

# Сравнительный анализ поверхностной солёности Чёрного моря по спутниковым продуктам SMAP и судовым наблюдениям

Д. М. Шукало<sup>1</sup>, Т. Я. Шульга<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mails: mitya.googlovich@gmail.com, shulgaty@mail.ru

<sup>2</sup> Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова  
Москва, 119034, Россия

Цель данной работы — оценка согласованности дистанционных измерений поверхностной солёности Чёрного моря с *in situ* наблюдениями. Для решения поставленной задачи выполнен сравнительный анализ измерений солёности по данным системы SMAP (англ. Soil Moisture Active Passive) и судовым наблюдениям в Чёрном море за 2015–2021 гг. Установлено, что глобальные продукты SMAP предоставляют заниженные на 0,25–0,30 psu значения региональной поверхностной солёности по сравнению с *in situ* наблюдениями. Тем не менее спутниковые измерения сохраняют межгодовые тенденции солёности Чёрного моря по натурным данным и могут заменить традиционные судовые съёмки с учётом полученных отклонений. При этом среднегодовые значения солёности по данным SMAP показывают большие тенденции к осолонению при более низкой оценке средних значений по сравнению с *in situ* наблюдениями. Показано, что наилучшее согласование средних значений спутниковой солёности с судовыми наблюдениями обеспечено сглаженным продуктом с разрешением 70 км. Результаты анализа поверхностной солёности свидетельствуют о тенденциях к устойчивому осолонению моря в области судовых измерений Морского гидрофизического института со скоростью ~0,09 psu/год по данным SMAP и ~0,06 psu/год по данным *in situ* за 2015–2021 гг.

**Ключевые слова:** Чёрное море, поверхностная солёность, данные дистанционного зондирования Земли, осолонение, опреснение, SMAP, графики Бланда и Альтмана

Одобрена к печати: 23.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-235-243

## Введение

Поверхностная солёность — важный показатель, предоставляющий полезную информацию о состоянии термохалинного режима морей и океанов, описывающий характер изменений взаимосвязанных состояний — гидрологического и экологического. Чёрное море, омывающее берега России, Украины, Румынии, Болгарии, Турции, Грузии и Абхазии, — континентальный морской бассейн с развитой промышленной и транспортной инфраструктурой. Оно является важным объектом гидрологических и экологических, а также обширных междисциплинарных исследований, охватывающих гидрологию, климатологию, метеорологию, экологию и биогеохимию (Grégoire et al., 2023). Бассейн Чёрного моря расположен в умеренно-континентальном климате, большая часть его акватории находится в полусухом регионе, а солёность заметно варьируется в периоды от более холодных и влажных условий в зимние сезоны до летних с небольшим количеством осадков (Иванов, Белокопытов, 2011). Такая изменчивость обуславливает необходимость получения регулярной информации о колебаниях солёности в приповерхностных слоях Чёрного моря, которые плохо изучены из-за фрагментированных по времени и пространству данных *in situ* наблюдений. Возможность получать данные дистанционного мониторинга для морских акваторий с постоянным временным интервалом относится к неоспоримым достоинствам спутниковых данных. Несмотря на появившиеся в последнее десятилетие дистанционные измерения солёности, их корректное применение для Чёрного моря остаётся недостаточно исследованным. Это связано с ошибками глобальных спутниковых данных, обусловленными региональными радиочастотными помехами и излучением от поверхности суши (Tang et al., 2022).

Среди спутниковых продуктов, предоставляющих глобальную информацию о поверхностной солёности SSS (*англ.* Sea Surface Salinity), одной из новейших представляется миссия SMAP (*англ.* Soil Moisture Active Passive), которая с 2015 г. продолжила миссию Aquarius (2011–2015). Миссия Aquarius стала второй миссией по измерению SSS, а первый спутник, дающий возможность получения продуктов измерений поверхностной солёности морей и океанов, SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity), был запущен в 2009 г. (Kerr et al., 2010). Данные измерений SSS, предоставляемые SMOS, были дополнительно улучшены миссиями Aquarius, а затем SMAP, посредством ослабления шумовых сигналов, создаваемых радиочастотными помехами, использованием новых алгоритмов поиска и вспомогательных данных о скорости ветра и концентрации льда, что повысило качество этих продуктов (Bao et al., 2019; Meissner et al., 2014; Menezes, 2020).

В настоящей работе исследуется пятая версия серии продуктов SMAP V5 RSS (*англ.* Remote Sensing Systems), полученная с использованием версии Aquarius 5.0 GMF (*англ.* Geophysical Model Function), адаптированной к миссии SMAP (Kao et al., 2018; Meissner et al., 2018, 2019). Другая серия продуктов, SMAP JPL (*англ.* Jet Propulsion Laboratory), получена с использованием геофизической модели (GMF) для комбинированного активно-пассивного алгоритма (*англ.* Combined Active-Passive) (Fore et al., 2016; Tang et al., 2017). Помимо различных геофизических моделей, серии продуктов SMAP RSS и SMAP JPL различаются использованием вспомогательных данных и разными подходами к коррекции излучения поверхности суши. Алгоритм коррекции для суши JPL хорошо работает в прибрежной зоне ~40 км от берега, где доля суши в зоне покрытия обычно невелика (Fore et al., 2019; Tang et al., 2022).

Цель данной работы заключается в оценке точности глобальных данных о солёности системы RSS SMAP Monthly V5.0 в случае их использования в региональном масштабе для бассейна Чёрного моря. Оценка среднемесячных значений SSS по спутниковым продуктам выполнена на основе их сопоставления с натурными измерениями в Чёрном море из банка океанографических данных Морского гидрофизического института (МГИ РАН) (Bayankina et al., 2021). В рамках настоящего исследования мы стремились сопоставить межгодовые тенденции изменчивости поверхностной солёности в Чёрном море по данным SMAP и региональным измерениям *in situ* за период наблюдений с 2015 по 2021 г. Оценка качества измерений поверхностной солёности миссии SMAP по судовым наблюдениям в Чёрном море проведена впервые, что определяет новизну данной работы. Схожие исследования, связанные с анализом данных SMAP о солёности Азовского моря с *in situ* измерениями, представлены в работе (Shukalo et al., 2023). В публикациях, посвящённых обсуждению качества спутниковых измерений, наибольший интерес представляют выводы, полученные для бассейна Чёрного моря. Оценка точности спутниковых продуктов для прибрежных вод Севастополя, восстановленных стандартными алгоритмами по данным спектрорадиометров MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), изложена в работе (Скорород и др., 2021), а алгоритм дополнительной коррекции спутниковых продуктов цвета океана над Чёрным морем представлен в статье (Shybanov, Parkova, 2022).

## Инструменты и методы

Различие пространственных и временных масштабов натурных и дистанционных измерений, используемых в настоящей работе, обусловило проведение исследований в Чёрном море и его части (R1), ограниченной географическим положением гидрологических морских станций МГИ РАН (*рис. 1*, см. с. 237). Пространственный охват данных спутникового мониторинга, покрывающих Чёрное море, позволяет проанализировать межгодовые тенденции солёности по всей акватории моря и выполнить сопоставление спутниковых измерений солёности с наблюдениями *in situ* в области R1.

В работе проанализированы данные SSS спутниковой системы Level-3 RSS SMAP Monthly V5.0, использующей новейшие калибровки, усовершенствованные методы и алгоритмы измерения солёности, описанные в публикации (Meissner et al., 2022). Для Мирового

океана SSS SMAP предоставляется на пространственной сетке  $0,25 \times 0,25^\circ$  ( $\sim 27,5 \times 27,5$  км) в двух форматах: 8-дневные и среднемесячные значения. Разрешение ячейки полосы зондирования (1000 км), составляющее  $39 \times 47$  км, определяет дискретизацию данных SMAP на сетку с эффективным разрешением  $\sim 40$  км (SMAP 40) с использованием оптимальной интерполяции Бэкуса – Гилберта. Из этого 40-км продукта получается сглаженный продукт с пространственным разрешением 70 км (SMAP 70) с применением линейного усреднения между соседними ячейками, включая центральную. Наборы данных SSS, используемые в настоящем исследовании, состоят из среднемесячных наблюдений SMAP за период с 2015 по 2021 г. Эти данные можно получить из Центра распределённого активного архива физической океанографии PO.DAAC (англ. Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, <https://podaac.jpl.nasa.gov/>).

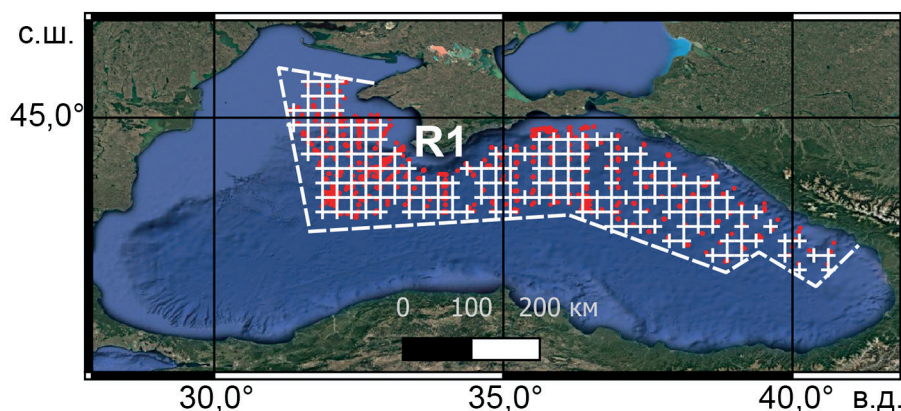


Рис. 1. Положение исследуемой области R1 на карте Чёрного моря. Красными точками отмечены гидрологические станции судовых измерений. Белыми крестами указано положение узлов сетки данных SMAP, синхронизированных с наблюдениями *in situ*

В качестве *in situ* данных были использованы судовые наблюдения из базы океанографических данных (БОД) МГИ РАН за 2015–2021 гг., содержащие информацию о солёности на 13 тыс. гидрологических станций. Предварительно из имеющихся данных о солёности были отобраны значения на горизонтах, не превышающих 2 м. Затем данные измерений поверхностной солёности *in situ* и SMAP были объединены в массивы по дате наблюдения и координатам. В строках результирующих массивов координаты спутниковых данных, привязанные к сетке SMAP, находятся в радиусе 15 км от координат *in situ* измерений. Таким образом, из всего массива данных *in situ* была отобрана 1621 станция, синхронизированная с 153 узлами сетки данных SMAP (см. рис. 1). В настоящей работе все данные наблюдений SSS приведены к практическим единицам солёности (англ. practical salinity units — psu) в соответствии со стандартами системы SMAP (Fore et al., 2019).

## Основные результаты и обсуждения

Сравнительный анализ измерений поверхностной солёности, полученной по данным спутниковых и *in situ* наблюдений, выполнен на основании анализа диаграмм рассеяния, представленных на рис. 2 (см. с. 238). Диаграммы рассеяния SSS построены для совпадающих по времени и пространству пар измерений *in situ* (ось *x*) и SMAP (ось *y*) в области R1 за период наблюдений с 2015 по 2021 г. В этих парах судовые измерения солёности обозначены как  $SSS_{in situ}$ , а дистанционные — как  $SSS_{SMAP 40}$  и  $SSS_{SMAP 70}$ . Данные за 2015 г. на рис. 2 не приводятся в связи с малым объёмом выборки (таблица).

На диаграммах точки с координатами ( $SSS_{in situ}$ ,  $SSS_{SMAP 40}$ ) указаны красным цветом, ( $SSS_{in situ}$ ,  $SSS_{SMAP 70}$ ) — синим. Чёрной сплошной линией ( $x = y$ ) показано соответствие 1:1

между измерениями *in situ* и SMAP. Между чёрными пунктирными линиями расположена область, где отклонения между измерениями *in situ* и SMAP находятся в диапазоне  $\pm 1$  psu. Приведённые на *рис. 2* и в *таблице* значения  $N$  представляют количество совпадающих пар данных за текущий год. Верхние и нижние границы вертикальных и горизонтальных линий (см. *рис. 2*) демонстрируют соответствующий разброс значений солёности относительно средних:  $SSS_{SMAP\ 40}$  (красная вертикаль),  $SSS_{SMAP\ 70}$  (синяя вертикаль),  $SSS_{in\ situ}$  (фиолетовая горизонталь).

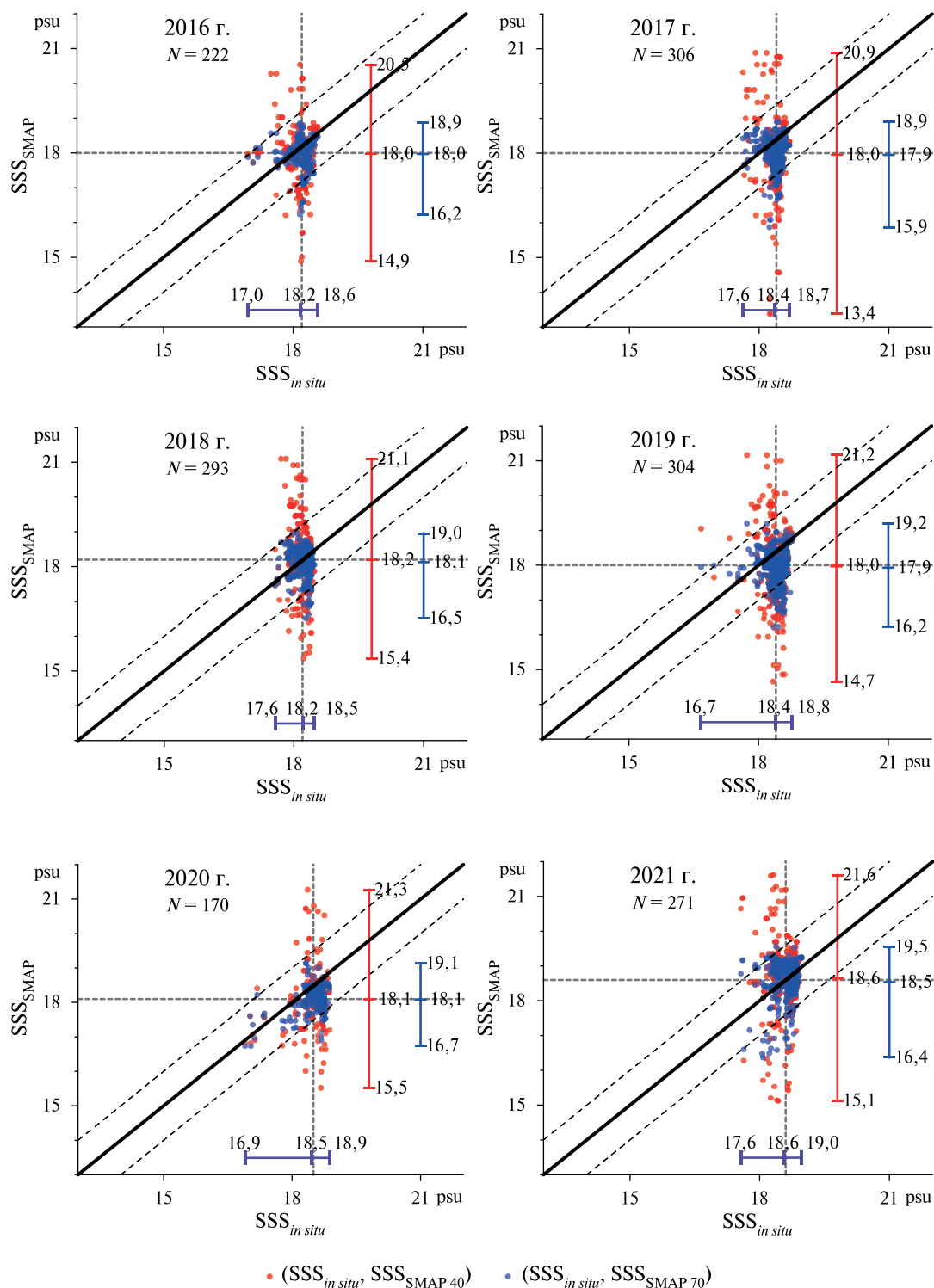


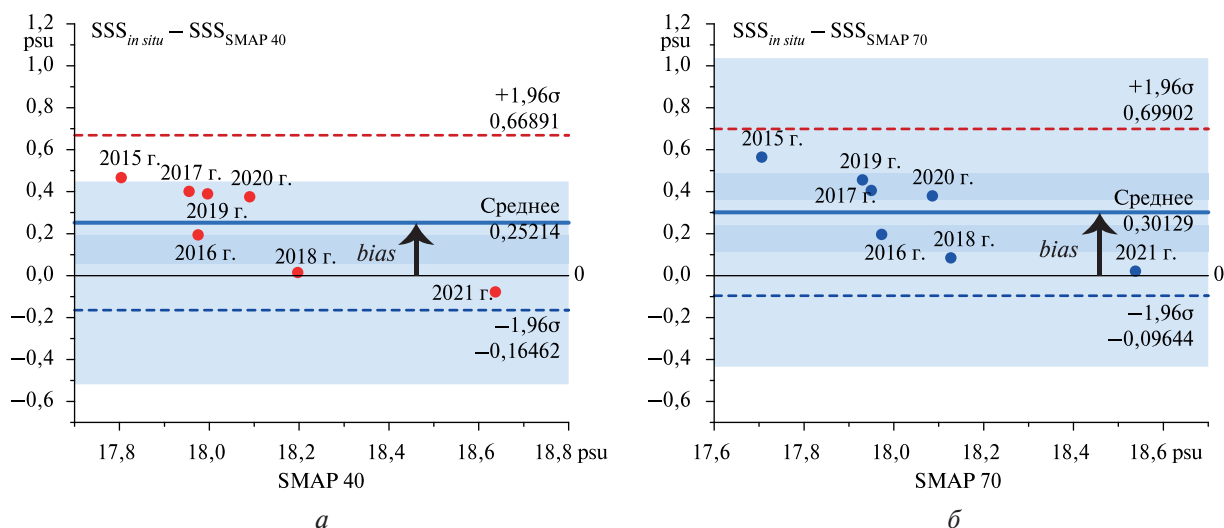
Рис. 2. Диаграммы рассеяния измерений  $SSS_{in\ situ}$  и SMAP в области R1

Среднегодовые значения поверхностной солёности ( $SSS_{avg} \pm \sigma$ , psu) по данным *in situ* и SMAP в области R1 с соответствующим количеством пар данных ( $N$ )

| Годы | <i>in situ</i>     | SMAP 40            | SMAP 70            | $N$ |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|-----|
| 2015 | $18,271 \pm 0,086$ | $17,804 \pm 0,226$ | $17,706 \pm 0,137$ | 55  |
| 2016 | $18,169 \pm 0,254$ | $17,975 \pm 0,833$ | $17,973 \pm 0,452$ | 222 |
| 2017 | $18,356 \pm 0,184$ | $17,955 \pm 1,070$ | $17,950 \pm 0,456$ | 306 |
| 2018 | $18,212 \pm 0,178$ | $18,197 \pm 0,927$ | $18,127 \pm 0,414$ | 293 |
| 2019 | $18,386 \pm 0,251$ | $17,996 \pm 1,033$ | $17,930 \pm 0,496$ | 304 |
| 2020 | $18,466 \pm 0,372$ | $18,090 \pm 0,937$ | $18,086 \pm 0,430$ | 170 |
| 2021 | $18,559 \pm 0,263$ | $18,637 \pm 1,054$ | $18,538 \pm 0,607$ | 271 |

Анализ диаграмм, приведённых на *рис. 2*, показывает, что наибольший разброс солёности по спутниковым и *in situ* наблюдениям отмечается для SMAP 40 (красная вертикаль). Максимальные отклонения от средних измеренных значений солёности составляют: вдоль оси  $y$  —  $SSS_{SMAP\ 40}$  от 2,6 до 3,6 psu,  $SSS_{SMAP\ 70}$  от 0,9 до 2,1 psu; вдоль оси  $x$  —  $SSS_{in\ situ}$  от 0,3 до 1,7 psu. Из *рис. 2* видно, что наибольшая плотность точек данных ( $SSS_{in\ situ}$ ,  $SSS_{SMAP\ 70}$ ) по оси  $x$  отмечается в интервале  $18 \pm 1,7$  psu, а по оси  $y$  — в интервале  $18 \pm 3,6$  psu, что подтверждает лучшее соответствие данных SMAP 70 с наблюдениями *in situ*.

Анализ данных БОД МГИ РАН за 2015–2021 гг. и наблюдений SMAP позволил получить оценку средних годовых значений  $SSS$  в области R1 (*таблица*). На графиках Бланда–Альмана (*рис. 3*) суммирована статистика средних ошибок измерений поверхностной солёности двумя методами: дистанционного зондирования и *in situ* измерений. Среднегодовые значения двух наборов данных, используемых при построении графиков Бланда–Альмана для *in situ* и SMAP 40 (см. *рис. 3а*) и для *in situ* и SMAP 70 (см. *рис. 3б*), приведены в *таблице*.



*Рис. 3.* Средние ошибки измерений  $SSS$  в области R1 за 2015–2021 гг.:  
а — данные *in situ* и SMAP 40; б — данные *in situ* и SMAP 70

Горизонтальные линии на графиках (см. *рис. 3*) соответствуют: средней разнице между наборами данных (сплошная синяя); нулевому значению средней разницы (сплошная чёрная); пороговым значениям 95%-х доверительных интервалов, определяемым  $\pm 1,96$ -кратным стандартным отклонением от средней разницы (пунктирные — красная и синяя).

Расстояние между нулевой и средней линиями определяет количественную оценку точности, понимаемую как средняя разница между наблюдаемыми *in situ* и дистанционными значениями солёности (англ. *bias*). На графиках (см. *рис. 3*) отмечено направление смещения *bias* между измерениями SMAP и *in situ*, демонстрирующее знак отклонения поверхностной солёности по спутниковым данным от фактических значений *in situ*.

Как видно из *рис. 3*, средние значения SSS по данным SMAP 40 и SMAP 70 занижены относительно судовых наблюдений примерно на 0,25 и 0,30 psu, что несколько превышает заявленную точность измерений SMAP (0,233 psu) (Bao et al., 2019). Для отдельных лет, например в 2018 и 2021 гг., средние значения SSS по данным SMAP практически совпадают с наблюдаемыми *in situ* (см. *рис. 3*). За исключением 2021 г., средние значения SSS по SMAP 40 (см. *рис. 3а*) завышены, а по SMAP 70 (см. *рис. 3б*) занижены относительно *in situ*.

Оценка тенденций среднегодовых значений SSS в Чёрном море и области R1 выполнена на основании анализа временных рядов спутниковых и судовых наблюдений. Для каждого временного ряда на *рис. 4* приведены краткосрочные тенденции SSS за 2015–2021 гг., для которых опущены перекрывающиеся 95%-е доверительные интервалы, затрудняющие чтение рисунка. Анализ данных контактных и дистанционных наблюдений демонстрирует восходящие линейные тенденции солёности как в области R1, так и в целом по акватории Чёрного моря.

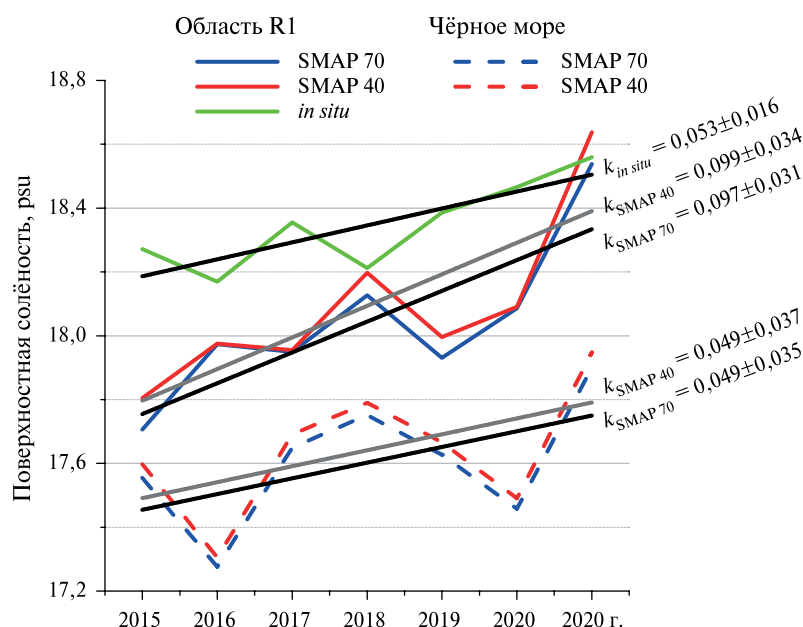


Рис. 4. Межгодовая изменчивость и тенденция (чёрные и серые линии) SSS по наблюдениям *in situ* (зелёная линия) и данным SMAP (красные и синие линии)

Временные ряды средней годовой солёности показывают относительно устойчивое осолонение с 2015 г., за которым с 2020 г. следует период, характеризующийся повышенной межгодовой изменчивостью солёности. Сравнимая скорость осолонения в области R1 по наблюдениям *in situ* ( $0,053 \pm 0,016$  psu/год), SMAP 40 и SMAP 70 ( $0,099 \pm 0,034$  и  $0,097 \pm 0,031$  psu/год), отмечаем более высокую скорость осолонения по данным дистанционных измерений. Как было показано выше, анализ знака *bias* (см. *рис. 3*) и свободных членов линейных графиков показывает, что данные SMAP дают заниженную оценку средних годовых значений солёности по сравнению с натурными измерениями. Анализ данных о солёности выявил тенденцию к осолонению в области R1, характерную для периода 2015–2021 гг., с тенденциями к опреснению в 2016–2017 и 2018–2019 гг. Слабо выраженная тенденция к увеличению поверхностной солёности в 2019–2020 гг. сменяется более выраженной тенденцией к увеличению солёности в период 2020–2021 гг.

## Заключение

Выводы данного исследования, полученные на основе сопоставления средних значений спутниковых наблюдений SSS с данными *in situ*, позволяют ответить на вопрос о точности при использовании данных RSS SMAP Monthly V5.0 для мониторинга поверхностной солёности в Чёрном море. Статистика средних ошибок дистанционных и *in situ* измерений солёности показывает, что измерения SSS по данным SMAP 70 и SMAP 40 занижены в среднем на 0,25 и 0,30 psu относительно судовых наблюдений. Среднегодовые значения солёности продуктов SMAP показывают большие тенденции к осолонению при более низкой оценке средних по сравнению с натурными измерениями.

В результате сравнительного анализа средних годовых значений поверхностной солёности, полученных методами дистанционного зондирования (L3 RSS SMAP V5) и *in situ* наблюдений, установлено, что применение данных системы SMAP 70 лучше согласуется с натурными данными, по сравнению с данными SMAP 40. Измерения SMAP дополняют существующие *in situ* наблюдения благодаря регулярному поступлению данных и в целом сохраняют межгодовые тенденции натурных измерений, что позволяет использовать их в качестве альтернативы традиционным судовым съёмкам. Однако для надёжного анализа изменений солёности моря целесообразно сочетать оба источника получения оценок этой характеристики.

Результаты анализа средних годовых тенденций поверхностной солёности по данным натурных и дистанционных наблюдений за период 2015–2021 гг. свидетельствуют о наличии тенденций к увеличению поверхностной солёности как в исследуемой области, так и в целом в Чёрном море (Подымов и др., 2021). В 2020–2021 гг. происходит резкое нарастание восходящих тенденций солёности, что подчёркивает тенденцию к повышению среднегодовой солёности Чёрного моря.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания МГИ РАН FNNN-2024-0012 («Оперативная океанология»).

## Литература

1. Подымов О. И., Зацепин А. Г., Очеретник В. В. Рост солёности и температуры в деятельном слое северо-восточной части Чёрного моря с 2010 по 2020 год // Морской гидрофиз. журн. 2021. Т. 37. № 3. С. 279–287. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-279-287.
2. Скороход Е. Ю., Чурилова Т. Я., Ефимова Т. В. и др. Биооптические характеристики прибрежных вод Чёрного моря вблизи Севастополя: оценка точности спутниковых продуктов, восстановленных по данным MODIS и VIIRS // Морской гидрофиз. журн. 2021. Т. 37. № 2. С. 233–246. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-2-233-246.
3. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Чёрного моря. Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофиз. ин-т, 2011. 210 с.
4. Bao S., Wang H., Zhang R. et al. Comparison of satellite-derived sea surface salinity products from SMOS, Aquarius, and SMAP // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. No. 3. P. 1932–1944. DOI: 10.1029/2019JC014937.
5. Bayankina T. M., Godin E. A., Zhuk E. V. et al. Information resources of Marine Hydrophysical Institute, RAS: Current state and development prospects // Processes in GeoMedia — V. II. Cham: Springer, 2021. P. 187–197. DOI: 10.1007/978-3-030-53521-6\_22.
6. Fore A. G., Yueh S. H., Tang W. et al. Combined active/passive retrievals of ocean vector wind and sea surface salinity with SMAP // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2016. V. 54. No. 12. P. 7396–7404. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2601486.
7. Fore A., Yueh S., Tang W., Hayashi A. SMAP Salinity and Wind Speed Data User's Guide. Version 4.2. Pasadena, CA, USA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2019. 39 p.
8. Grégoire M., Alvera-Azcárate A., Buga L. et al. Monitoring Black Sea environmental changes from space: New products for altimetry, ocean color and salinity. Potentialities and requirements for a dedicated *in-situ* observing system // Frontiers in Marine Science. 2023. V. 9. Article 998970. 21 p. DOI: 10.3389/fmars.2022.998970.
9. Kao H.-Y., Lagerloef G. S. E., Lee T. et al. Assessment of Aquarius sea surface salinity // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 9. Article 1341. DOI: 10.3390/rs10091341.

10. Kerr Y. H., Waldteufel P., Wigneron J.-P. et al. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle // Proc. IEEE. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
11. Meissner T., Wentz F. J., Le Vine D., Scott J. Aquarius Salinity Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Addendum 3. Santa Rosa, CA, USA: Remote Sensing Systems, 2014. 24 p.
12. Meissner T., Wentz F. J., Le Vine D. The salinity retrieval algorithms for the NASA Aquarius Version 5 and SMAP Version 3 releases // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 7. Article 1121. DOI: 10.3390/rs10071121.
13. Meissner T., Wentz F. J., Manaster A., Lindsley R. NASA/RSS SMAP Salinity: Version 4.0 Validated Release. RSS Technical Report 082219. Santa Rosa, CA, USA: Remote Sensing Systems, 2019.
14. Meissner T., Wentz F. J., Manaster A. et al. Remote Sensing Systems SMAP Ocean Surface Salinities Level 3 Monthly. Version 5.0 validated release. Santa Rosa, CA, USA: Remote Sensing Systems, 2022. DOI: 10.5067/SMP50-3SMCS.
15. Menezes V. V. Statistical assessment of sea-surface salinity from SMAP: Arabian Sea. Bay of Bengal and a promising Red Sea application // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 3. Article 447. DOI: 10.3390/rs12030447.
16. Shukalo D. M., Shulga T. Ya., Suslin V. V. Analysis of the monthly average salinity of the surface layer of the Sea of Azov, obtained by remote sensing and in situ measurement methods // Proc. SPIE. 29<sup>th</sup> Intern. Symp. "Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics". 2023. V. 12780. Article 127804A. 5 p. DOI: 10.1117/12.2690983.
17. Shybanov E. B., Papkova A. S. Algorithm for additional correction of remote sensing reflectance in the presence of absorbing aerosol: Case study // Physical Oceanography. 2022. V. 29. No. 6. P. 688–706. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-6-688-706.
18. Tang W., Fore A., Yueh S. et al. Validating SMAP SSS with in situ measurements // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 200. P. 326–340. DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.021.
19. Tang W., Yueh S. H., Fore A. G. et al. Using saildrones to assess the SMAP sea surface salinity retrieval in the coastal regions // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2022. V. 15. P. 7042–7051. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3200305.

## Comparative analysis of Black Sea surface salinity, according to SMAP remote sensing observations and *in situ* oceanographic data

D. M. Shukalo<sup>1</sup>, T. Ya. Shulga<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia  
E-mails: mitya.googlovich@gmail.com, shulgaty@mail.ru

<sup>2</sup> N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow 119034, Russia

The purpose of this work is to evaluate remote sensing observations of sea surface salinity (SSS) in the Black Sea. To solve the problem, a comparative analysis of salinity in the Black Sea for 2015–2021 based on the Soil Moisture Active Passive (SMAP) data and *in situ* oceanographic measurements was performed. It was found that SMAP products underestimate average annual SSS values by 0.25–0.30 psu compared to *in situ* observations. However, remote sensing data preserve interannual trends in the Black Sea salinity demonstrated by *in situ* measurements and can replace them with due consideration of the obtained deviations. At the same time, average annual SMAP SSS data show greater tendencies towards salinization with a lower estimate of the averages compared to *in situ* observations. It is shown that the best agreement between the SMAP mean SSS values and ship observations is provided by the smoothed product with a resolution of 70 km. The results of the surface salinity analysis indicate trends towards stable salinization over the observation period from 2015 to 2021 at a rate of ~0.09 psu/year according to SMAP data and ~0.06 psu/year according to *in situ* data.

**Keywords:** Black Sea, surface salinity, remote sensing data, salinization, desalination, SMAP, Bland–Altman plot

Accepted: 23.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-235-243

## References

1. Podymov O. I., Zatsepin A. G., Ocherednik V. V., Increase of temperature and salinity in the active layer of the north-eastern Black Sea from 2010 to 2020, *Physical Oceanography*, 2021, V. 28, No. 3, pp. 257–265, DOI: 10.22449/1573-160X-2021-3-257-265.
2. Skorokhod E. Yu., Churilova T. Ya., Efimova T. V. et al., Bio-optical characteristics of the Black Sea coastal waters near Sevastopol: Assessment of MODIS and VIIRS products accuracy, *Physical Oceanography*, 2021, V. 28, No. 2, pp. 215–227, DOI: 10.22449/1573-160X-2021-2-215-227.
3. Ivanov V. A., Belokopytov V. N., *Oceanography of the Black Sea*, Sevastopol: NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute, 2011, 210 p. (in Russian).
4. Bao S., Wang H., Zhang R. et al., Comparison of satellite-derived sea surface salinity products from SMOS, Aquarius, and SMAP, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, V. 124, No. 3, pp. 1932–1944, DOI: 10.1029/2019JC014937.
5. Bayankina T. M., Godin E. A., Zhuk E. V. et al., Information resources of Marine Hydrophysical Institute, RAS: Current state and development prospects, In: *Processes in GeoMedia — V. II*, Cham: Springer, 2021, pp. 187–197, DOI: 10.1007/978-3-030-53521-6\_22.
6. Fore A. G., Yueh S. H., Tang W. et al., Combined active/passive retrievals of ocean vector wind and sea surface salinity with SMAP, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, V. 54, No. 12, P. 7396–7404, DOI: 10.1109/TGRS.2016.2601486.
7. Fore A., Yueh S., Tang W., Hayashi A., *SMAP Salinity and Wind Speed Data User's Guide. Version 4.2*, Pasadena, CA, USA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2019, 39 p.
8. Grégoire M., Alvera-Azcárate A., Buga L. et al., Monitoring Black Sea environmental changes from space: New products for altimetry, ocean color and salinity. Potentialities and requirements for a dedicated *in-situ* observing system, *Frontiers in Marine Science*, 2023, V. 9, Article 998970, 21 p., DOI: 10.3389/fmars.2022.998970.
9. Kao H.-Y., Lagerloef G. S. E., Lee T. et al., Assessment of Aquarius sea surface salinity, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 9, Article 1341, DOI: 10.3390/rs10091341.
10. Kerr Y. H., Waldteufel P., Wigneron J.-P. et al., The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle, *Proc. IEEE*, 2010, V. 98, No. 5, pp. 666–687, DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
11. Meissner T., Wentz F. J., Le Vine D., Scott J., *Aquarius Salinity Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Addendum 3*, Santa Rosa, CA, USA: Remote Sensing Systems, 2014, 24 p.
12. Meissner T., Wentz F. J., Le Vine D., The salinity retrieval algorithms for the NASA Aquarius Version 5 and SMAP Version 3 releases, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 7, Article 1121, DOI: 10.3390/rs10071121.
13. Meissner T., Wentz F. J., Manaster A., Lindsley R., *NASA/RSS SMAP Salinity: Version 4.0 Validated Release. RSS Technical Report 082219*, Santa Rosa, CA, USA: Remote Sensing Systems, 2019.
14. Meissner T., Wentz F. J., Manaster A. et al., *Remote Sensing Systems SMAP Ocean Surface Salinities Level 3 Monthly. Version 5.0 validated release*, Santa Rosa, CA, USA: Remote Sensing Systems, 2022, DOI: 10.5067/SMP50-3SMCS.
15. Menezes V. V., Statistical assessment of sea-surface salinity from SMAP: Arabian Sea. Bay of Bengal and a promising Red Sea application, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 3, Article 447, DOI: 10.3390/rs12030447.
16. Shukalo D. M., Shulga T. Ya., Suslin V. V., Analysis of the monthly average salinity of the surface layer of the Sea of Azov, obtained by remote sensing and in situ measurement methods, *Proc. SPIE. 29<sup>th</sup> Intern. Symp. "Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics"*, 2023, V. 12780, Article 127804A, 5 p., DOI: 10.1117/12.2690983.
17. Shybanov E. B., Papkova A. S., Algorithm for additional correction of remote sensing reflectance in the presence of absorbing aerosol: Case study, *Physical Oceanography*, 2022, V. 29, No. 6, pp. 688–706, DOI: 10.22449/1573-160X-2022-6-688-706.
18. Tang W., Fore A., Yueh S. et al., Validating SMAP SSS with in situ measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 200, pp. 326–340, DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.021.
19. Tang W., Yueh S. H., Fore A. G. et al., Using saildrones to assess the SMAP sea surface salinity retrieval in the coastal regions, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, V. 15, pp. 7042–7051, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3200305.