

УДК 551.463

© Т. Я. Шульга<sup>\*1,2</sup>, В. В. Суслин<sup>1</sup>, Д. М. Шукало<sup>1</sup>, 2022

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия

<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, 119034, Кропоткинский пер., д. 6, г. Москва, Россия

\*E-mail: shulgaty@mail.ru

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЕЙ СОЛЕННОСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ДАННЫМИ *in situ* И РЕГИОНАЛЬНЫМИ СПУТНИКОВЫМИ ПРОДУКТАМИ

Статья поступила в редакцию 14.02.2022, после доработки 13.07.2022, принята в печать 28.07.2022

### Аннотация

Предложен метод получения информации о солёности Азовского моря, основанный на совместном использовании данных контактных и дистанционных наблюдений. Подход к восстановлению полей солёности Азовского моря основан на получении обобщённых регрессионных уравнений связывающих архивные данные *in situ* с региональными биооптическими параметрами, полученным по стандартным продуктам второго уровня MODIS. Проведённый анализ показал возможность использования различных подходов при получении обобщённых эмпирических (регрессионных) уравнений для весеннего и летнего сезонов, различия в которых составляют ~10 %. Результаты восстановленных значений солёности верифицированы по данным *in situ*. Установлено, что графики средних значений восстановленной солёности находятся в области 95 % доверительных полос современных среднесезонных трендов 1986–2018 и 2000–2018 гг. Показана возможность использования результатов предложенного метода при построении пространственных карт солёности Азовского моря, синхронизированных по времени со спутниковыми снимками.

**Ключевые слова:** Азовское море, температура, солёность, региональные продукты MODIS, регрессионные зависимости, трёхмерная гидродинамическая модель

© Т. Я. Шульга<sup>\*1,2</sup>, В. В. Суслин<sup>1</sup>, Д. М. Шукало<sup>1</sup>, 2022

<sup>1</sup>Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup>N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, 119034, Kropotkinskiy Per., 6, Moscow, Russia

\*E-mail: shulgaty@mail.ru

## DATA RECOVERY OF THE SEA OF AZOV SALINITY FIELDS USING REGRESSION ANALYSIS BETWEEN *IN SITU* DATA AND REGIONAL SATELLITE PRODUCTS

Received 14.02.2022 Revised 13.07.2022 Accepted 28.07.2022

### Abstract

This study proposes a method for obtaining information on the salinity of the Sea of Azov, based on the use of contact and remote sensing data. The approach to the salinity fields recovery is based on obtaining generalized regression equations relating *in situ* archival data with regional biooptical products obtained from standard level-2 MODIS products. This analysis showed the possibility of using various approaches to obtain generalized empirical (regression) equations for the spring and summer seasons, the differences in which are ~10 %. The results of the recovered salinity values were verified using *in situ* data. It was found that the plots of the average values of the recovered salinity are in the region of 95 % of the confidence bands of the modern long-term average trends for 1986–2018 and 2000–2018. The possibility of using the results of the proposed method in the construction of spatial maps of the Azov Sea salinity, synchronized in time with satellite scenes, is shown.

**Keywords:** Sea of Azov, temperature, salinity, MODIS regional products, regression dependencies, 3D hydrodynamic model

Ссылка для цитирования: Шульга Т.Я., Суслин В.В., Шукало Д.М. Восстановление полей солёности Азовского моря с использованием регрессионных связей между данными *in situ* и региональными спутниковыми продуктами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 3. С. 114–124. doi:10.48612/fpg/bkug-hzez-xx59

For citation: Shulga T. Ya., Suslin V.V., Shukalo D.M. Data Recovery of the Sea of Azov Salinity Fields Using Regression Analysis Between *In Situ* Data and Regional Satellite Products. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 114–124.

doi:10.48612/fpg/bkug-hzez-xx59

## 1. Введение

Актуальность работы обоснована научным и практическим интересом к наличию информации в режиме близком к реальному времени об изменениях термохалинных составляющих морской среды, оказывающих заметное влияние на состояние биологических ресурсов, экологии, береговой инфраструктуры Азовского моря. Самое континентальное, мелководное и практически замкнутое Азовское море, соединяющееся достаточно узким Керченским проливом с Черным морем, характеризуется значительной изменчивостью основных гидрометеорологических параметров, связанных с сезонным объемом стока рек, притоком солёных вод, погодных условий и антропогенных загрязнений [1, 2]. Высокая стоимость и нерегулярность *in situ* данных обусловили поиск альтернативных возможностей получения информации о температуре и солёности, в том числе по данным дистанционного зондирования, имеющих высокое пространственное разрешение и ежедневное поступление. Однако наличие пропусков, вызванных общими проблемами дистанционных измерений существенно ограничивает объем и оперативность спутниковых данных. Решением проблемы заполнения пропусков спутниковых данных о температуре и солёности является использование результатов трехмерного гидродинамического моделирования с пространственным разрешением, сравнимым с данными спутникового зондирования, и с возможностью постоянно ассимилировать потоки данных дистанционных измерений [3, 4].

Среди готовых инструментов для исследования солёности поверхностного слоя океана в настоящее время используются данные радиометров *L*-диапазона на спутниках: *Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)*, <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos>) — уникальный радиометрический интерферометр *MIRAS* с разрешением  $35 \times 150$  км с 2009 г.; *Aquarius/SAC-D* (<https://podaac.jpl.nasa.gov/Aquarius>) с разрешением  $150 \times 150$  км с 2011 г.; *Soil Moisture Active Passive (SMAP)*, <https://smap.jpl.nasa.gov/>) с разрешением  $\sim 40 \times 40$  км с 2015 г. При сравнительном анализе значений солёности по натурным и спутниковым данным *SMAP* была выявлена слабая корреляция данных, поскольку Азовское море является одним из самых мелких и пресноводных в мире, что приводит к низкой чувствительности спутниковых измерений, а малые размеры Азовского моря ( $\sim 200 \times 380$  км) требуют более высокого разрешения спутниковых данных, чем предоставляемые *Aquarius/SAC-D* и *SMOS*.

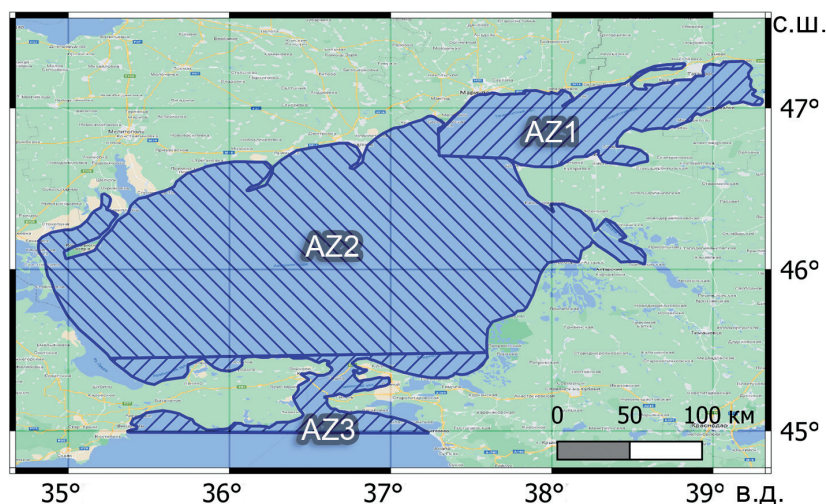
В отличие от данных по температуре, получение информации о солёности Азовского моря из открытых источников данных дистанционного зондирования возможно только опосредовано, например, путем установления эмпирических регрессионных связей. Достаточные известные результаты исследований корреляционной связи интенсивности флуоресценции растворенного органического вещества и солёности в поверхностном слое вод Карского моря, содержится в [5]. Данная работа является продолжением цикла исследований [3, 6, 7], обобщающих результаты анализа региональных спутниковых продуктов в верхнем слое Азовского моря, используемых в процедурах ассимиляции трехмерной гидродинамической модели *POM (Princeton Ocean Model, www.ccpo.odu.edu/POMWEB)* [8].

Основной целью данной работы является решение вопросов, связанных с получением коэффициентов общих эмпирических регрессионных уравнений между данными *in situ* и региональными спутниковыми продуктами *MODIS* ([oceancolor.gsfc.nasa.gov](http://oceancolor.gsfc.nasa.gov)) [9, 10]. Для этого анализируются результаты восстановления солёности, полученные с использованием различных подходов при составлении общих регрессионных уравнений. Сначала полученных напрямую путем осреднения коэффициентов уравнений, полученных по отдельности по каждому году, располагающему репрезентативным набором данных. И затем, путем установления общих регрессионных связей между совокупными наборами этих же данных. Кроме этого, задачей исследования является верификация восстановленных значений солёности по среднемноголетним данным наблюдений.

## 2. Район исследования

Азовское море представляет собой практически замкнутый бассейн, занимающий промежуточное положение между морскими и пресными водоемами, физико-географическое положение которого обуславливает его уникальные термохалинные и гидродинамические особенности [11, 12]. Мелководность Азовского бассейна, достаточно мощный по объему ( $\sim 12\%$  объёма морской воды) приток речных вод и ограниченный водообмен с Чёрным морем (повторяемость Азовского и Черноморского течений составляет  $62\%$  и  $38\%$  соответственно [13, 14], обеспечивают чрезвычайно динамичную с точки зрения изменений температуры и солёности структуру водоема [11, 15].

Особенностью геоморфологической структуры Азовского моря является большая неоднородность рельефа в районах кос, пересыпей, лиманов и заливов по сравнению с более глубокими районами в центральной части моря [16]. Это определяет необходимость отдельного анализа термохалинной структуры



**Рис. 1.** Исследуемая акватория Азовского моря на карте. Физико-географическая единица условно разделена на 3 субрегиона (AZ1, AZ2, AZ3) в соответствии с максимумами глубины моря (4, 14, 200 м)

**Fig. 1.** The investigated area of the Sea of Azov on the map. The physical-geographical unit is conditionally divided into 3 area (AZ1, AZ2, AZ3) in accordance with the maximum sea depth (4, 14, 200 m)

моря в районах, выделенных с учетом дифференциации по глубине. С этой целью исследуемая область разделена на 3 субрегиона (рис. 1), охватывающие: наиболее мелководную часть — Таганрогский залив (AZ1: 37,7–39,3°в.д., 46,7–47,3°с.ш.) с глубинами, не превышающими 4 м; центральную часть моря (AZ2) с максимальной глубиной ~14 м; и глубоководную часть с глубинами до 200 м, включающую Керченский пролив и прилегающую к нему часть Черного моря (AZ3: 35,3–37,6°в.д., 45–45,5°с.ш.).

Такое разделение позволяет сформировать массивы с информацией о средних значениях температуры и солёности на трех основных горизонтах моря (приповерхностный, средний, придонный) для использования их в качестве начальных данных в трехмерной гидродинамической модели *ПОМ* [7].

### 3. Методология исследования и используемые данные

Выполнение задач данного исследования проведено в четыре этапа. На первом этапе проанализированы архивные данные *in situ*: из базы океанографических данных ЮНЦ РАН за 1913–2006 гг. [17]; из «Атласа климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария» ([atlas.ssc-ras.ru/azs/azs-invent.html](http://atlas.ssc-ras.ru/azs/azs-invent.html)) [18]; из банка океанографических данных МГИ РАН [19] и сайтов [www.seadatanet.org/](http://www.seadatanet.org/) и [www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr\\_wod.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html). На основании обобщения и анализа архивной информации сделаны выводы о многолетней сезонной изменчивости температуры и солёности, получены уравнений линейных трендов нормированных аномалий температуры и солёности Азовского моря за 1913–2018 гг. [20]. С целью использования на следующих этапах работы сформирована массивы с информацией о средних значениях температуры и солёности по 3 субрегионам Азовского моря в приповерхностном, среднем и придонном горизонтах.

На втором этапе проанализированы, систематизированы и отбракованы данные спутниковых продуктов MODIS за 2002–2018 гг. по критериям, предложенным в [21]. Данные по температуре преобразованы в массивы для использования в процедурах ассимиляции в гидродинамическую модель [3, 7]. Получение данных по солёности выполняется на третьем этапе на основании предложенного в данном исследовании метода восстановления солёности по региональным продуктам MODIS. Для его реализации подготовленные данные зондирования сопоставляются с данными *in situ* на основании последовательного выполнения следующих критериев: 1) данные натурных измерений солёности получены на глубине, не превышающей 2 м; 2) даты спутниковых снимков и даты выбранных наблюдений *in situ* совпадают; 3) для совпадающих дат дистанционных и *in situ* данных отклонение координат не превышает

1,4 км ( $Distance_{i=1}^N = \sqrt{(lat_{in\ situ} - lat_{MODIS})^2 + (long_{in\ situ} - long_{MODIS})^2} < 0,01^\circ$ ). Отобранные таким образом

стандартные спутниковые продукты второго уровня далее преобразуются в пространственно-временные карты биооптических параметров, рассчитанных на основании региональных алгоритмов, предложенных в [22, 23]:  $a_{ph}(678)$  — показатель поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 678 нм,  $TChl$  — сумма концентрации хлорофилла-*a* и феофигментов,  $a_{tot}(438)$  — показатель поглощения света всеми оптически активными компонентами среды на длине волны 478 нм,  $a_{CDM}(438)$  — сумма показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом и показателя поглощения света неживой взвесью на длине волны 478 нм и  $b_{bp}(438)$  — показатель обратного рассеяния частицами взвеси на длине волны 478 нм.

На третьем этапе определяются регрессионные зависимости между измеренными значениями солёности и региональными спутниковыми продуктами. Эти зависимости получены для II субрегиона Азовского моря в летний и весенний сезоны, в годы, обладающие наибольшим количеством данных контактных и дистанционных наблюдений. На основе установленных регрессионных связей с коэффициентами корреляции, превышающими значение 0,5, составлены два вида обобщенных линейных зависимостей. Одна из них получена напрямую путем осреднения коэффициентов линейных уравнений, установленных по отдельности для каждого года, располагающего репрезентативным набором данных. Другая — путем установления обобщенных регрессионных связей между совокупными наборами данных в те же годы.

На завершающем этапе работы выполнена верификация результатов восстановления солёности в Азовском море с использованием установленных обобщенных эмпирических (регрессионных) зависимостей. С этой целью проведено сопоставление средних значений восстановленной солёности со среднесезонными трендами солёности Азовского моря по данным *in situ* для периодов 1986–2018 и 2000–2018 гг.

**Используемый метод расчета региональных биооптических параметров по данным второго уровня MODIS.** Для реализации подхода, обсуждаемого в данной работе, использованы первичные гидрооптические характеристики Азовского моря, полученные из стандартных продуктов второго уровня MODIS-Aqua/Terra от начала наблюдений с 2000 по 2018 гг. Наборы спутниковых данных с километровым пространственным разрешением преобразованы в пространственные карты пяти биооптических параметров на регулярной сетке Азовского моря с разрешением  $1/59^\circ \times 1/84^\circ$  по географическим координатам ( $396 \times 295$  узлов).

#### 4. Анализ и обсуждение результатов

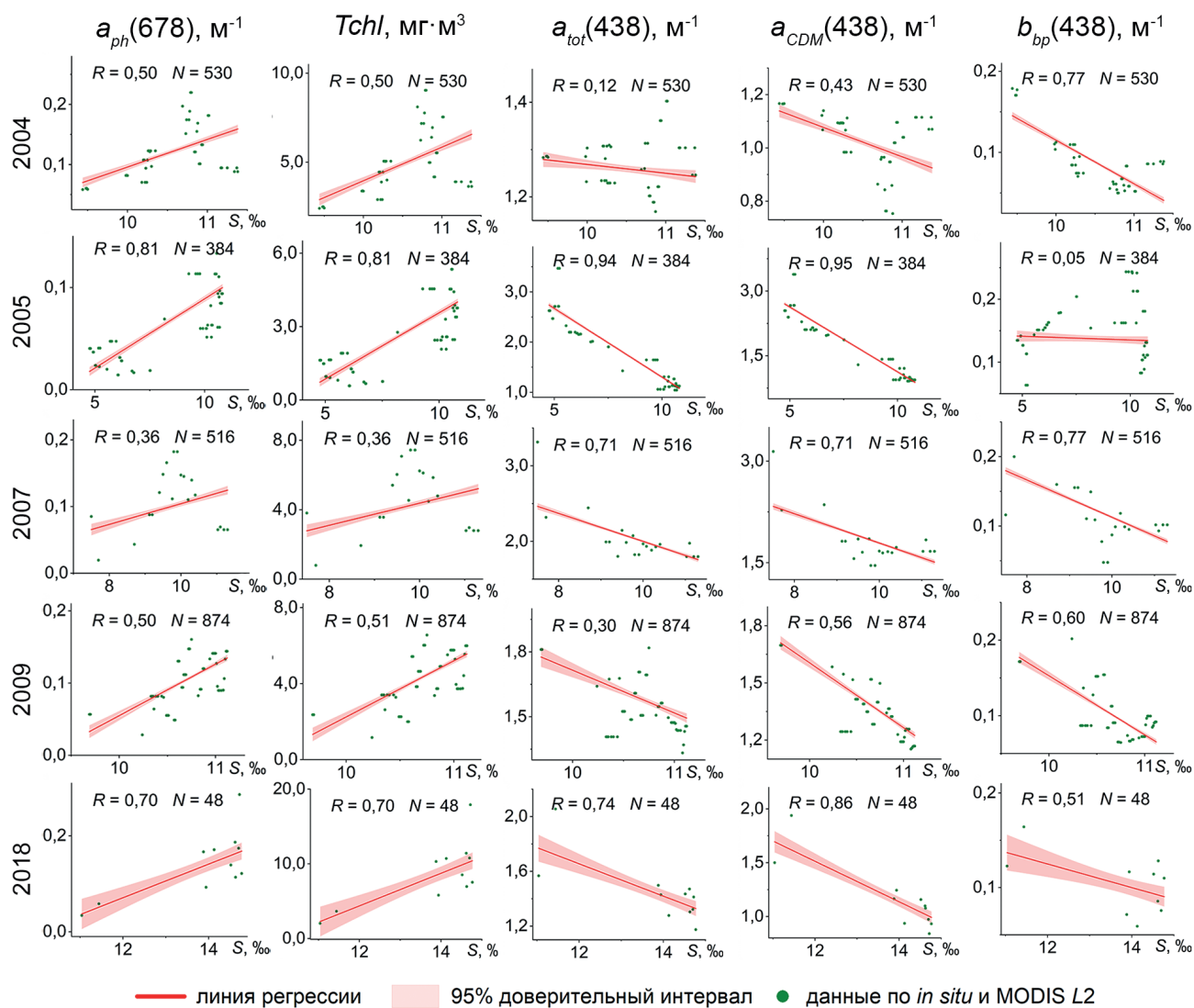
**Обобщенные (осредненные) регрессионные уравнения для восстановления полей солёности Азовского моря по отдельным годам в весенне-летние сезоны.** По каждому из рассматриваемых биооптических параметров для II субрегиона Азовского моря в весенний и летний сезоны получены регрессионные зависимости, связывающие их с данными *in situ*. Примеры регрессий для летнего сезона в годы, обладающие наибольшим объемом репрезентативных данных, приведены на рис. 2. Регрессионные зависимости для летнего сезона с доверительными границами с 95 % вероятностью, показанные на рис. 2, получены с использованием пакета *OriginLab* (<https://www.originlab.com/>).

Видно, что в ряде рассмотренных случаев имеет место слабая линейная корреляция между значениями измеренной солёности и региональными спутниковыми продуктами (например,  $R = 0,05$  для  $b_{bp}(438)$  в 2005 г.). Такие случаи исключены при составлении обобщенных эмпирических уравнений по регрессиям с коэффициентами корреляции, не превышающими 0,5. Отметим, что биооптические параметры, для которых таким образом исключается более половины набора данных, далее не участвуют в анализе, для них устанавливается более сложная нелинейная связь с солёностью. Уравнения осредненных линейных регрессионных зависимостей имеют вид:

$$y = (a_{cp} \pm \sigma_1) x + (b_{cp} \pm \sigma_2), \quad (1)$$

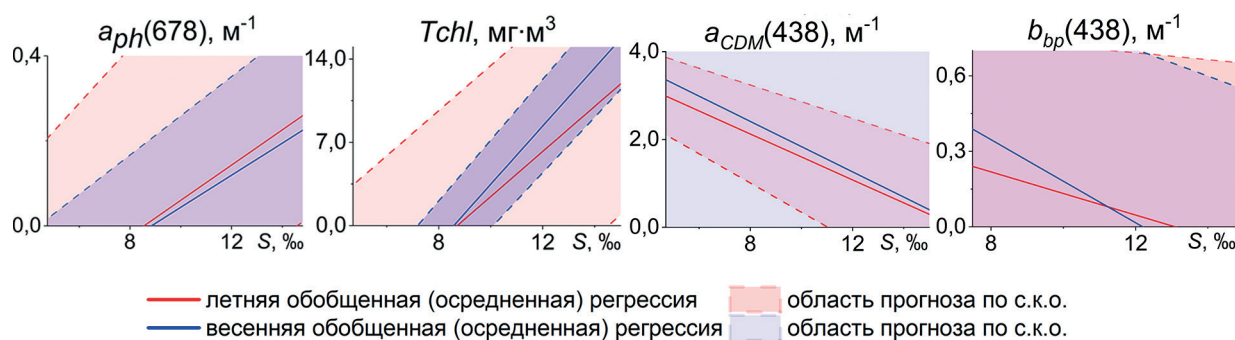
где  $x$  — значение регионального спутникового продукта;  $y$  — солёность (‰);  $a_{cp}$  и  $b_{cp}$  — осредненные значения коэффициентов регрессий;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — советующие им среднеквадратические (стандартные) отклонения.

В результате обобщения регрессионных зависимостей по каждому биооптическому параметру получены два семейства линий вида (1), отвечающие весеннему и летнему сезонам. С целью сопоставления зависимостей, полученных в разные сезоны, проанализируем взаимное расположение соответствующих графиков и областей прогноза, представленных на рис. 3. Здесь показаны границы областей прогноза, определяющиеся крайним положением семейства линий на плоскости, заданных (1). Отметим, что в этот анализ не включены данные по  $a_{tot}(438)$ , поскольку в весенний период для трех лет из пяти (2004, 2007 и 2009 гг.) они слабо коррелируют с солёностью.



**Рис. 2.** Линейные регрессии между биооптическими параметрами и измеренными значениями солёности для II субрегиона Азовского моря с соответствующими коэффициентами корреляции ( $R$ ) и объемом данных ( $N$ ) в летний сезон

**Fig. 2.** Linear regressions between regional biooptical products and measured salinity values for the II area of the Sea of Azov with the corresponding correlation coefficients ( $R$ ) and data volume ( $N$ ) in the summer season



**Рис. 3.** Графики обобщенных (осредненных) зависимостей и областей прогноза между биооптическими параметрами и измеренными значениями солёности в весенний и летний сезоны

**Fig. 3.** Plots of generalized (averaged) dependencies and forecast areas between regional biooptical products and measured salinity values in spring and summer seasons

Как видно из рис. 3, обобщенные регрессионные зависимости для весеннего и летнего сезона по рассматриваемым биооптическим параметрам хорошо согласуются. Различия в площади охвата областей прогноза для весны и лета не превосходят  $\sim 10\%$ . Это позволяет сделать вывод о возможности использования единого уравнения для восстановления солёности в весенне-летний сезон.

**Обобщенные уравнения для восстановления полей солёности Азовского моря по совокупным наборам данных с 2000 по 2018 гг. в весенне-летние сезоны.** Связь между значениями региональных спутниковых продуктов и солёностью можно установить между совокупными наборами данных *in situ* и MODIS. В этом случае для двух наборов данных по II субрегиону Азовского моря, подготовленных по изложенным выше критериям, устанавливается общая линейная регрессионная связь.

В табл. 1 приведены два варианта обобщенных уравнений линейных регрессий, полученных путем осреднения коэффициентов линейных регрессий и составленных по совокупным наборам данных.

Сравним обобщенные регрессионные зависимости, полученные на основании различных подходов в весенний и летний сезоны. Графики обобщенных линейных зависимостей между совокупными наборами данных с соответствующими 95 % доверительными интервалами и 95 % областями прогноза в весенний и летний сезоны показаны на рис. 4. Здесь также приведены значения коэффициентов корреляции:  $R_1$  — для летнего сезона,  $R_2$  — для весеннего сезона, и объемы данных:  $N_1$  — для летнего сезона,  $N_2$  — для весеннего сезона. Для сравнения на рис. 4 показаны графики линейных зависимостей, полученные на основании подхода с осреднением регрессий, приведенные выше на рис. 3.

Как видно из рис. 4, для  $a_{ph}(678)$ ,  $Tchl$  и  $a_{CDM}(438)$  95 % полоса прогноза летних регрессий, построенных по совокупным наборам данных, включает в себя как линии весенних регрессий с 95 % доверительной полосой, построенных по тому же принципу, так и обе линии весенне-летних регрессий, построенных путем осреднения (1). Наибольшее различие областей прогноза данных имеет место по  $b_{bp}(438)$ . Здесь разница между областями прогноза летней и весенней регрессий, полученной по совокупным наборам составляет  $\sim 80\%$  от летней. Тем не менее, область прогноза летней регрессии целиком покрывает 95 % доверительный интервал весенней регрессии. Таким образом, в целом, для восстановления солёности возможно использовать единое общее уравнение, построенное или путем осреднения регрессий или по совокупным наборам данных.

**Результаты восстановления полей солёности для II субрегиона Азовского моря.** Установленные общие (осредненные) уравнения линейных регрессий, приведенные в верхней части табл. 1 использованы в процедуре восстановления полей солёности в Азовском море. В качестве примера на рис. 5 показаны восстановленные поля солёности по  $a_{CDM}(438)$  для 23.06.2009 и 24.06.2009. Видно, что за одни сутки не происходит существенного изменения поля солёности Азовского моря, однако имеет место поступление распресненных вод из Таганрогского залива и уменьшение солёности вдоль восточного побережья моря.

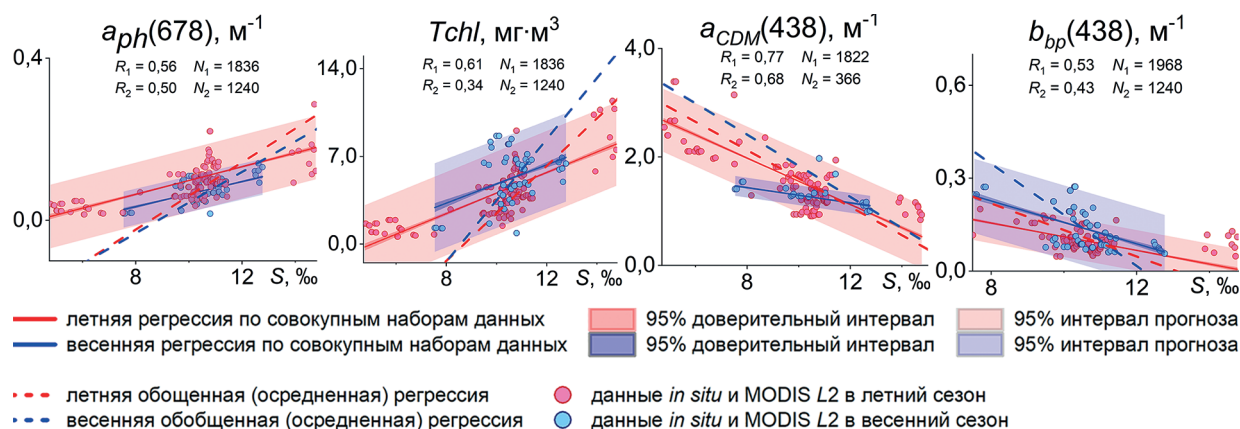
Таблица 1

Table 1

### Обобщенные уравнения линейных регрессий

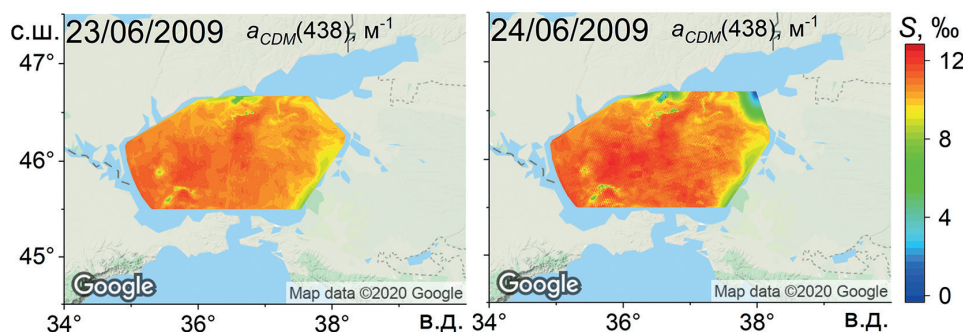
#### Generalized linear regression equations

| Весна                                                           |                                                 | Лето                                             |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Обобщенные (осредненные) регрессионные уравнения                |                                                 |                                                  |
| $a_{ph}(678), \text{м}^{-1}$                                    | $y = (0,038 \pm 0,008) x + (-0,334 \pm 0,132)$  | $y = (0,041 \pm 0,024) x + (-0,355 \pm 0,250)$   |
| $Tchl, \text{мг м}^{-3}$                                        | $y = (2,442 \pm 0,110) x + (-20,940 \pm 2,594)$ | $y = (1,894 \pm 1,008) x + (-16,500 \pm 11,004)$ |
| $a_{tot}(438), \text{м}^{-1}$                                   | нет линейной связи                              | $y = (-0,192 \pm 0,078) x + (3,654 \pm 0,515)$   |
| $a_{CDM}(438), \text{м}^{-1}$                                   | $y = (-0,287 \pm 0,303) x + (4,710 \pm 3,816)$  | $y = (-0,261 \pm 0,071) x + (4,217 \pm 0,548)$   |
| $b_{bp}(438), \text{м}^{-1}$                                    | $y = (-0,082 \pm 0,029) x + (1,006 \pm 0,334)$  | $y = (-0,043 \pm 0,029) x + (0,561 \pm 0,296)$   |
| Обобщенные регрессионные уравнения по совокупным наборам данных |                                                 |                                                  |
| $a_{ph}(678), \text{м}^{-1}$                                    | $y = 0,015x - 0,090$                            | $y = 0,017x - 0,072$                             |
| $Tchl, \text{мг м}^{-3}$                                        | $y = 0,765x - 2,865$                            | $y = 0,820x - 4,134$                             |
| $a_{tot}(438), \text{м}^{-1}$                                   | нет линейной связи                              | $y = -0,173x + 3,516$                            |
| $a_{CDM}(438), \text{м}^{-1}$                                   | $y = -0,070x + 1,993$                           | $y = -0,214x + 3,690$                            |
| $b_{bp}(438), \text{м}^{-1}$                                    | $y = -0,035x + 0,509$                           | $y = -0,022x + 0,332$                            |



**Рис. 4.** Графики регрессионных зависимостей между совокупными наборами региональных спутниковых продуктов и измеренными значениями солености с соответствующими 95 % доверительными интервалами и 95 % интервалами прогноза, коэффициентами корреляции и объемом данных. Графики обобщенных (осредненных) зависимостей те же, что на рис. 3

**Fig. 4.** Plots of regressions between regional biooptical products and measured salinity values with respective 95 % confidence intervals, 95 % prediction intervals, correlation coefficients, and data volume. Plots of generalized (averaged) dependencies are the same as in Fig. 3



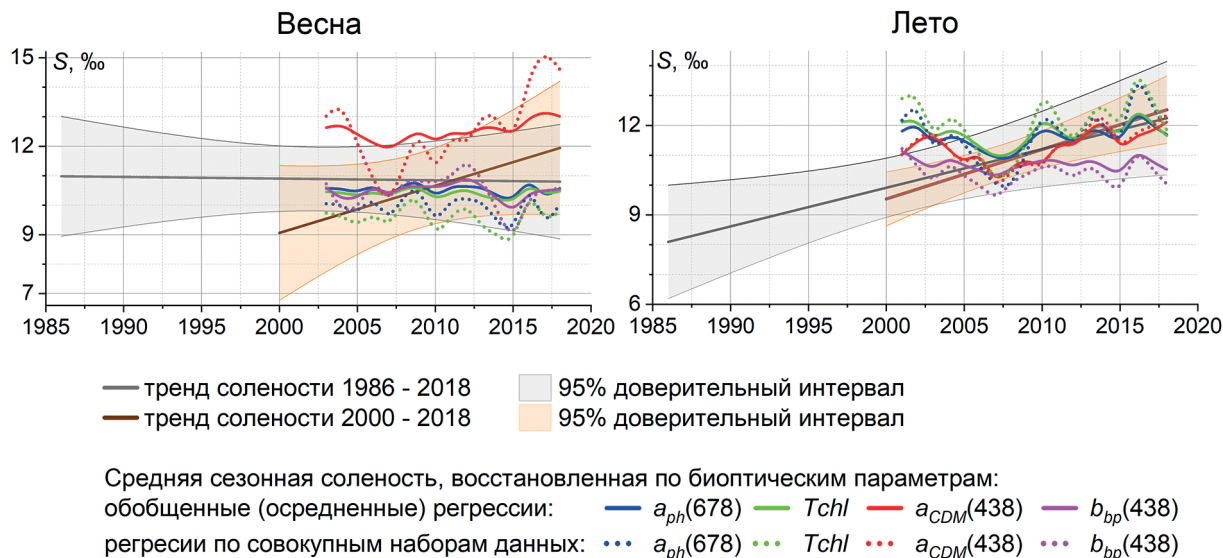
**Рис. 5.** Результаты восстановления полей солености для II субрегиона Азовского моря по значению  $a_{CDM}(438)$

**Fig. 5.** Results of recovering salinity fields from  $a_{CDM}(438)$  for the II area of the Sea of Azov

**Верификация восстановленных данных по солености в Азовском море.** Для верификации полученных результатов выполнено сопоставление их со среднемноголетними значениями солености, полученным по архивными данным *in situ* 1913–2006 гг. В работе [20] выполнен анализ трендов солености Азовского моря в различные периоды: 1913–1939, 1946–1981, 1986–2018 гг. Сравнение результатов восстановленных значений солености проведено для современных периодов 1986–2018 гг. и с 2000–2018 гг., выбор которых обусловлен наличием данных зондирования начиная с 2000 г. Сравнение проводится по II субрегиону Азовского моря в весенний и летний сезоны. Для этого анализа из наборов данных *in situ* и региональных продуктов MODIS сформированы два массива для летнего и весеннего сезонов. Эти данные используются в процедуре восстановления солености по каждому из биооптических параметров на основании уравнений, приведенных в табл. 1. и затем осредняются.

Сопоставление полученных средних значений солености с наблюдаемыми трендами солености продемонстрировано на рис. 6.

Здесь показаны летний и весенний тренды солености для периодов 1986–2018 гг. и 2000–2018 гг. с соответствующими 95 % доверительными интервалами. Кроме этого на рис. 6 приведены временные ряды средних значений солености, восстановленной по биооптическим параметрам  $a_{ph}(678)$ ,  $Tchl$ ,  $a_{CDM}(438)$  и  $b_{bp}(438)$  на основании обобщенных уравнений осредненных регрессий (сплошные линии) и полученных по совокупным данным (пунктирные линии).



**Рис. 6.** Летний и весенний тренды солёности для периодов 1986–2018 гг. и 2000–2018 гг. с соответствующими 95 % доверительными интервалами. Временные ряды средних значений солёности, восстановленной по биооптическим параметрам  $a_{ph}(678)$ ,  $Tchl$ ,  $a_{CDM}(438)$  и  $b_{bp}(438)$ . Сплошными линиями показаны результаты восстановления по обобщенным (осредненным) регрессиям, пунктирными — по совокупным данным

**Fig. 6.** Summer and spring salinity trends for the periods 1986–2018 and 2000–2018 with the corresponding 95 % confidence intervals. Time series of mean salinity values recovered from  $a_{ph}(678)$ ,  $Tchl$ ,  $a_{CDM}(438)$ , and  $b_{bp}(438)$ . The solid lines show the results of recovery by generalized (averaged) regressions, the dotted lines show the results of cumulative data recovery

Видно, что, начиная с 2005 г., в летний и весенний сезоны 95 % доверительные интервалы современных трендов солёности практически полностью покрывают распределение средних значений восстановленной солёности по всем региональным спутниковым продуктам. Исключения составляют результаты, полученные по  $a_{CDM}(438)$  весной и  $b_{bp}(438)$  — летом. В этих случаях, графики выходят за пределы или присутствуют в доверительной области только одного из трендов. Тем не менее, в летние сезоны 2000–2005 гг. наилучший результат восстановления солёности получен по  $b_{bp}(438)$ , а средняя солёность, восстановленная по другим параметрам  $a_{ph}(678)$ ,  $Tchl$  и  $a_{CDM}(438)$  находится вне доверительных полос обоих трендов. Также с 2005–2018 гг. наилучший результат восстановления солёности получен по  $a_{CDM}(438)$ , график средней солёности практически совпадает с линией современного тренда 2000–2018 гг. Таким образом, не выявлен спутниковый региональный продукт, восстановление солёности по которому является наиболее точным. В этой связи, для восстановления солёности, наиболее приближенной к наблюдаемым среднесезонным трендам, необходим комплексный анализ результатов, полученных по различным биооптическим параметрам.

Анализируя результаты восстановления, полученные с использованием различных подходов к составлению обобщенных регрессионных уравнений, отметим, что графики средней солёности, восстановленной путем осреднения коэффициентов регрессий, чаще присутствуют в области 95 % доверительных полос по сравнению с графиками солёности, восстановленной по совокупным данным.

## 5. Заключение

В работе представлен анализ результатов восстановления полей солёности Азовского моря на основе использования обобщенных эмпирических (регрессионных) уравнений, связывающих данные *in situ* с региональными спутниковыми продуктами. Точность представленного метода восстановления поля солёности разная и зависит от сезона и выбора биооптического параметра. При этом средние значения восстановленной солёности находятся в пределах 95 % доверительных полос 32-х и 18-ти летних трендов, полученных по данным *in situ*. Диапазон применимости метода восстановления солёности для весеннего и летнего сезонов обусловлен изменчивостью солёности в первых двух регионах Азовского моря. Отмечено, что графики средней солёности, восстановленной путем осреднения коэффициентов регрессий, чаще присутствуют в области 95 % доверительных полос наблюдаемых среднесезонных трендов по сравнению с графиками солёности восстановленной по совокупным данным. Результат анализа различных подходов при получении

обобщенных эмпирических (регрессионных) уравнений показал возможность использования единого обобщенного уравнения, построенного как путем осреднения регрессий, так и по совокупным наборам данных для весеннего и летнего сезонов. В дальнейших исследованиях для повышения точности метода восстановления солёности планируется уточнение коэффициентов регрессий и комплексный анализ результатов, полученных по различным биооптическим параметрам.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555–2022–0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»).

### Funding

The work was carried out within the framework of the state task on theme No. 0555–2022–0003 “Development of methods of operational oceanology based on interdisciplinary studies of the processes of formation and evolution of the marine environment and mathematical modeling using data from remote and contact measurements” (code “Operational Oceanology”).

### Литература

1. Wolanski E., Elliott M. Estuarine ecohydrology: An introduction. Amsterdam: Elsevier Science, 2015. 322 p.
2. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.) // Океанология. 2021. Т. 61, № 6. С. 900–912. doi:10.31857/S003015742106006X
3. Шульга Т.Я., Суслин В.В. Исследование эволюции пассивной примеси в поверхностном слое Азовского моря на основе усвоения данных сканера MODIS-Aqua в гидродинамическую модель // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 73–80. doi:10.7868/S2073667318030097
4. Konik M., Kowalewski M., Bradtke K., Darecki M. The operational method of filling information gaps in satellite imagery using numerical models // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. Vol. 75. P. 66–82. doi:10.1016/j.jag.2018.09.002
5. Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А. Исследование связи солёности и флуоресценции желтого вещества в Карском море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 34–39. doi:10.7868/S2073667318030048
6. Шульга Т.Я., Суслин В.В., Станичная Р.Р. Численное исследование процессов эволюции загрязнений в Азовском море с использованием данных спутниковых наблюдений // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 40–52. doi:10.22449/0233–7584–2017–6–40–52
7. Шульга Т.Я., Суслин В.В., Шукало Д.М., Ингеров А.В. Исследование связи между сезонными изменениями солёности Азовского моря и биооптическими характеристиками по данным спутникового зондирования в видимом диапазоне спектра // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 2. С. 68–75. doi:10.7868/S2073667320020082
8. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Ed.N. Heaps. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1987. Vol. 4. P. 1–16.
9. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. URL: [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS\\_OC.2014.0/](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0/) (дата обращения: 02.09.2022).
10. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Ocean Color Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. URL: [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS\\_OC.2014.0/](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0/) (дата обращения: 02.09.2022).
11. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 236 с.
12. Книпович Н.М. Работа Азовской научно-промысловой экспедиции в 1922–1924 гг. (предварительный отчет) // Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции Керчь, 1926. Вып. 1. С. 4–51.
13. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 247 с.
14. Лоция Азовского моря. URL: [http://parusa.narod.ru/bib/books/azov\\_loc](http://parusa.narod.ru/bib/books/azov_loc) (дата обращения: 14.02.2022).
15. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 492, № 1. С. 107–112. doi:10.31857/S268673972005014X

16. Матишов Г.Г., Гаргопа Ю.М., Бердников С.В., Дженюк С.Л. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. 2006. М., Наука: 304 с.
17. Matishov G., Matishov D., Gargopa Y., Dashkevich L., Berdnikov S., Baranova O., Smolyar I. 2006. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006. G. Matishov, S. Levitus, Eds., NOAA Atlas NESDIS59, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 103 pp., CD-ROM.
18. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П. и др. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.
19. Баянкина Т.М., Годин Е.А., Жук Е.В., Ингеров А.В., Исаева Е.А., Халиулин А.Х. Информационные ресурсы Морского гидрофизического института РАН // Процессы в геосредах. 2017. № 4 (13). С. 651–659.
20. Shukalo D.M., Shul'ga T. Ya. Long-term and seasonal anomalies of the Sea of the Azov thermohaline structure for 1913–2018 // Journal of Physics Conference Series. 2021. 2057(1):012133. doi:10.1088/1742–6596/2057/1/012133
21. Суетин В.С., Суслин В.В., Королев С.Н., Кучерявый А.А. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора *SEAWIFS* // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 44–54.
22. Suslin V.V., Churilova T. Ya., Efimova T.V. et al. Regional bio-optical algorithm for remote estimation of the sea of Azov's IOPS // Proceedings of SPIE. 2020. Vol. 11560. doi:10.1117/12.2574273
23. Шульга Т.Я., Суслин В.В. Сезонная изменчивость IOPs в Азовском море на основе данных дистанционного зондирования и моделирования // Труды XI Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод» с международным участием (Санкт-Петербург, 29.09.2021–01.10.2021). СПб.: Химиздат, 2021. С. 106–111.

## References

1. Wolanski E., Elliott M. Estuarine ecohydrology: An introduction. *Elsevier Science, Amsterdam*, 2015. 322 p.
2. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A. Climate change in the hydrometeorological parameters of the Black and Azov Seas (1980–2020). *Oceanology*. 2021, 61, 745–756. doi:10.1134/S0001437021060060
3. Shul'ga T. Ya., Suslin V.V. Investigation of the evolution of the suspended solids in the Sea of Azov based on the assimilation of satellite data in a hydrodynamic model. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 73–80 (In Russian). doi:10.7868/S2073667318030097
4. Konik M., Kowalevski M., Bradtke K., Darecki M. The operational method of filling information gaps in satel-lite imagery using numerical models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019, 75, 66–82.
5. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Research of the relationship between salinity and yellow substance fluorescence in the Kara Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 34–39 (In Russian). doi:10.7868/S2073667318030048
6. Shul'ga T. Ya., Suslin V.V., Stanichnaya R.R. Numerical Research of the Pollution Surface and Deep-Sea Evolution in the Sea of Azov Using Satellite Observation Data. *Physical Oceanography*. 2017, 6, 36–46. doi:10.22449/1573-160X-2017-6-36-46
7. Shul'ga T. Ya., Suslin V.V., Shukalo D.M., Ingerov A.V. Research of the relations between the seasonal variability of salinity and bio-optical features in the Sea of Azov using the satellite data in the visible spectrum range. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020, 13, 2, 68–75 (In Russian). doi:10.7868/S2073667320020082
8. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models* / Ed.N. Heaps. Washington, D.C.: *American Geophysical Union*. 1987, 4, 1–16.
9. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data. URL: [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS\\_OC.2014.0/](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0/) (access date: 02.09.2022).
10. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data. URL: [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS\\_OC.2014.0/](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0/) (access date: 02.09.2022).
11. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. V. The Sea of Azov. *SPb., Gidrometeoizdat*, 1991. 236 p. (In Russian).
12. Knipovich N.M. The work of the Azov scientific and fishing expedition in 1922–1924. (preliminary report). *Trudy Azovo-Chernomorskoj nauchno-promyslovoj ekspedicii Kerch'*, 1926, 1, 4–51. (In Russian).
13. Hydrometeorological reference book of the Sea of Azov. *L., Gidrometeoizdat*, 1962. 247 p. (In Russian).
14. Location of the Sea of Azov. URL: [http://parusa.narod.ru/bib/books/azov\\_loc](http://parusa.narod.ru/bib/books/azov_loc) (access date: 14.02.2022). (In Russian).
15. Matishov G.G., Grigorenko K.S. Dynamic mode of the Azov Sea in conditions of salinization. *Doklady Earth Sciences*. 2020, 492(1), 376–381. doi:10.1134/S1028334X20050141
16. Matishov G.G., Gargopa Yu.M., Berdnikov S.V., Dzhenyuk S.L. Patterns of ecosystem processes in the Sea of Azov. М., Наука, 2006. 304 p. (In Russian).

17. Matishov G., Matishov D., Gargopa Y., Dashkevich L., Berdnikov S., Baranova O., Smolyar I. 2006. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006. G. Matishov, S. Levitus, Eds., NOAA Atlas NESDIS59, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 103 pp., CD-ROM.
18. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P. et al. Atlas of climatic changes in nine large marine ecosystems of the Northern hemisphere (1827–2013). Rostov-on-Don, SSC RAS, 2014. 256 p. (In Russian).
19. Bayankina T.V., Godin E.A., Zhuk E.V. et al. Information resources of Marine Hydrophysical Institute of the RAS. *Processes in GeoMedia*. 2017, 4(13), 651–659 (In Russian).
20. Shukalo D.M., Shul'ga T. Ya. Long-term and seasonal anomalies of the Sea of the Azov thermohaline structure for 1913–2018. *Journal of Physics Conference Series*. 2021, 2057(1):012133.
21. Suetin V.S., Suslin V.V., Korolev S.N. et al. Analysis of the variability of the optical properties of water in the Black Sea in summer 1998 according to the data of a SeaWiFS satellite instrument. *Physical Oceanography*. 2002, 12, 331–340. doi:10.1023/A:1021729229168
22. Suslin V.V., Churilova T. Ya., Efimova T.V. et al. Regional bio-optical algorithm for remote estimation of the sea of Azov's IOPS. *Proceedings of SPIE*. 2020, 115600R.
23. Shul'ga T.Y., Suslin V.V. The seasonal variability of IOPs in the Sea of Azov based on remote sensing and modeling. *Proceedings of the XI International conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2021)* (St. Petersburg, 29.09.2021–01.10.2021). St. Petersburg, Khimizdat, 2021, 106–111 (In Russian).

### Об авторах

|                              |                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                      |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ШУЛЬГА Татьяна Яковлевна     | Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22 | ORCID ID: 0000-0002-7873-6697, WoS ResearcherID: P-9894-2015, Scopus AuthorID: 57205873490, elibrary AuthorID: 825146, e-mail: shulgaty@mail.ru      |
| СУСЛИН Вячеслав Владимирович | Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22 | ORCID ID: 0000-0002-8627-7603, WoS ResearcherID: B-4994-2017, Scopus AuthorID: 6603566261, elibrary AuthorID: 825673, e-mail: slava.suslin@gmail.com |
| ШУКАЛО Дмитрий Михайлович    | Аспирант, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22                            | ORCID ID: 0000-0001-5708-4602, elibrary AuthorID: 1046785, e-mail: mitya.googlovich@gmail.com                                                        |