

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MATHEMATICAL MODELLING



УДК 519.6

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2587-8999-2025-9-1-31-38>



Оценка точности спутниковой альтиметрии Sentinel-3 в прибрежных районах Азовского моря

С.В. Проценко , Е.А. Проценко , А.В. Харченко

Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) РГЭУ (РИНХ), г. Таганрог, Российская Федерация

✉ rab55555@rambler.ru

Аннотация

Введение. Азовское море является мелководным полузамкнутым морем, где спутниковая альтиметрия (SA) сталкивается с трудностями в обеспечении точности измерений уровня моря. Рассматривается верификация данных альтиметрии спутника Sentinel-3 в прибрежных районах Азовского моря с использованием данных платформ наблюдений и трехмерной гидродинамической модели.

Материалы и методы. Исследование основано на сравнении высот поверхности моря (SSH), полученных с радиовысотомера Sentinel-3, с данными мареографов и результатами моделирования. Использована трехмерная гидродинамическая модель, адаптированная к условиям Азовского моря, а также спутниковые данные, обработанные с учетом атмосферных и приливных поправок.

Результаты исследования. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) между спутниковыми и эталонными данными составила 85 мм. Анализ показал, что доплеровская альтиметрия Sentinel-3 в SAR-режиме обеспечивает более высокую точность по сравнению с традиционной альтиметрией, особенно в прибрежной зоне.

Обсуждение и заключение. Оценка данных Sentinel-3 демонстрирует их надежность в моделировании уровня воды в Азовском море. Методика сравнительного анализа, предложенная в работе, позволяет учитывать систематические ошибки спутниковых данных и использовать их в сочетании с моделированием и натурными наблюдениями. Исследование подтверждает эффективность данных Sentinel-3 в определении уровня моря в сложных прибрежных условиях. Разработанная методика может быть применена в других прибрежных районах для оценки характеристик спутниковой альтиметрии.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, Sentinel-3, Азовское море, колебания уровня моря, гидродинамическое моделирование, трехмерная гидродинамическая модель, верификация спутниковых данных

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–21–00021, <https://rscf.ru/project/25-21-00021/>.

Для цитирования. Проценко С.В., Проценко Е.А., Харченко А.В. Оценка точности спутниковой альтиметрии Sentinel-3 в прибрежных районах Азовского моря. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2025;9(1):31–38. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2025-9-1-31-38>

Original Theoretical Research

Accuracy Assessment of Sentinel-3 Satellite Altimetry in the Coastal Areas of the Azov Sea

Sofya V. Protsenko , Elena A. Protsenko , Anton V. Kharchenko

Taganrog Institute named after A.P. Chekhov (branch) of RSUE (RINH), Taganrog, Russian Federation

✉ rab55555@rambler.ru

Abstract

Introduction. The Azov Sea is a shallow semi-enclosed sea where satellite altimetry (SA) faces challenges in ensuring accurate sea level measurements. This study focuses on verifying Sentinel-3 altimetry data in the coastal areas of the Azov Sea using observational platform data and a three-dimensional hydrodynamic model.

Materials and Methods. The study is based on a comparison of sea surface heights (SSH) obtained from the Sentinel-3 radar altimeter with tide gauge data and modelling results. A three-dimensional hydrodynamic model, adapted to the conditions of the Azov Sea, was used, along with satellite data processed considering atmospheric and tidal corrections.

Results. The root mean square error (RMSE) between satellite-derived and reference data was found to be 85 mm. The analysis demonstrated that Sentinel-3 Doppler altimetry in SAR mode provides higher accuracy compared to traditional altimetry, particularly in coastal areas.

Discussion and Conclusion. The assessment of Sentinel-3 data confirms their reliability in modeling water levels in the Azov Sea. The comparative analysis methodology proposed in this study enables the identification of systematic errors in satellite data and facilitates their integration with modelling and in situ observations. The study confirms the effectiveness of Sentinel-3 data in determining sea levels in complex coastal conditions. The developed methodology can be applied to other coastal areas to assess satellite altimetry performance.

Keywords: satellite altimetry, Sentinel-3, Azov Sea, sea level variations, hydrodynamic modeling, three-dimensional hydrodynamic model, satellite data verification

Funding. This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25–21–00021, <https://rscf.ru/project/25-21-00021/>.

For Citation. Protsenko S.V., Protsenko E.A., Kharchenko A.V. Accuracy Assessment of Sentinel-3 Satellite Altimetry in the Coastal Areas of the Azov Sea. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2025;9(1):31–38. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2025-9-1-31-38>

Введение. Азовское море — мелководный полузамкнутый водоем, характеризующийся низкой соленостью, значительными сезонными колебаниями уровня воды и интенсивным речным стоком. Эти факторы существенно влияют на динамику водных масс и требуют точных инструментов для мониторинга изменений уровня моря. В последние десятилетия дистанционное зондирование стало одним из ключевых методов изучения морских и прибрежных процессов. В частности, спутниковая альтиметрия (СА) обеспечивает возможность непрерывного наблюдения за изменениями уровня моря в глобальном масштабе.

Одним из современных инструментов для спутникового мониторинга является спутник Sentinel-3A, запущенный Европейским космическим агентством (ESA) в 2016 году в рамках программы Copernicus. Он оснащен радиолокационным альтиметром с синтезированной апертурой (SAR), что позволяет значительно улучшить пространственное разрешение данных по сравнению с традиционной альтиметрией. Однако при применении методов спутниковой альтиметрии в прибрежных зонах возникают значительные трудности, связанные с влиянием береговой линии, неоднородностью волнения, изменением рельефа дна и помехами от суши. Это делает актуальной задачу верификации данных Sentinel-3 в таких сложных морских районах, как Азовское море.

Ранее проведенные исследования показали, что высокая точность спутниковых альтиметрических данных в открытых водах океанов может снижаться в прибрежных районах из-за эффектов переотражения сигнала, влияния метеорологических условий и динамики водных масс. В связи с этим важно оценить точность данных Sentinel-3 в условиях Азовского моря, где глубины невелики, а влияние речного стока и сезонных изменений существенно сказывается на уровне моря [1].

В данной работе проводится комплексная верификация данных спутниковой альтиметрии Sentinel-3 на основе сравнения с натурными измерениями мареографов, установленными в Азовском море, а также результатами численного моделирования, выполненного с использованием трехмерной гидродинамической модели. Целью исследования является определение точности спутниковых данных и анализ их применимости для мониторинга уровня моря в прибрежных условиях.

Для этого были выполнены следующие задачи:

- сбор и обработка данных спутниковой альтиметрии Sentinel-3;
- адаптация и применение трехмерной гидродинамической модели для расчета высоты поверхности моря;
- анализ расхождений между спутниковыми, модельными и натурными данными;
- определение среднеквадратичной ошибки (RMSE) и оценка надежности спутниковых данных для мониторинга Азовского моря.

Таким образом, настоящее исследование направлено на расширение возможностей спутниковой альтиметрии в прибрежных районах и улучшение методов оценки данных Sentinel-3 в сложных гидродинамических условиях Азовского моря.

Материалы и методы

Данные спутниковой альтиметрии. Спутниковая альтиметрия (СА) представляет собой метод дистанционного измерения уровня моря, основанный на использовании радиолокационного высотомера, который излучает электромагнитный импульс и фиксирует время его возврата после отражения от водной поверхности. Этот метод позволяет проводить глобальные измерения высоты поверхности моря (SSH) и обеспечивает ценные данные для анализа изменений уровня воды в прибрежных и открытых морских районах.

Спутник Sentinel-3 (рис. 1), запущенный Европейским космическим агентством (ESA) в рамках программы Copernicus, оснащен радиовысотомером SRAL (Synthetic Aperture Radar Altimeter), который работает в двух режимах:

- Low Resolution Mode (LRM) — традиционная альтиметрия с относительно низким пространственным разрешением;
- Synthetic Aperture Radar (SAR) Mode — режим синтезированной апертуры, обеспечивающий повышенное разрешение и более точное измерение уровня моря, особенно в прибрежных районах.



Рис. 1. Художественное изображение Sentinel-3 [2]

В данном исследовании анализировались данные, полученные в SAR-режиме, который позволяет минимизировать влияние переотражений сигнала от суши и повысить точность измерений в сложных гидродинамических условиях.

Спутник Sentinel-3 движется по солнечно-синхронной орбите с высотой 814 км и наклоном $98,6^\circ$, обеспечивая покрытие всей земной поверхности с периодом повторного захода над одной и той же областью каждые 27 дней (в сочетании с Sentinel-3B период повторения сокращается до 13,5 дней) (рис. 2). Радиовысотомер SRAL функционирует в диапазоне Ku/C и передает импульсы с частотой 1 кГц, что позволяет получать измерения уровня моря с временным разрешением 20 Гц (т. е. одно измерение примерно каждые 350 м по трассе спутника) (рис. 3) [2].

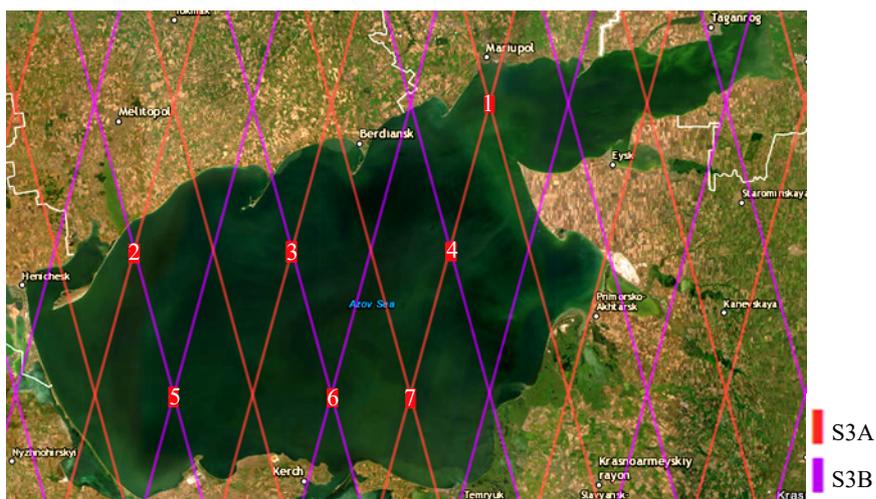


Рис. 2. Расположение района исследования, линии обозначают проходы Sentinel-3

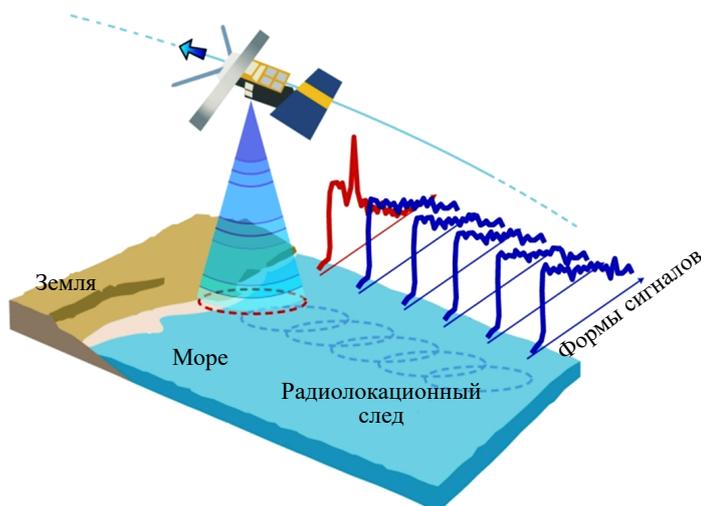


Рис. 3. Изменение формы сигналов (красным цветом) при приближении спутникового высотомера к побережью и входе в зону действия радара [2]

Альтиметр на борту спутника передает микроволновое излучение с двумя частотами в направлении поверхности моря и регистрирует время, необходимое для обратного прохождения сигнала на спутник. Первоначальное расстояние $R(\lambda, \phi, t)$ в точке с определенными координатами и в момент времени t корректируется с учётом влияния атмосферы и инструментальных погрешностей. Скорректированное расстояние R_c вычисляется по формуле [3]:

$$R_{corr}(\lambda, \phi, t) = R(\lambda, \phi, t) - C_r,$$

где поправки C_r , применяемые к спутниковому расстоянию, включают: сдвиг за счет состояния моря, который корректирует влияние волн на отражение радиолокационного сигнала; полярные приливы, вызванные изменением формы Земли из-за движения масс в полярных областях; приливы твердого тела, учитывающие деформацию земной коры под воздействием гравитации Луны и Солнца; ионосферную поправку, учитывающую влияние электронной плотности в ионосфере на распространение радиоволн; сухую и влажную тропосферные поправки, связанные с преломлением радиоволн в атмосфере из-за наличия водяного пара и других газов. Эти поправки необходимы для того, чтобы минимизировать систематические ошибки и обеспечить высокую точность спутниковых измерений уровня моря.

После учета всех поправок высота поверхности моря, определенная по данным спутника, рассчитывается следующим образом:

$$SSH_{SA}(\lambda, \phi, t) = h_{sat}(\lambda, \phi, t) - R_{corr}(\lambda, \phi, t),$$

где $SSH_{SA}(\lambda, \phi, t)$ — высота поверхности моря, определенная по данным спутниковой альтиметрии; $h_{sat}(\lambda, \phi, t)$ — высота спутника над референц-эллипсоидом; $R_{corr}(\lambda, \phi, t)$ — скорректированное расстояние от спутника до поверхности воды [4–5].

Проверка данных спутниковой альтиметрии Sentinel-3 проводится путем сравнения высот поверхности моря, полученных с альтиметра SSH_{SA} , с эталонными данными, которые включают измерения с платформ наблюдений в Азовском море SSH_{TG} и результаты моделирования на основе трехмерной гидродинамической модели SSH_{HDM} .

В исследовании использовались SSH-продукты Sentinel-3, полученные из официального центра данных Copernicus Data Hub [6]. Данные загружались в формате NetCDF и подвергались предварительной обработке, включающей:

- выбор участков орбиты Sentinel-3, проходящих над Азовским морем;
- фильтрацию и исключение шумовых данных с аномальными значениями;
- интерполяцию для согласования с координатами мареографов и гидродинамической модели.

Для проверки точности измерений Sentinel-3 данные SSH сравнивались с эталонными измерениями:

1. Наземные платформы наблюдений (мареографы) — данные о высоте уровня моря из баз Единой межведомственной федеральной информационной системы (ЕСИМО);
2. Численное моделирование — данные о высоте поверхности моря, полученные с помощью трехмерной гидродинамической модели (описание модели приводится в следующем разделе).

Оценка точности данных проводилась на основе расчета среднеквадратичной ошибки (RMSE) между значениями SSH из спутниковых данных и наблюдениями мареографов, а также анализом стандартного отклонения (STD) между данными Sentinel-3 и результатами моделирования.

Платформы наблюдений в Азовском море. Для верификации данных спутниковой альтиметрии Sentinel-3 в условиях прибрежной зоны Азовского моря использовались данные с семи платформ наблюдений (рис. 4), зарегистрированных в Единой межведомственной федеральной информационной системе (ЕСИМО). Эти платформы представляют собой мареографические станции, оборудованные высокоточным измерительным оборудованием, которое позволяет фиксировать уровни моря в реальном времени и обеспечивать долгосрочные ряды наблюдений [7].



Рис. 4. Платформы наблюдений в Азовском море

Мареографы, установленные в различных частях Азовского моря, выполняют непрерывную регистрацию колебаний уровня моря. Мареографические станции установлены вблизи ключевых гидродинамических узлов, где влияние волнения, ветровых нагонов и речного стока наиболее выражено. Это позволяет получить репрезентативные данные о динамике уровня моря в разных частях Азовского моря.

Прибрежные мареографы используются для измерения и непрерывной автоматической регистрации колебаний уровня Азовского моря. Высота морской поверхности $SSH_{TG}(\lambda_{TG}, \phi_{TG}, t)$ на основании данных мареографов может быть получена следующим образом:

$$SSH_{TG}(\lambda_{TG}, \phi_{TG}, t) = H_{TG}(t) + N_{TG}(\lambda, \phi),$$

где $H_{TG}(t)$ — уровень моря, измеренный мареографом относительно нулевого уровня национальной вертикальной системы отсчета.

Для корректного сравнения со спутниковыми данными использовались мареографы, расположенные на различном удалении от берега: от глубоководных участков до мелководных зон, подверженных влиянию береговой линии. Такое распределение позволяет оценить точность альтиметрических данных Sentinel-3 в зависимости от расстояния до берега, определить влияние береговых эффектов на спутниковые измерения, учесть локальные особенности гидродинамики Азовского моря при анализе расхождений в данных. Расположение мареографических станций представлено на рис. 2, где отмечены координаты каждой платформы наблюдений.

Данные мареографических наблюдений были приведены к единой системе отсчета для корректного сравнения с данными спутниковой альтиметрии и гидродинамического моделирования. Обработка включала:

- гармонический анализ приливных и нагонных колебаний уровня моря;
- фильтрацию высокочастотных флуктуаций, вызванных локальными гидродинамическими процессами (например, кратковременными ветровыми эффектами);
- приведение данных к референц-уровню, согласованному с геоидом, используемым в спутниковых измерениях;
- интерполяцию временных рядов для сопоставления с проходами спутника Sentinel-3.

Дополнительно проведен анализ статистических характеристик измеренных данных, включая среднее значение, стандартное отклонение (STD) и размах колебаний уровня моря для каждой станции.

Пространственно-неоднородная трехмерная математическая модель волновой гидродинамики мелководного водоема. Исходными уравнениями модели волновой гидродинамики являются [8–12]:

- уравнение движения (Навье-Стокса):

$$\begin{aligned} u'_t + uu'_x + vv'_y + ww'_z &= -\frac{1}{\rho} P'_x + (\mu u'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (v u'_z)'_z, \\ v'_t + uv'_x + vv'_y + ww'_z &= -\frac{1}{\rho} P'_y + (\mu v'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (v v'_z)'_z, \\ w'_t + uw'_x + vw'_y + ww'_z &= -\frac{1}{\rho} P'_z + (\mu w'_x)'_x + (\mu w'_y)'_y + (v w'_z)'_z + g; \end{aligned} \quad (1)$$

- уравнение неразрывности в случае переменной плотности:

$$\rho'_t + (\rho u)'_x + (\rho v)'_y + (\rho w)'_z = 0, \quad (2)$$

где $V = \{u, v, w\}$ — компоненты вектора скорости; P — давление; ρ — плотность; μ, ν — горизонтальная и вертикальная составляющие коэффициента турбулентного обмена; g — ускорение свободного падения.

Система уравнений (1)–(2) рассматривается при следующих граничных условиях:

- на входе

$$u(x, y, z, t) = u(t), \quad v(x, y, z, t) = v(t), \quad P'_n(x, y, z, t) = 0, \quad V'_n(x, y, z, t) = 0,$$

- боковая граница (берег и дно)

$$\begin{aligned} \rho \mu (u')_n(x, y, z, t) &= -\tau_x(t), \quad \rho \mu (v')_n(x, y, z, t) = -\tau_y(t), \\ V'_n(x, y, z, t) &= 0, \quad P'_n(x, y, z, t) = 0, \end{aligned}$$

- верхняя граница

$$\begin{aligned} \rho \mu (u')_n(x, y, z, t) &= -\tau_x(t), \quad \rho \mu (v')_n(x, y, z, t) = -\tau_y(t), \\ w(x, y, t) &= -\omega - P'_t / \rho g, \quad P'_n(x, y, t) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω — интенсивность испарения жидкости; τ_x, τ_y — составляющие тангенциального напряжения.

Составляющие тангенциального напряжения для свободной поверхности $\{\tau_x, \tau_y\} = \rho_a C_d_s |\vec{w}| \{w_x, w_y\}$, $C_d_s = 0,0026$, где \vec{w} — вектор скорости ветра относительно воды, ρ_a — плотность атмосферы, C_d_s — безразмерный коэффициент поверхностного сопротивления, который зависит от скорости ветра, рассматривается в диапазоне 0,0016–0,0032.

Составляющие тангенциального напряжения для дна с учетом движения воды можно записать следующим образом $\{\tau_x, \tau_y\} = \rho C_d_b |V| \{u, v\}$, $C_d_b = gn^2 / h^{1/3}$, где $n = 0,04$ групповой коэффициент шероховатости в формуле Мэннинга (0,025–0,2); $h = H + \eta$ — глубина акватории, м; H — глубина до невозмущенной поверхности, м; η — высота свободной поверхности относительно геоида (уровень моря), м.

Данные гидродинамической модели об уровне моря $H_{HDM}(\lambda, \phi, t)$ относительно геоида будем использовать в виде:

$$SSH_{HDM}(\lambda, \phi, t) = H_{HDM}(\lambda, \phi, t) + N(\lambda, \phi).$$

Смещение между данными мареографов и трехмерной модели волновой гидродинамики может быть установлено в близлежащем местоположении мареографа в момент времени t :

$$B_{TG/HDM}(t) = SSH_{TG}(\lambda_{TG}, \phi_{TG}, t) - SSH_{HDM}(\lambda_{TG}, \phi_{TG}, t).$$

Смещение введено для каждого соответствующего узла ячейки сетки дискретной гидродинамической модели при вычислении SSH_{HD}

$$SSH_{HDMcorr}(\lambda, \phi, t) = SSH_{HDM}(\lambda, \phi, t) \cdot B_{TG/HDM}(t).$$

Для учета систематической погрешности $SSH_{diff}(\lambda, \phi, t)$ между данными спутника и гидродинамической модели вводится:

$$SSH_{diff}(\lambda, \phi, t) = SSH_{SA}(\lambda, \phi, t) - SSH_{HDMcorr}(\lambda, \phi, t).$$

Эффективность работы высотомера Sentinel-3 SRAL была оценена в прибрежной зоне Азовского моря. Данные дистанционного зондирования были получены из официального центра данных Copernicus в стандартном формате NetCDF [1]. На основе этих данных были рассчитаны SSH_{HDM} . Ряды наблюдений на 7 прибрежных мареографах были использованы для расчета $SSH_{TG}(\lambda_{TG}, \phi_{TG}, t)$ [2]. Трехмерная пространственно-неоднородная модель волновой гидродинамики мелководного водоема, включающая три уравнения движения, была использована для получения $SSH_{HDM}(\lambda, \phi, t)$ [3].

Результаты исследования

Сравнительный анализ данных спутниковой альтиметрии Sentinel-3, мареографических наблюдений и гидродинамического моделирования. Для оценки точности спутниковых данных Sentinel-3 проведено их сопоставление с натурными измерениями мареографов, расположенных в Азовском море, а также с результатами численного моделирования, выполненного с использованием трехмерной гидродинамической модели. Анализ основан на вычислении статистических характеристик различий между измеренными и расчетными значениями высоты поверхности моря с учетом пространственно-временной привязки данных.

Исследование охватывает 2024 год, в течение которого были проанализированы проходы спутников Sentinel-3A и Sentinel-3B над акваторией Азовского моря. Использовались продукты альтиметрии в SAR-режиме, обеспечивающие более высокую точность по сравнению с традиционными методами. Для каждого прохода спутника выделены точки пересечения с мареографами и сеткой гидродинамической модели.

Для верификации использованы:

- данные мареографов (семь станций), зафиксированные в базе Единой межведомственной федеральной информационной системы (ЕСИМО);
- спутниковые измерения SSH Sentinel-3, полученные из центра данных Copernicus;
- результаты трехмерной гидродинамической модели, адаптированной для условий Азовского моря.

Для количественной оценки расхождений между SSH, полученными различными методами, рассчитаны: среднеквадратичная ошибка (RMSE) — показатель разброса спутниковых данных относительно мареографических и модельных значений; среднее смещение (Bias) — величина систематической ошибки; стандартное отклонение (STD) — оценка степени разброса значений.

По итогам расчетов установлено, что общее среднеквадратичное отклонение RMSE между данными Sentinel-3 и мареографами составило 85 мм. Среднее смещение между спутниковыми данными и мареографами не превышает 2–3 см, что свидетельствует об отсутствии значительного систематического отклонения. STD варьируется от 6 до 9 см в зависимости от конкретного прохода спутника и его расстояния до берега.

В таблице 1 приведены статистические данные о разнице в показателях SSH. Общая величина разницы при всех четырнадцати проходах составляет 85 мм.

Для оценки влияния береговых эффектов на точность альтиметрии Sentinel-3 проведен анализ зависимости расхождений от удаленности точки измерения от побережья. На глубоководных участках (>20 км от берега) точность измерений максимальна: RMSE не превышает 6–7 см, STD — 5–8 см. В зонах 10–20 км от берега ошибки увеличиваются: RMSE достигает 7–9 см, STD — 6–9 см. В мелководных прибрежных зонах (<10 км от берега) отмечается ухудшение точности спутниковых данных, связанное с эффектами переотражения и влиянием динамических процессов в зоне берегового прибоя. В этих районах RMSE достигает 10–12 см, а STD — 9–12 см. Таким образом, данные Sentinel-3 в SAR-режиме демонстрируют высокую точность в открытых водах, но требуют коррекции при анализе прибрежных зон.

Трехмерная гидродинамическая модель, использованная в исследовании, позволила рассчитать SSH с высоким пространственно-временным разрешением, что дало возможность дополнительно оценить точность спутниковой альтиметрии. Анализ показал, что среднее расхождение между модельными и спутниковыми данными SSH составляет 4–6 см и подтверждает высокую точность расчетной модели. В зонах интенсивного речного стока (устья Дона, Кубани) расхождения увеличиваются до 8–10 см, что связано с изменчивостью плотности воды и течений. В глубоководных районах Азовского моря модельные данные совпадают со спутниковыми в пределах ± 5 см, что подтверждает их надежность.

Данные о разнице в показателях SSH

Точки	Проходы Sentinel-3	RMSE, мм	Расстояние от точки до побережья, км	Расстояние от точки до платформы, км
1	653 S3A	78	16,3	2,3
	270 S3A	106		
2	42 S3A	109	11,6	2,4
	425 S3B	84		
3	539 S3B	43	36,2	2,1
	156 S3A	115		
4	270 S3A	68	48,6	3,2
	653 S3B	102		
5	156 S3B	87	37,8	2,7
	425 S3B	110		
6	270 S3B	63	33,9	3,2
	539 S3B	75		
7	539 S3A	79	28,3	4,4
	270S3A	68		

Обсуждение и заключение. Спутниковая альтиметрия Sentinel-3 в SAR-режиме демонстрирует высокую точность измерений в открытых водах Азовского моря, но подвержена погрешностям в прибрежных зонах (<10 км от берега). Среднеквадратичная ошибка RMSE между спутниковыми и мареографическими данными составляет 85 мм, что соответствует уровню современных альтиметрических методов. Гидродинамическая модель показала хорошее соответствие данным Sentinel-3 (среднее расхождение 4–6 см), что подтверждает возможность совместного использования численного моделирования и спутниковых данных. Для дальнейшего повышения точности спутниковой альтиметрии в прибрежных зонах необходимо применение адаптивных алгоритмов фильтрации и коррекции данных. Таким образом, результаты исследования подтверждают эффективность применения данных Sentinel-3 для мониторинга уровня моря в Азовском море, а также обосновывают необходимость дальнейшего совершенствования методов коррекции спутниковых измерений в прибрежной зоне.

Список литературы / References

1. Arnold D, Montenbruck O, Hackel S, Sosnica K. Satellite laser ranging to low Earth orbiters: orbit and network validation. *J Geodesy*. 2019;93(11):2315–2334. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1140-4>
2. Catalog of spatial and temporal assets of the Copernicus data space ecosystem. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/> (дата обращения: 09.01.2025)
3. Cipollini P., Calafat F.M., Jevrejeva S. Monitoring sea level in the coastal zone with satellite altimetry and tide gauges. *Surv Geophys*. 2017;38:33. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9392-0>
4. EUMETSAT. *Sentinel-3 SRAL Marine User Handbook*. 2017;55.
5. Fernandez J., Peter H., Calero E.J., Berzosa J., Gallardo L.J., Femenias P. Sentinel-3A: Validation of orbit products at the Copernicus POD service. *Fiducial Reference Measurements for Altimetry, International Association of Geodesy Symposia*. 2019;150:75–82. https://doi.org/10.1007/1345_2019_64
6. Montenbruck O., Hackel S., Jaggi A. Precise orbit determination of the Sentinel-3A altimetry satellite using ambiguity-fixed GPS carrier phase observations. *J Geodesy*. 2018;92:711–726. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1090-2>
7. Unified State Information System on the Situation in the World Ocean. URL: <http://portal.esimo.ru/> (дата обращения: 09.01.2025)
8. Protsenko S., Sukhinova T. Mathematical modeling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures. *MATEC Web Conf*. 2017;04002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204002>
9. Проценко С.В., Проценко Е.А., Харченко А.В. Сопоставление результатов численного моделирования процессов гидродинамики в мелководных водоемах с аналитическим решением. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;7(3):49–63. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-3-49-63>
10. Protsenko S.V., Protsenko E.A., Kharchenko A.V. Comparison of hydrodynamic processes modelling results in shallow water bodies based on 3D model and 2D model averaged by depth. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;7(3):49–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-7-3-49-63>
10. Сухинов А.И., Проценко С.В., Панасенко Н.Д. Математическое моделирование и экологическое проектирование состояния морских систем с учетом разномасштабной турбулентности с использованием данных дистанционного зондирования. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2022;6(3):104–113. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2022-1-3-104-113>

Sukhinov A.I., Protsenko S.V., Panasenko N.D. Mathematical modeling and ecological design of the marine systems taking into account multi-scale turbulence using remote sensing data. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2022;6(3):104–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2022-1-3-104-113>

11. Сухинов А.И., Проценко Е.А., Чистяков А.Е., Шретер С.А. Сравнение вычислительных эффективностей явной и неявной схем для задачи транспорта наносов в прибрежных водных системах. В: *Труды международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии (PaVT'2015)»*. Екатеринбург: издательский центр ЮУрГУ; 2015. С. 297–307.

Sukhinov A.I., Protsenko E.A., Chistyakov A.E., Shreter S.A. Comparison of computational efficiency of explicit and implicit schemes for the problem of sediment transport in coastal water systems. *Parallel Computational Technologies (PaVT'2015). Proceedings of the International Scientific Conference*. 2015. P. 297–307. (In Russ.)

12. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. Построение дискретной двумерной математической модели транспорта наносов. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011;8(121):32–44.

Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Construction of a discrete two-dimensional mathematical model of sediment transport. *Izvestiya SFedU. Technical Sciences*. 2011;8(121):32–44. (In Russ.)

Об авторах:

Проценко Софья Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, научный сотрудник, Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (347936, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48), [ORCID](#), [SPIN-код](#), rab5555@rambler.ru

Проценко Елена Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, ведущий научный сотрудник, Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (347936, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48), [ORCID](#), [SPIN-код](#), eapros@rambler.ru

Харченко Антон Владимирович, научный сотрудник Таганрогского института им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (347936, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48), kharch_91@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

С.В. Проценко: разработка концепции; научное руководство.

Е.А. Проценко: курирование данных; деятельность по аннотированию, очистке данных и поддержанию их целостности; разработка программного обеспечения; визуализация.

А.В. Харченко: проведение исследования; разработка методологии; валидация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Sofia V. Protsenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Research Fellow, A.P. Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics (48, Initiative St., Taganrog, 347936, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), rab5555@rambler.ru

Elena A. Protsenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Leading Research Fellow, A.P. Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics (48, Initiative St., Taganrog, 347936, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), eapros@rambler.ru

Anton V. Kharchenko, Research Fellow at the Taganrog Institute of A.P. Chekhov (branch) of the Rostov State Economic University (48, Initiative St., Taganrog, 347936, Russian Federation), kharch_91@rambler.ru

Contributions of the authors:

S.V. Protsenko: concept development; scientific guidance.

E.A. Protsenko: data management; annotation, data cleaning, and maintaining data integrity; software development; visualization.

A.V. Kharchenko: conducting research; methodology development; result validation.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.01.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.02.2025

Принята к публикации / Accepted 28.02.2025