших озер глубиной 0,8–1,5 м и диаметром от нескольких десятков до ~ 100 м, которые в разной степени изолированы от берега и основного водного зеркала (рис. 2, *c*). Вероятно, озера или часть из них – бывшие песчаные карьеры. Это самые глубокие, до 1,5 м, места всей исследуемой прибрежной зоны, отличающиеся особыми свойствами анализируемых величин.

*Температура воды* – наиболее изменчивый в пространстве и времени (из всех рассматриваемых) параметр среды. Изолированность береговых участков, их различная глубина, цвет дна, альbedo и поглощательная способность солнечной радиации в условиях ограниченного горизонтального обмена обуславливают значительные пространственные неоднородности поля температуры воды у берегов Сиваша.

За все время наблюдений на западном берегу Сиваша в заливе с относительно приглубым берегом и ракушечным дном, между устьями речек Победная и Салгир (ст. *d*), постоянно фиксировался локальный минимум температуры. За счет высокого альbedo и большей глубины температура воды здесь была на 0,4–2,3°C ниже, чем в расположенных к северу (ст. *b*) и югу (ст. *e*) мелководных покрытых черным илом приустьевых участках (рис. 1).

На восточном берегу Сиваша также в результате разной поглощательной способности солнечной радиации выделялись два участка береговой линии с различным температурным режимом – плавни на юге с пониженной температурой воды 24–28°C и перегретая прибрежная зона плесов у северной части Арабатской Стрелки с высокой температурой воды 32–35°C (по наблюдениям в июне 2013 г., рис. 1, 2).

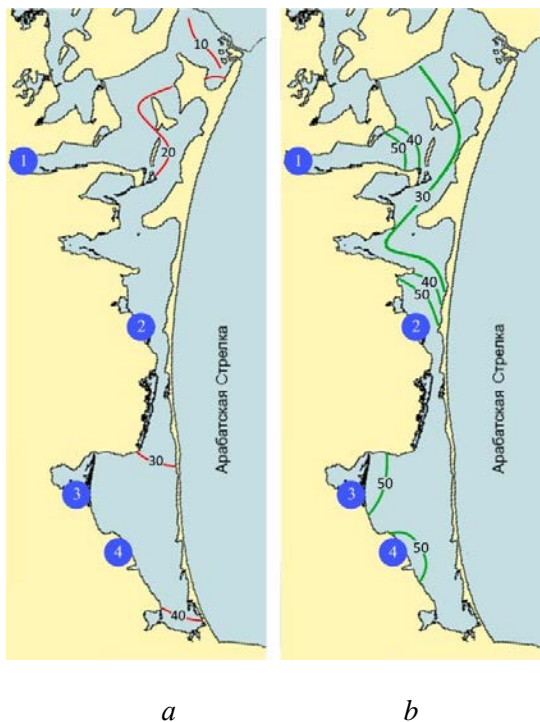
Суточные колебания температуры воды в прибрежных водах Сиваша более интенсивны по сравнению с морскими прибрежными акваториями. Летом размах суточных колебаний достигал 4–6°C. Температурный минимум фиксировался утром (06:00–07:00), максимум – в послеполуденное время (14:00–15:00). Согласно [11], в Азовском и Черном морях суточные колебания температуры воды менее значительны, их максимальный размах 2–3°C наблюдался на горизонте 0,2 м в весенне-летний период.

Качественный анализ имеющейся в нашем распоряжении небольшой по объему выборки наблюдений показал, что временные вариации температуры воды содержали межгодовую, сезонную, синоптическую и суточную составляющие. В июне – июле прибрежные воды Сиваша отличались высокой температурой: в 2013 г. она изменялась в интервале 24,3–35,2°C, в 2016 г. – ха-

рактировалась относительно низкими значениями 25,0–27,9°C. В октябре 2014 и 2016 гг. соответствующие показатели равнялись 16,1–17,8°C и 8,4–8,9°C.

*Поля солености и концентрации  $fDOM$ .* В прибрежных водах океанов и морей соленость и  $fDOM$  – взаимосвязанные величины, обладающие консервативными свойствами, которые относят к хорошим индикаторам распространения материкового стока на открытых акваториях [12–17]. Поэтому анализ полей этих величин выполнен во взаимосвязи.

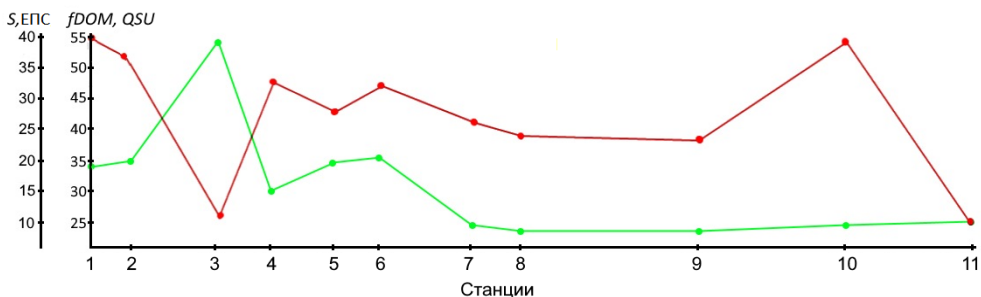
На рис. 3 представлены поля горизонтального распределения солености и содержания  $fDOM$  для исследуемой акватории, которые получены по данным двух экспедиций, проведенных в июне и октябре 2013 г., до перекрытия Северо-Крымского канала. Правомерность объединения в одну схему полученных с разницей в четыре месяца эмпирических данных основана на свойстве консервативности, которое присуще как солености, так и  $fDOM$  [12]. При построении схем были исключены данные наблюдений вдоль берега Арабатской Стрелки на двух станциях (ст. 3 и 10, рис. 4), которые отличались экстремальными значениями и выпадали из общей тенденции роста солености и концентрации  $fDOM$  в южном направлении. Анализ этих локальных особенностей приведен ниже.



**Р и с. 3.** Распределение солености, ЕПС, (а) и содержания  $fDOM$ ,  $QSU$ , (b) на поверхности залива Сиваш в июне – октябре 2013 г. до перекрытия Северо-Крымского канала (обозначения см. на рис. 1)

**F i g. 3.** Distribution of salinity, PSU (a) and content of  $fDOM$ ,  $QSU$ , (b) on the surface of the Sivash Bay in June – October, 2013 before the North Crimean Canal was dammed (see designations on Fig. 1)





**Р и с. 4.** Распределение солёности, ЕПС, (красная линия) и концентрации  $fDOM$ ,  $QSU$ , (зеленая линия) вдоль западного берега Арабатской Стрелки в июне 2013 г.

**F i g. 4.** Distribution of salinity, PSU, (red line) and concentration of  $fDOM$ ,  $QSU$ , (green line) along the western coast of the Arabat Spit in June, 2013

После исключения особых точек с экстремумами солёности и концентрации  $fDOM$  были получены «гладкие» распределения исследуемых величин на поверхности, которые легко интерпретируются, и, по-видимому, адекватно отражают состояние вод залива до перекрытия Северо-Крымского канала. Они также позволяют выявить основные факторы и источники, формирующие структуру рассматриваемых полей в Сиваше.

До перекрытия Северо-Крымского канала солёность в Сиваше увеличивалась в направлении с севера на юг от 10 ЕПС у пролива Тонкий до 40 ЕПС в районе наиболее удаленного изолированного плеса IV. Максимальное распреснение (10–20 ЕПС, рис. 3, *a*) испытывала северо-западная часть залива, где располагался пункт сброса днепровской воды. Западный берег Сиваша распреснялся поливными водами, которые дренировались с орошаемых земель, рисовых чеков и прудов пяти крупных рыбоводческих хозяйств.

Одна из особенностей поля солёности в заливе Сиваш – отсутствие признаков распресняющего эффекта в речных устьях. За все время в устьях речек Победная и Салгир, в непосредственной близости к стене камыша, линзы распресненной воды, типичные для устьев впадающих в моря рек, не наблюдались. От устья р. Победная до устья р. Салгир солёность плавно увеличивалась (рис. 3, *a*).

Вместе с тем влияние стока указанных речек отчетливо проявлялось у западного берега Сиваша в поле концентрации  $fDOM$ . Ниже показано, что речной сток – основной источник, обеспечивающий поступление растворенного органического вещества в Сиваш, которое оседает в устьевых зонах на западе исследуемой акватории, формируя основные максимумы (52–57  $QSU$ ) в крупномасштабном поле концентрации этого вещества. Минимальная концентрация фонового поля  $fDOM$  характерна для западной части залива Сиваш. В проливе Тонкий и прилегающем к нему с юга мелководном заливе плеса II, как и на смежной акватории Азовского моря, содержание  $fDOM$  не превышало 25–27  $QSU$  (рис. 3, *b*). Более наглядно это видно на рис 4.

В октябре 2013 г. у морской кромки устья р. Победная (ст. *b*) и устья р. Салгир (ст. *e*) в непосредственной близости к стене камыша наблюдались абсолютные максимумы концентрации данной величины в заливе Сиваш, равные 56 и 52–57  $QSU$  соответственно. На относительно приглублых участ-



ках между устьями р. Победная и Салгир содержание  $fDOM$  было пониженным, 37–40  $QSU$  (рис. 1; 3, *b*). Аналогичная структурная особенность, но с более низкой фоновой концентрацией  $fDOM$  сохранялась в 2014–2016 гг.

По данным за октябрь 2013 г., в устье р. Победная в поле содержания  $fDOM$  обнаружен мощный фронтальный раздел протяженностью  $\sim 7$  км с концентрацией на границах 510  $QSU$  (ст. *a*) и 56  $QSU$  (ст. *b*) и горизонтальным градиентом 65  $QSU/км$ . Судя по разности концентрации  $fDOM$  на границах фронта, в устье р. Победная оседает до 90% этого вещества, содержащегося в речной воде.

Скачкообразное уменьшение содержания  $fDOM$  на границах устья р. Победная является одним из основных признаков естественного маргинального фильтра – барьерной зоны, на которой осаждается значительное количество содержащихся в речной воде взвешенных и растворенных веществ как естественного, так и антропогенного происхождения [18–21]. По-видимому, маргинальные фильтры с аналогичными параметрами существуют в устьях других речек (Салгир, Булганак, Субаш), которые впадают в акваторию вдоль западного берега залива Сиваш. К сожалению, в речной части устьев этих речек нет наблюдений.

Наблюдения, выполненные в северо-западной части Сиваша в 2014–2016 гг., позволили оценить изменения в полях анализируемых величин, которые были вызваны перекрытием Северо-Крымского канала в июне 2014 г. В частности, в поле солености отслежен быстрый отклик на прерывание подачи днепровской воды в Северо-Крымский канал. Тенденция резкого роста солености в водах северо-западной части Сиваша была обнаружена уже по результатам первой после перекрытия канала экспедиции в июне 2014 г. Средняя для этой части акватории Сиваша соленость в 2014 г. равнялась 31 ЕПС. По сравнению с 2013 г. она увеличилась на 14 ЕПС. В 2015 г. скорость прироста солености снизилась до 5 ЕПС за год, и к концу этого года она достигла 36 ЕПС. В 2016 г. рост солености замедлился до  $\sim 1$  ЕПС за год. Через три года после перекрытия Северо-Крымского канала соленость вод на рассматриваемом участке увеличилась с 17 до 37 ЕПС.

После перекрытия канала, которое сопровождалось ростом солености, средняя концентрация  $fDOM$  на северо-западе Сиваша, равная в 2013 г. 40–50  $QSU$ , снизилась до 24–36  $QSU$ .

Вернемся к ряду наблюдений вдоль западного берега Арабатской Стрелки (рис. 4), из которого для построения крупномасштабных фоновых полей солености и концентрации  $fDOM$  была изъята информация по ст. 3 и 10.

Распределение солености и концентрации  $fDOM$  на рассматриваемом участке выявляет основную закономерность меридиональной структуры полей этих характеристик в заливе Сиваш. Если не учитывать явно выпадавшие из общей тенденции данные ст. 3 и 10, то виден рост обеих величин от пролива Тонкий к южной области залива (плес IV, рис. 1).

Зафиксированные на ст. 3 и 10 экстремумы – не случайность. Они отражают реальное состояние вод особых участков береговой линии и подтверждают разнообразие свойств полей океанологических величин в заливе Сиваш.

На ст. 3, выполненной в плавнях у Арабатской Стрелки в одном из изолированных озер (рис. 1; 2, *c*), отмечена минимальная на общем фоне соленость 11 ЕПС и максимальная концентрация  $fDOM$  55  $QSU$ . Соленость на расположенных рядом станциях равнялась 37 и 33 ЕПС, концентрация  $fDOM$  – 35 и 31  $QSU$  (рис. 4).

Зафиксированная в озере низкая соленость может быть связана с интенсивными дождями, которые предшествовали и сопровождали экспедиционные исследования. Также озера, вероятно, могут подпитываться грунтовыми водами [10]. Высокая концентрация  $fDOM$  в озерах обусловлена особыми гидрохимическими и гидробиологическими условиями, присущими столь редким по своей природе водоемам.

Станция 10 выполнена на берегу вытянутого в меридиональном плане мелководного (0,1–0,2 м) с плоским дном залива, который с юга ограничен мысом, с севера – полуостровом Генический Кут, с запада – цепочкой островов и отмелей (плес II, рис. 1; 2, *d*).

В результате высокой поглощательной способности солнечной радиации, при низком альбедо (илистые берега и дно темно-коричневого цвета), воды залива максимально прогреты и осолонены. Температура воды в июне достигала 33–35°C. За счет локального интенсивного испарения соленость вод на 10–29 ЕПС была выше по сравнению с расположенными рядом станциями (рис. 4).

Несмотря на аномально высокие значения термохалинных индексов, концентрация  $fDOM$  в водах этого залива равнялась 25  $QSU$  и не отличалась от фонового содержания анализируемого вещества в прибрежных водах у северо-восточной части Арабатской Стрелки (ст. 7–11, рис. 4).

Векторы горизонтального градиента в полях обеих величин имели хорошо выраженную направленную на юг составляющую, что на качественном уровне свидетельствует об отсутствии в водах Сиваша отрицательной связи между соленостью и концентрацией  $fDOM$ , которая свойственна морской среде (рис. 3, 4).

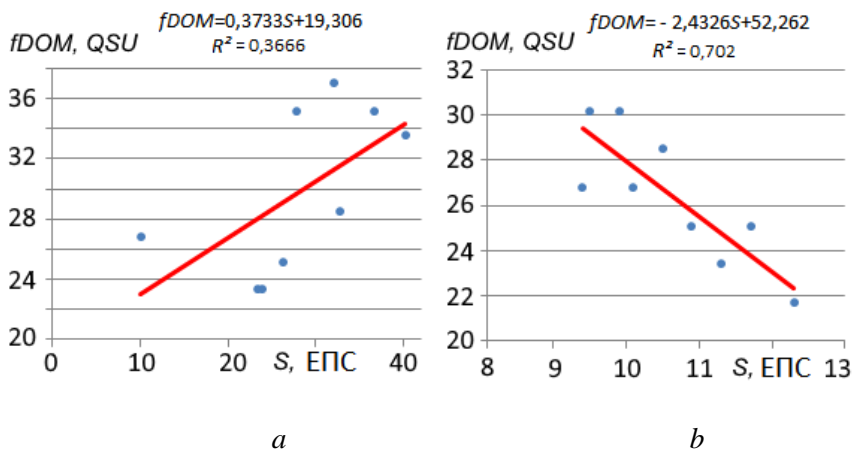
На количественном уровне эта связь продемонстрирована на рис. 5, *a*, где показана прямая корреляционная зависимость  $fDOM(S)$ , рассчитанная по результатам наблюдений вдоль Арабатской Стрелки для Сиваша в июне 2013 г. Данные ст. 3 и 10, отражающие особые свойства на локальных участках береговой линии, из исходной выборки исключены (рис. 4).

Видно, что в водах залива Сиваш между соленостью и концентрацией  $fDOM$  наблюдается не типичная для моря прямая корреляционная зависимость с коэффициентом  $R = 0,61$  (рис. 5, *a*).

В Азовском море корреляционная связь  $fDOM(S)$  обратная и тесная,  $R = -0,84$ . Вдоль Арабатской Стрелки в Азовском море соленость увеличивалась в южном направлении от 9,4 ЕПС в районе пролива Тонкий до 12,2 ЕПС на юге моря, при этом концентрация  $fDOM$  снижалась от 27–30  $QSU$  до 22  $QSU$  (рис. 5, *b*).

Распресненным материковым стоком шельфовым водам океанов и морей свойственна тесная обратная корреляционная зависимость концентрации растворенного органического вещества от солености и  $fDOM(S)$  с коэффициентом  $R = -0,68 \dots -0,95$  [12–18]. То есть в Азовском море рассматриваемые

величины связаны типичной для морской среды зависимостью, тогда как для вод Сиваша корреляционная зависимость  $fDOM(S)$  качественно отлична.



**Р и с. 5.** Графики корреляционной зависимости концентрации  $fDOM$  от солёности: *a* – для залива Сиваш; *b* – для Азовского моря

**F i g. 5.** Graphs of correlation dependence of the  $fDOM$  concentration on salinity: *a* – in the Sivash Bay; *b* – in the Sea of Azov

*Поле концентрации ОВВ.* Воды Сиваша отличаются необычными свойствами поля концентрации ОВВ. Эта величина в основном определяется малыми глубинами, характером грунта и ветром. В условиях маловетрия и в штилевую погоду воды залива прозрачны и содержат 1–2 мг/л ОВВ. Поле этой величины очень быстро реагирует на усиление ветра, и при умеренном ветре концентрация ОВВ достигает 40–42 мг/л, а воды приобретают бурый цвет. Для сравнения: согласно наблюдениям МГИ, характерная концентрация ОВВ в черноморских водах у берегов Крыма при слабом и умеренном ветре составляет не более 0,8–2,0 мг/л.

### Заключение

На основе данных 8 экспедиций, проведенных Морским гидрофизическим институтом в 2013–2016 гг., выявлены факторы, формирующие поля температуры, солёности, концентрации  $fDOM$  и ОВВ в заливе Сиваш. Проанализированы закономерности структуры полей этих величин, рассмотрена корреляционная зависимость между солёностью и содержанием  $fDOM$ . Отслежен отклик в полях солёности и концентрации  $fDOM$  на перекрытие Северо-Крымского канала.

В исследуемом регионе выявлен ряд постоянно действующих факторов, определяющих формирование особых, не типичных для прибрежных морских акваторий, свойств полей океанологических величин. К ним относятся: влияние вод Азовского моря, которые проникают в Сиваш через проливы Тонкий и Арабатский; воды Северо-Крымского канала (до момента его перекрытия); впадающие в акваторию вдоль западного берега Сиваша реки; изолированные озера в плавнях; расположенные на периферии плесов заболо-

ченые мелководные заливы и изолированные относительно приглубые участки береговой линии. Масштаб воздействия обнаруженных факторов в полях рассмотренных величин – от 100 м до размеров всей акватории залива Сиваш 10–100 км.

Поле температуры воды характеризовалось существенной пространственной неоднородностью. На западном берегу Сиваша в заливе с относительно приглубым берегом и ракушечным дном, между устьями речек Победная и Салгир, постоянно фиксировался локальный минимум температуры. За счет высокого альбедо и большей глубины температура воды здесь была на 0,4–2,3°C ниже температуры расположенных к северу и югу мелководных покрытых черным илом приустьевых участков. На восточном берегу Сиваша также в результате различной поглотительной способности солнечной радиации выделялись два участка береговой линии с разным температурным режимом – плавни на юге с пониженной температурой воды 24–28°C и перегретая прибрежная зона плесов у северной части Арабатской Стрелки с высокой температурой воды 32–35°C. Суточные колебания температуры воды в прибрежных водах Сиваша более интенсивны по сравнению с морскими прибрежными акваториями. Летом их размах достигал 4–6°C.

Установлено, что до перекрытия Северо-Крымского канала, в июне – октябре 2013 г., соленость в Сиваше увеличивалась с севера на юг от 10 ЕПС в районе пролива Тонкий до 40 ЕПС на юге, в районе наиболее удаленного плеса IV. Максимальное распреснение испытывала северо-западная часть залива, где располагался пункт сброса днепровской воды. Через три года после перекрытия Северо-Крымского канала соленость вод на северо-западе Сиваша увеличилась от 17 до 37 ЕПС.

Основное поступление *fDOM* в Сиваш обеспечивает сток четырех речек. Данное вещество оседает в устьевой зоне, формируя максимумы концентрации 52–57 *QSU* у западного берега залива. Устье р. Победная представляет собой естественный маргинальный фильтр, на котором задерживается до 90% *fDOM*, содержащегося в речной воде. Минимальная концентрация фонового поля *fDOM* характерна для северо-восточной части Сиваша. В проливе Тонкий, как и на смежной акватории Азовского моря, содержание *fDOM* не превышало 25–27 *QSU*.

Локальный максимум концентрации *fDOM* 55 *QSU* при низкой солености 11 ЕПС зафиксирован у восточного берега Сиваша в водах изолированного озера. Ряд подобных озер расположен в плавнях у южной части Арабатской Стрелки.

Показано, что в водах залива Сиваш соленость и концентрация *fDOM* связаны не свойственной морской среде прямой корреляционной зависимостью с коэффициентом  $R = 0,61$ . В примыкающей к Сивашу западной части Азовского моря корреляционная связь  $fDOM(S)$  – обратная ( $R = -0,84$ ), характерная для распресненных материковым стоком прибрежных вод океанов и морей.

Поле концентрации ОБВ в основном определяется мелководностью залива Сиваш, характером грунта и ветром. В условиях маловетрия и в штилевую погоду воды залива прозрачны и содержат 1–2 мг/л ОБВ. Поле этой ве-

личины очень быстро реагирует на усиление ветра, и при умеренном ветре ее концентрация достигает 40–42 мг/л.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Changes in the global value of ecosystem services / R. Constanza [et al.] // *Global Environmental Change*. 2014. Vol. 26. P. 152–158. doi:10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002
2. *Kennish M. J.* Coastal Salt Marsh Systems in the U.S.: A Review of Anthropogenic Impacts // *Journal of Coastal Research*. 2001. Vol. 17, iss. 3. P. 731–748. URL: <https://www.jstor.org/stable/4300224> (date of access: 12.10.2021).
3. Coastal Salt Marsh. Multi-Species Recovery Plan for South Florida. P. 3-583–3-596. URL: <https://www.fws.gov/verobeach/MSRPPDFs/SaltMarsh.pdf> (date of access: 12.10.2021).
4. *Reed D. J.* The impact of sea-level rise on coastal salt marshes // *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 1990. Vol. 14, iss. 4, P. 465–481. doi:10.1177/030913339001400403
5. European salt marshes diversity and functioning: The case study of the Mont Saint-Michel bay, France / J.-C. Lefeuvre [et al.] // *Wetland Ecology and Management*. 2000. Vol. 8. P. 147–161. doi:10.1023/A:1008440401950
6. *Понизовский А. М.* Соляные ресурсы Крыма. Симферополь : Крым, 1965. 163 с.
7. *Stedmon C. A., Markager S., Bro R.* Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy // *Marine Chemistry*. 2003. Vol. 82, iss. 3–4. P. 239–254. doi:10.1016/S0304-4203(03)00072-0
8. *Ji Z.-G.* Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons Inc., 2017. P. 379–419. doi:10.1002/9781119371946.ch10
9. *Совга Е. Е., Ерёмкина Е. С., Дьяков Н. Н.* Система экологического мониторинга залива Сиваш в современных условиях // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. Вып. 2. С. 22–38. doi:10.22449/2413-5577-2018-2-22-38
10. *Стацук М. Ф., Супрычев В. А., Хитрая М. С.* Минералогия, геохимия и условия формирования донных отложений Сиваша. Киев : Наукова думка, 1964. 174 с.
11. *Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В.* Сезонный и суточный ход температуры вод Черного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буев // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 5. С. 268–281. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281
12. *Пугач С. П., Питко И. И.* Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточно-Сибирского моря // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 447, № 6. С. 671–674. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18448015> (дата обращения: 13.10.2021).
13. Organic matter along longitudinal and vertical gradients in the Black Sea / D. Kaiser [et al.] // *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2017. Vol. 129. P. 22–31. doi:10.1016/j.dsr.2017.09.006
14. Development of under-ice stratification in Himmerfjärden bay, North-Western Baltic proper, and their effect on the phytoplankton spring bloom / E. Kari [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2018. Vol. 186. P. 85–95. doi:10.1016/j.jmarsys.2018.06.004
15. Ocean color satellite-derived salinity using colored dissolved organic matter (CDOM) in river-influenced region / H. Sasaki [at al.] // *Journal of the Japan Society for Marine Surveys and Technology*. 2013. Vol. 25, iss. 2. P. 13–18. doi:10.11306/jsmst.25.2\_13
16. Relationships between dissolved organic carbon (DOC) and water mass structures in the Ionian Sea (winter 1999) / A. Seretti [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2003. Vol. 108, iss. C9. 8112. doi:10.1029/2002JC001345
17. Detection and variability of the Congo River plume from satellite derived sea surface temperature, salinity, ocean colour and sea level / J. Hopkins [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 139. P. 365–385. doi:10.1016/j.rse.2013.08.015

18. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А.* Поле концентрации растворенного органического вещества в Азовском море и Керченском проливе на базе оптических наблюдений // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 5. С. 76–88.
19. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28938092> (дата обращения: 13.10.2021).
20. *Holeman J. N.* The Sediment Yield of Major Rivers of the World // Water Resources Research. 1968. Vol. 4, iss. 4. P. 737–747. doi:10.1029/WR004i004p00737
21. Ocean margin processes in global change / R. Mantoura [et al.] ; eds. R. F. C. Mantoura, J.-M. Martin, R. Wollast. Chichester : John Willey and Sons Ltd., 1991. 469 p.

*Об авторе:*

**Ломакин Павел Демьянович**, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: V-7761-2017**, **Scopus Author ID: 6701439810**, **Istina-ResearcherID (IRID): 18321047**, [p\\_lomakin@mail.ru](mailto:p_lomakin@mail.ru)