© Исаченко А. Е., Васильев П. А., Гриценко В. А., 2026, Океанологические исследования, 2026, Том 54, № 3, С. 199–216

УДК 551.465 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).10

ПРОБЛЕМЫ ВЕРИФИКАЦИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

А. Е. Исаченко[1], П. А. Васильев[2], В. А. Гриценко[1]

[1] Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;
[2] Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, д. 14,
e-mail: kupriyanova.ae@atlantic.ocean.ru, pavel.img@gmail.com, gritsenko-vl-al@mail.ru

В работе изложен один из подходов получения оценок соответствия модельных расчетов и данных натурных наблюдений (т. е. одного из этапов верификации модельных расчетов) на основе предположения о непрерывном характере изменчивости природной системы (морской акватории) и использования методов функционального анализа. Суть подхода состоит в том, что, рассматривая натурные и модельные значения температуры морской воды как дискретные образы реального непрерывного процесса изменения одного из параметров природной системы, задачу об оценке «близости» дискретных временных рядов можно заменить на сравнение их непрерывных прообразов, что хорошо разработано в классическом функциональном анализе. Подтвержден вывод о том, что для констатации факта несовпадения измеренных (эталонных) и рассчитанных на модели (проверяемых) значений изменчивости любого термодинамического параметра конкретной морской акватории (в данной работе температура воды), использование критериев поточечной близости (MAE) или среднеквадратичного отклонения (RMSE) вполне достаточно. Однако, для понимания качества учета в модели «подсеточных» процессов могут оказаться полезными предложенные в работе безразмерные критерии «близости». Иллюстрация работоспособности предлагаемых критериев выполнена на примере сравнения данных Baltic Sea Physical Reanalysis и инструментально измеренных значений температуры морской воды в период осеннего выхолаживания прибрежных вод Балтийского моря.

Ключевые слова: верификация моделей, анализ временных рядов, безразмерные критерии «близости» данных, температура воды, Baltic Sea Physical Reanalysis, прибрежные воды, Балтийское море

Введение

Массовая цифровизация всех аспектов человеческого бытия, обусловленная развитием технологий измерения и хранения данных, привела к созданию значительных по объему массивов экспериментальных данных (наборов временных рядов) и актуализировала развитие методов их обработки. Известно (Апанович, Гладилин, 2025; Бендат, Пирсол, 1974; Гуляев, Пивнева, 2025), что методы анализа временных рядов позволяют находить различного рода закономерности изменений значений компонент временного ряда во времени (или пространстве), а также устанавливать возможные взаимозависимости двух временных рядов между собой. Быстрорастущий объем

массивов данных обусловил необходимость разработки эффективных методов их анализа (Eilola et al., 2011; Hjelmervik, Hjelmervik, 2012; Paparrizos et al., 2009). Например, в работе (Апанович, Гладилин, 2025) рассмотрены проблемы сравнения временных рядов в области психофизиологии. В другом источнике (Максимова, 2025) рассмотрены проблемы поиска сходства вокальных исполнений. Для решения задачи оценки эффективности моделирования речного стока предложен набор метрик и выполнена их классификация (Борщ и др., 2020). Понимание, что оценка сходства или различия временных рядов зависит от природы данных и конкретных задач их анализа, привело к возникновению множества мер оценки их «близости» и появлению в практике исследований более сотни различных мер расстояния, классифицированных по семи категориям (Paparrizos et al., 2009). Данная тенденция нашла свое отражение в построении различных критериев «близости» временных рядов при анализе соответствия массивов реанализа (Balmaseda et al., 2015; Eilola et al., 2011; Wang et al., 2022). Сразу отметим, что предлагаемый в работе подход находится в общем тренде поиска оптимальных для конкретного класса задач метрик оценки близости временных рядов, а сам набор метрик соответствует классу эластичных метрик (Paparrizos et al., 2009). Перечисленные обстоятельства позволяют говорить об актуальности поиска оценки степени «близости» модельных расчетов и массивов реанализа, часто возникающих при верификации численных моделей.

В фокусе внимания данной работы – проблема выбора критериев «близости» при верификации численного моделирования морских акваторий, способных выявить воздействие «подсеточных» процессов на величину ошибок. Как известно (Мезингер, Аракава, 1979), развитие возможностей в вычислительной технике позволило численному моделированию превратиться в рабочий инструмент изучения морских акваторий. Обладая очевидными достоинствами в виде полноты охвата по пространству и времени изменчивости выбранной для изучения морской акватории, результаты расчетов на любой численной модели с необходимостью должны проходить процедуру верификации. При этом для сравнения в качестве эталонных часто выбираются различного рода экспериментальные данные – массивы CTD-зондирований или комплексных полигонных наблюдений. Отметим, что расчетные данные моделей и результаты инструментальных измерений имеют, как правило, различную дискретность по пространству и времени. В результате всегда возникает проблема сравнения расчетных и экспериментальных данных, несинхронных по «времени наблюдений» и сделанных в различных по пространству «точках наблюдения». Сегодня для преодоления отмеченных несоответствий при верификации модельных расчетов широко используются различного рода процедуры осреднения экспериментальных данных для приведения к более грубым масштабам численного моделирования. При осреднении часть физически содержательной информации о процессах изменчивости объекта исследования, потенциально полезной для понимания возникновения ошибок модельных расчетов, автоматически теряется. Отметим также, что широко используемые критерии оценки «близости» временных рядов MAE (the mean absolute error) и RMSE (the root mean square error) (Frassl et al., 2018; уравнения 2–3) не являются

безразмерными и не дают прямого ответа на вопрос о качестве соответствия одного временного ряда другому.

Одним из результатов создания численных моделей морских акваторий стало появление так называемых массивов реанализа (Liu et al., 2019). Традиционный модельный счет выполняется с использованием процедур усвоения различного рода экспериментальных данных, включающих использование CTD- и метео- измерений, а также спутниковых данных. Процедуры усвоения позволяют повысить степень соответствия модельных расчетов с реальной изменчивостью конкретных морских акваторий. Различные варианты реанализа сегодня широко используются в практике современных океанологических исследований как в качестве данных об изменчивости морских акваторий (Kapustina, Zimin, 2023), так и при построении численных моделей меньшего пространственного охвата (Frassl et al., 2018). Например, пространственно-временные метеоданные массива NSEP по всему району исследований обеспечили исследование реакции TS-структуры прибрежных вод Черного моря на ветровое воздействие (Зацепин и др., 2016). Данные двух массивов реанализа ERA5 и Baltic Sea Physics Reanalysis вместе со спутниковыми позволили исследовать межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня Балтийского моря (Захарчук и др., 2023).

В работе (Vasilyeva et al., 2025) для условий прибрежной зоны моря были обнаружены существенные несоответствия данных реанализа Baltic Sea Physics Reanalysis с данными контактных измерений температуры воды, особенно в межсезонные периоды. В процессе анализа величин несоответствия данных оказалось, что оценки по обычно используемым критериям не позволяют определить их значимость в контексте естественных масштабов изменчивости природной системы. Подчеркнем особую важность оценки репрезентативности расчетных данных реанализа при их использовании для задания начального состояния и при построении расчетных условий на свободных границах конструируемых локальных (региональных) численных моделей, так как качество данных в значительной степени определяет качество модельных расчетов.

Цель данной работы заключается в изложении одного из подходов сравнения результатов модельных расчетов с данными натурных наблюдений, то есть одного из этапов верификации результатов численного моделирования, на основе предположения о непрерывности изменения параметров природной системы (морской акватории) и методов функционального анализа.

Методологические предпосылки

Определение критериев «близости» (сходства) временных рядов признано одним из фундаментальных элементов в задачах анализа временных рядов (Paparrizos et al., 2009). Поскольку понятие сходства (Balmaseda et al., 2015; Paparrizos et al., 2009), сильно зависит от семантики данных и задач их обработки, в настоящее время сконструировано и используется множество разнообразных критериев «близости». Суть

предлагаемого в работе подхода состоит в том, что измеренные и рассчитанные значения параметра морской воды (в нашем случае – температуры) рассматриваются как дискретные образы изучаемого непрерывного процесса изменчивости одного из параметров природной системы. Сделанное предположение позволяет рассматривать задачу об оценке «близости» дискретных временных рядов через сравнение их непрерывных прообразов, хорошо разработанное в технике классического функционального анализа (Вулих, 1958). В рамках подхода функционального анализа при оценке «близости» функций $f(x)$ и $g(x)$, непрерывных (или, как минимум, интегрируемых с квадратом) на некотором интервале $[a, b]$, используются типовые метрики, аналитический вид которых приведен ниже:

$$\delta\left(f\left(x\right),g\left(x\right)\right)=\sqrt{\int_a^b\left(f\left(x\right)-g\left(x\right)\right)^2\mathrm{d}x}, \tag{1}$$

$$\varepsilon\left(f\left(x\right),g\left(x\right)\right)=\int_a^b\left|f\left(x\right)-g\left(x\right)\right|\mathrm{d}x, \tag{2}$$

$$\zeta\left(f\left(x\right),g\left(x\right)\right)=\max_{[a,b]}\left|f\left(x\right)-g\left(x\right)\right|. \tag{3}$$

Еще раз обратим внимание, что модельные расчеты и натурные наблюдения описывают непрерывную по своей природе изменчивость параметров одной и той же природной системы (морской акватории). Данное обстоятельство на этапе постановки задачи позволяет считать корректным переход от дискретных массивов расчетов и натурных наблюдений к их непрерывным прообразам и последующую оценку степени их соответствия.

Обратим внимание, что метрика (1) по сути есть RMSE, а метрика (2) по своему смыслу близка к MAE. Наконец, метрика (3) есть оценка поточечной близости (the one-to-one), что позволяет говорить о соответствии широко используемых критериев «близости» временных рядов и методологии классического функционального анализа. Отметим, что в условиях работы с измерениями и расчетами температуры морской воды за конкретный временной интервал, все рассчитываемые оценки (1)–(3), как нетрудно убедиться, обладают физической размерностью, порождая тем самым проблемы нормировки для получения безразмерных оценок. Переход к безразмерным оценкам может дополнить понимание природы несоответствия измеренных и расчетных значений (или кратко – ошибок, невязок). При выборе параметров для вычисления безразмерных оценок «близости» кажется естественным сделать следующий выбор характерных масштабов для каждой из обозначенных выше метрик:

$$M\delta\left(f\left(x\right),\overline{f}\left(x\right)\right)=\sqrt{\int_a^b\left(f\left(x\right)-\overline{f}\left(x\right)\right)^2\mathrm{d}x}, \tag{4}$$

$$M\varepsilon\left(f\left(x\right)\right)=\int_a^b\left|f\left(x\right)-min_{[a,b]}f\left(x\right)\right|\mathrm{d}x, \tag{5}$$

$$M\zeta\left(f\left(x\right),\overline{f}\left(x\right)\right)=max_{[a,b]}\left|f\left(x\right)-\overline{f}\left(x\right)\right|, \tag{6}$$

где $\overline{f}\left(x\right)$ – среднее значение функции на некотором временном интервале. Здесь и в дальнейшем будем предполагать $f(x)$ эталонной, а $g(x)$ – проверяемой (сравниваемой)

функцией. Разумеется, сделанный выбор не является универсальным, как и множество других подходов, описанных в работах (Eilola et al., 2011; Paparrizos et al., 2009). После выбора характерных масштабов процесса искомые безразмерные количественные оценки «близости» или несовпадения сравниваемых функций (временных рядов) могут быть получены с использованием соотношений (1)–(6):

$$\Delta_{[a,b]}(x)=\frac{\delta\left(f(x),g(x)\right)}{M\delta\left(f(x),\bar{f}(x)\right)}, \tag{7}$$

$$\mathrm{E}_{[a,b]}(x)=\frac{\varepsilon\left(f(x),g(x)\right)}{M\varepsilon\left(f(x),\bar{f}(x)\right)}, \tag{8}$$

$$\mathrm{Z}_{[a,b]}(x)=\frac{\zeta\left(f(x),g(x)\right)}{M\zeta\left(f(x),\bar{f}(x)\right)}. \tag{9}$$

Предложенная метрика (7) формально близка показателю Нэша-Сатклифа (the Nash-Sutcliffe efficiency, NSE), используемого для оценки эффективности моделей, однако выведена на основе других физически содержательных предположений. Предложенные критерии (7)–(9) по характеру учета имеющихся невязок отличаются друг от друга. Аналог среднеквадратичных ошибок (критерий 7) за счет возведения в квадрат величин ошибок перед их суммированием усиливает значимость больших ошибок и уменьшает малых. Второй критерий (8) считает большие и малые величины невязок равнозначными. Наконец, третий критерий (9) работает только с оценкой разности амплитуд ошибок. Таким образом, совместное использование (7)–(9) позволяет оценить несовпадение временных рядов с трех различных точек зрения.

Обратим внимание на гибкость предложенных критериев «близости» за счет возможности выбора временного интервала [α, β] для вычисления среднего значения измеряемого параметра морской воды или процесса, являющегося ключевым параметром всех выбранных масштабов нормировки (7)–(9):

$$\bar{f}(x)=\frac{1}{\beta-\alpha}\int_{\alpha}^{\beta}f(x)\,\mathrm{d}x.$$

В данной работе величина интервала осреднения [α, β] совпадает с дискретизацией осредненных результатов модельного счета и составляет, таким образом, 1 сутки. Заметим, что при осреднении уже зафиксированных любых экспериментальных данных всегда теряется информация об изменчивости конкретного параметра внутри интервала осреднения. Данная информация может быть полезна при анализе ошибок, возникающих при модельных расчетах.

Понятен геометрический смысл выбранных масштабов нормировок (4)–(6). Первый из них (4) определяет среднеквадратичное отклонение всех значений эталонного ряда относительно своего среднего значения для интервала [*a, b*] или дисперсию эталонного ряда. Второй (5) определяет интегральную оценку (площадную) превышения значений эталонного ряда относительно своего минимального значения на интервале [*a, b*].

Наконец, третий (6) оценивает величину максимальной амплитуды различия значений эталонного ряда относительно своего среднего значения на интервале [*a, b*]. При работе с конкретным процессом, описывающим изменчивость какого-либо термодинамического параметра природной системы, масштабы (4)–(6) приобретают вполне конкретный физический смысл.

Массивы данных

Демонстрация возможностей предложенного подхода будет выполнена на примере сравнения расчетных временных рядов одного из массивов реанализа (Baltic Sea Physical Reanalysis product (BSPRp) (Liu et al., 2019)) с многолетними данными измерений температуры морской воды в прибрежной части Балтийского моря (Мысленков и др., 2017). Кратко охарактеризуем сравниваемые массивы данных. В качестве эталонных были выбраны результаты измерений температуры морской воды в одной точке датчиками термокосы, установленной на нефтедобывающей платформе D6 примерно в 20 км от основания Куршской косы (Калининградская область, Россия). Глубина рядом с платформой D6 составляет 29 м (Мысленков и др., 2017). Термодатчики косы обладают точностью регистрации ±0.025 °C и расположены на глубинах −1, 0, 1, 3, 5, 8, 10, 13, 20, 24 и 28 м. Дискретность измерений температуры во времени составляла 1 минуту. Карта-схема акватории Юго-Восточной Балтики, ориентировочное местоположение платформы D6 приведены на рисунке 1.

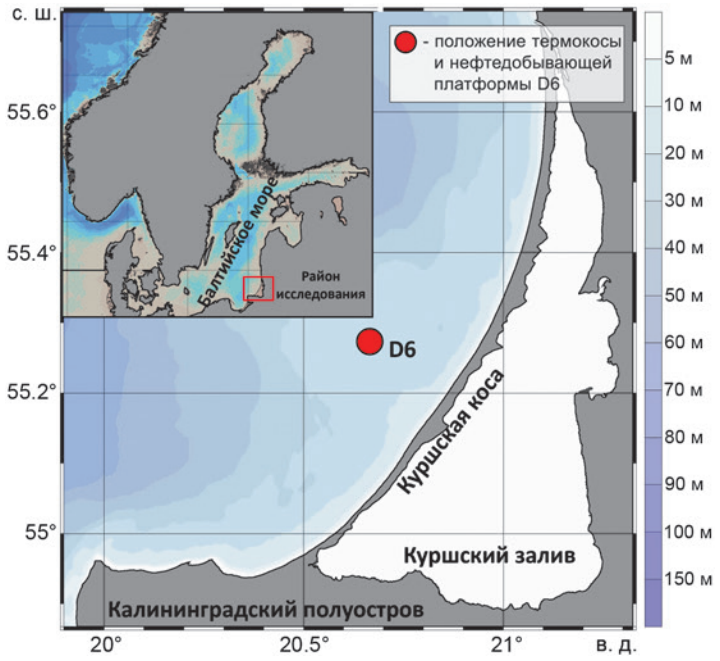


Рис. 1 – Карта-схема прибрежной акватории Балтийского моря у берегов Куршской косы (Калининградская область, РФ). Красной точкой обозначено положение термокосы, установленной на нефтедобывающей платформе D6. Справа приведена шкала глубин

Для иллюстрации работы трех выбранных метрик (7)–(9) в качестве проверяемых использовались расчетные данные реанализа Copernicus Marine Environment Monitoring Service portal Baltic Sea Physical Reanalysis product (BSPRp), содержащие ежесуточные значения температуры воды от поверхности до дна (56 слоев модели NEMO) на регулярной прямоугольной сетке с размером ячейки 2×2 км (Liu et al., 2019). Массивы расчетных данных выбранного реанализа формируются с использованием модели Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO-Nordic), включающей в себя процедуру ассимиляции данных Local singular evolutive interpolated Kalman (LSEIK). В эту процедуру входят также спутниковые данные о температуре поверхности моря уровня L4 и CTD-профили со стационарных точек наблюдений. Перечисленные процедуры повышают качество моделирования эволюции полей Балтийского моря. В нашей работе были использованы данные октября 2019 г. для ячейки реанализа с координатами центра 55.275° с. ш. и 20.652° в. д. Выбор конкретного массива реанализа мотивирован задачами определения начального состояния полей и условий на свободных границах модельного пространства, которые возникли при построении региональной модели динамики вод юго-восточной части Балтики у берегов Калининградской области.

Результаты

Рассмотрим теперь количественные оценки «близости» расчетных и инструментально измеренных временных рядов, полученных при помощи часто используемых в практике исследований размерных и предложенных в работе безразмерных критериев. В работе были использованы данные одной из недель октября 2019 г., то есть в период активного выхолаживания прибрежных вод моря. Ниже приводятся результаты сравнения расчетных данных реанализа и данных контактных измерений температуры морской воды на горизонтах 5.8 м и 5 м, соответственно. Данный горизонт наблюдения рассматривается как наиболее обеспеченный измерениями, поскольку соответствующий датчик термокосы всегда находится в воде и его показания менее подвержены ветро-волновому воздействию, а изменчивость температуры морских вод на горизонте ≈5 м достаточно высока (близка к изменчивости поверхностного слоя). Выбор октября сделан на основе ранее выполненного исследования (Vasilyeva et al., 2025), показавшего наличие значительных изменений температуры воды в этом месяце. На рисунке 2 приведены графики изменений расчетной и измеренной температуры морской воды вместе с величинами ошибок для каждого из дней недели, рассчитанных по обычно используемым критериям «близости» временных рядов (one-to-one: $\max\left|\Delta T\right| = \max\left|T_{\text{rean.}} - T_{\text{measur.}}\right|$ и RMSE).

На приведенных графиках заметны расхождения (до 1 °C) между измеренными значениями, которые в работе рассматриваются как эталонные, и рассчитанными на модели NEMO-Nordic (проверяемые). Первая из оценок (one-to-one) дает максимальные значения расстояний между точками сравниваемых массивов данных, а вторая – показывает величину среднеквадратичного отклонения между ними (RMSE). Отметим

смену общего хода изменчивости температуры морской воды: охлаждение в первые 3 дня, а потом – медленное повышение температуры, расчетные данные воспроизводят правильно, но с большой невязкой значений для периода повышения температуры. Таким образом, для простой констатации факта несовпадения измеренных и рассчитанных значений, в данном случае – температуры морской воды, стандартных оценок «близости» временных рядов вполне достаточно. Однако, обратим внимание, что процедуры получения оценок никак не связаны с масштабами естественной изменчивости параметров вполне конкретной морской акватории. Полученные оценки носят, в известной степени, формальный характер и не дают ответ на вопрос о качестве несоответствия данных в контексте характерных масштабов изменчивости моделируемой природной системы. С другой стороны, известно (Мезингер, Аракава, 1979; Монин и др., 1974), что ни одна численная модель не может разрешить реально наблюдаемую многомасштабность процессов изменчивости всех термодинамических параметров морских акваторий. В нашем случае данные реанализа имеют масштабы дискретности в 2 км по пространству и 1 сутки по времени. Данное обстоятельство обусловливает необходимость косвенного учета всех подсеточных процессов и появление процедур их параметризации (Вудс, 1979). Дополнение традиционных размерных оценок «близости» безразмерными оценками, нормированными на масштабы естественной изменчивости изучаемого процесса (4)–(6), может дать более детальную оценку природы несоответствия модельных расчетов.

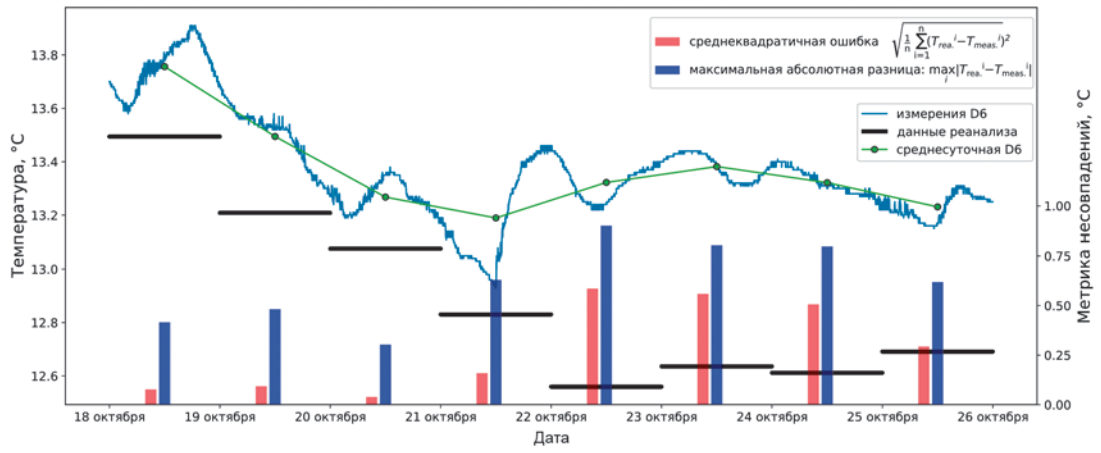


Рис. 2 – Графики измеренных значений температуры морской воды на глубине 5 м для 18–25 октября 2019 г. (термокоса, тонкая непрерывная кривая), их среднесуточные значения (зеленые точки с линией) и среднесуточные значения реанализа (горизонтальные черные линии). Величины несоответствия между ними по обычно используемым критериям близости (one-to-one и RMSE). Размерные шкалы для графиков температуры (слева) и метрик (справа) имеют разные масштабы

Обсудим теперь использование предложенных выше трех метрик (7)–(9) на примере сравнения значений температуры морской воды для той же недели октября в 2019 г. На рисунке 3 приведены графики изменчивости температуры морской воды для периода с 18 по 25 октября вместе с оценками различия между расчетными и

измеренными температурами для каждого из дней недели (7)–(9) в виде столбчатых диаграмм.

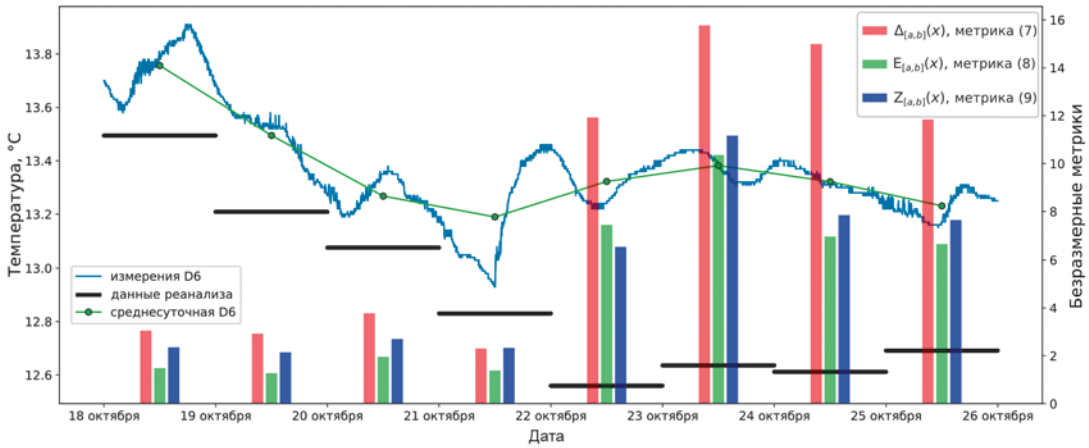


Рис. 3 – Графики измеренных (термокоса) и рассчитанных (реанализ) значений температуры воды для одной недели октября 2019 г. Величины ошибок, рассчитанных по трем метрикам (7)–(9), приведены в виде столбчатой диаграммы: красный столбец – $\Delta_{[a,b]}(x)$, салатовый – $E_{[a,b]}(x)$, синий – $Z_{[a,b]}(x)$

Легко заметить, что большие величины ошибок (7)–(9) соответствуют большим поточечным различиям между измеренными и рассчитанными значениями (см. ошибки в первую и вторую половины недели). Диапазон максимума различий сравниваемых рядов составляет примерно от 0.25 до 0.9 °С (см. рисунок 2, синий столбец). Наименьшие значения ошибок наблюдались на фоне относительно малых различий измеренных и рассчитанных значений температуры – до 0.5 °С в начале недели, а наибольшие – во второй половине, на фоне заметно большей разницы до 0.9 °С. Общий ход процесса изменения температуры воды за выбранный период расчетные данные отображают верно, но с систематическим занижением температуры воды (в начале – до 0.2 °С, а во второй половине – до 0.8 °С), что и отражают полученные оценки.

При этом первые столбцы (красные столбцы, рисунок 3, $\Delta_{[a,b]}(x)$) отображают величину отношения среднеквадратичного различия измеренных и рассчитанных значений относительно дисперсии эталонного ряда за один расчетный шаг по времени. Вторые столбцы (салатовые, рисунок 3, $E_{[a,b]}(x)$) отражают отношение площадей ошибок между суммарной ошибкой за единичный шаг по времени расчетных и измеренных значений температуры воды относительно аналогичного показателя для измеренных значений и их минимума. Данный показатель позволяет оценить отношение «размахов», проинтегрированных на один расчетный шаг по времени. Третьи столбцы диаграммы (синие, рисунок 3, $Z_{[a,b]}(x)$) отражают отношение колебаний разницы между измеренными и рассчитанными значениями температуры морской воды относительно колебаний измеренных значений к своему среднему значению. Таким образом, получена оценка отношения «размахов» эталонного и проверяемого ряда относительно измеренного «размаха» эталонного ряда.

Табл. 1 – Результаты применения предложенных метрик (7)–(9), нормированных за суточный и недельный периоды, на примере одной недели с 18 по 25 октября 2019 г.

Период осреднения эталонного ряда	Название метрики	Октябрь 2019							
		18 окт.	19 окт.	20 окт.	21 окт.	22 окт.	23 окт.	24 окт.	25 окт.
сутки	$Z_{[a,b]}(x)$	2.355	2.144	2.699	2.326	6.547	11.163	7.846	7.640
	$E_{[a,b]}(x)$	1.485	1.274	1.956	1.384	7.441	10.358	6.978	6.665
	$\Delta_{[a,b]}(x)$	3.049	2.926	3.772	2.301	11.923	15.766	14.990	11.838
	$M\zeta$	0.008	0.011	0.003	0.030	0.004	0.002	0.002	0.002
	$M\varepsilon$	0.176	0.225	0.098	0.259	0.102	0.072	0.102	0.081
	$M\delta$	0.177	0.225	0.112	0.271	0.137	0.072	0.102	0.081
неделя	$Z_{[a,b]}(x)$	0.771	1.508	1.511	1.429	5.974	11.599	5.297	2.804
	$E_{[a,b]}(x)$	1.485	1.274	1.956	1.384	7.441	10.358	6.978	6.665
	$\Delta_{[a,b]}(x)$	0.700	1.882	1.712	1.589	9.536	15.334	10.435	3.685

Рассмотрим теперь полученные при помощи метрик (7)–(9) количественные оценки относительно внутрисуточной изменчивости («подсеточной», в контексте модельных расчетов) температуры морской воды (таблица 1, период нормирования – сутки). В частности, сравним величины ошибок для 19 и 24 октября 2019 г., для которых наблюдалось монотонное понижение температуры воды с различными градиентами. Рассчитанные безразмерные ошибки для этих дней отличались в среднем в 5 раз, а именно для колебаний разницы сравниваемых данных $Z_{[a,b]}(x)$ в 3.5 раза, для отношения площадей – $E_{[a,b]}(x)$ в 5.4 раза и для отношения среднеквадратичного отклонения рядов и дисперсии эталона – $\Delta_{[a,b]}(x)$ в 5 раз. Максимальное поточечное различие (ΔT) значений температуры 19 и 24 октября на графике на рисунке 2 составляют, соответственно, 0.4 и 0.8 °C, то есть отличие только в два раза. Полученное отличие ошибок объясняется тем, что 19 октября величины масштабов почти совпали ($M\varepsilon \approx M\delta \approx 0.2$), а изменение температуры воды относительно своего среднего колеблется в диапазоне ±0.2 °C. 24 октября на графиках (рисунок 2) отчетливо виден больший интервал разницы измеренных и расчетных значений (one-to-one), а величины масштабов ($M\varepsilon$ и $M\delta$) почти в два раза меньше, чем 19 октября (0.2/0.1, соответственно). Кроме того, колебания температуры относительно своего среднего значения заметно меньше, всего ±0.05 °C, что определяет меньшее значение знаменателя в метрике $\Delta_{[a,b]}(x)$.

Таким образом, предложенные метрики (7)–(9), вслед за обычно используемыми one-to-one и RMSE, отражают минимальность показателей метрик 19 октября и их значительные величины 24 октября. Однако, дополнительно рассчитанные безразмерные ошибки показали степень различия диапазонов изменчивости измеренных и рассчитанных значений (критерий 9, $Z_{[a,b]}(x)$), величины интегральных для каждого дня площадей невязок ($E_{[a,b]}(x)$) и отношение среднеквадратичной оценки между эталонным и проверяемым рядами относительно дисперсии эталонного ряда ($\Delta_{[a,b]}(x)$). В итоге, различия значений температуры и градиенты внутрисуточного изменения являются определяющими для расчета оценок несоответствия.

Наибольшие значения метрик были получены 23 октября 2019 г. Как показывают графики на рисунках 2 и 3, различие между эталонным и проверяемым рядом достигает максимального значения (рисунок 2 – one-to-one) по сравнению с остальными днями. RMSE рядов также довольно велико, но дисперсия эталонного ряда ($M\delta$), его площадь ($M\varepsilon$) и максимальное отличие эталона и его среднего ($M\zeta$) довольно малы. Таким образом, малые масштабы нормировок привели к значительному росту предлагаемых оценок «близости» рядов.

Если соотнести измеренные и расчитанные значения температуры морской воды к конкретному ее объему, то, найденные при помощи критериев (7)–(9), ошибки позволят получить количественные оценки теплосодержания этих объемов, что важно при решении задач теплообмена атмосферы и океана. Для прибрежных вод Юго-Восточной Балтики, где плотность вод определяется температурой, количественные оценки будут важны при изучении плотностной устойчивости вод.

Рассмотрим другую пару дней с существенно различными величинами безразмерных оценок (разница примерно в 4–5 раз) и качественно подобным внутрисуточным изменением температуры морской воды 21 и 22 октября. В эти дни температура воды из эталонного ряда сначала понижалась, а затем повышалась: 21 числа разница изменений составила примерно 0.55 °C, а 22 числа – только 0.2 °C. Поточечные разницы (ΔT) температуры сравниваемых рядов также отличаются: 21 числа они составляли диапазон от 0.2 до 0.6 °C, 22 октября – уже от 0.7 до 0.9 °C. В совокупности это и определило заметное расхождение всех рассчитанных оценок. Из расчетных формул метрик (7)–(9) заметно, что 21 октября получаются малые значения числителей и, наоборот, большие значения знаменателей, что определило малость безразмерных ошибок ($\Delta_{[a,b]}(x) = 2.3$; $E_{[a,b]}(x) = 1.4$; $Z_{[a,b]}(x) = 2.3$) по сравнению с 22 октября. Заметно больший диапазон несоответствия расчетных и измеренных величин температуры отмечается 22 числа. Вместе с большим различием интегральных показателей (1)–(3) и малостью дисперсии эталонной температуры были получены величины безразмерных ошибок (11.9; 7.4; 6.5; см. таблицу 1), в несколько раз превосходящие ошибки за предыдущий день. Существенная немонотонность изменения температуры воды и воздуха и скорости ветра за этот период привели к снижению точности расчетов модели реанализа. Для периода квази-монотонного понижения температуры с 18 по 21 октября наблюдается согласованность изменения контактных измерений на D6 и реанализа (см. рисунок 3).

Обратим внимание, что модель NemoNordic, используемая при построении данных реанализа, не смогла корректно воспроизвести переход от трехсуточного охлаждения воды к ее быстрому прогреву. Понятно, что, несмотря на малый шаг по времени в расчетах (Kärnä et al., 2021), 90 с для бароклинности и 3 с для баротропности, переход от расчетных данных к среднесуточным (данные имеют дискретность в 1 сутки) не позволяет отслеживать быстрые внутрисуточные изменения температуры. Однако даже отложенная по времени реакция оказалась заметно хуже – с поточечной ошибкой почти на 1 °C (см. рисунок 2, данные D6 и реанализа за 22–25 октября). Имеющаяся несинхронность расчетов по динамическим и термохалинным полям модели NemoNordic,

по-видимому, является одной из причин несовпадения сравниваемых массивов данных.

При переходе от охлаждения температуры воды к прогреву проверяемые значения неодинаково воспроизводят амплитуду изменения температуры эталонного ряда, а полученные значения ошибок хорошо отражают возникающие несоответствия. Наконец, изменчивость измеренных и рассчитанных значений (δ, ζ) также не воспроизводит изменчивость эталона относительно своего среднего значения ($M\delta$) и ($M\zeta$).

В таблице 1 в последних трех строчках приведены значения оценок несоответствия временных рядов с недельным расчетом величины среднего значения температуры морской воды по метрикам $\Delta_{[a,b]}(x)$ и $Z_{[a,b]}(x)$. Отметим, что в метрике $E_{[a,b]}(x)$ не учитываются осредненные за период эталонные данные. Как оказалось, переход к большему периоду времени для расчета среднего значения эталонной температуры не внес существенных изменений в порядок ошибок. Лишь в некоторые дни произошли локальные перемены в масштабах оценок. Так, например, 18, 20 и 25 октября наибольшей была метрика $E_{[a,b]}(x)$, а не метрика $\Delta_{[a,b]}(x)$, что свидетельствует о большом различии «площадей» эталонного и проверяемого рядов. Исключениями стали 18 и 25 числа, когда $\Delta_{[a,b]}(x)$ и $Z_{[a,b]}(x)$ метрики стали в несколько раз ниже значений полученных для суточного осреднения эталона (см. таблицу 1). Можно заметить, что только 18 октября осредненные за неделю эталонные данные ближе всего к величине проверяемых данных, что и привело к изменению величин метрик (0.7 и 0.8, соответственно $\Delta_{[a,b]}(x)$ и $Z_{[a,b]}(x)$). По сравнению с другими днями практически не изменились значения метрик, полученные 23 числа, несмотря на изменение диапазона осреднения эталона до недельного. Поскольку среднесуточная величина эталона в этот день близка к недельной, то оценки несовпадения между проверяемыми значениями и эталонными остаются большими, как и величины метрик для суточного осреднения. Таким образом, изменение диапазона расчета величины среднего значения температуры (ежедневного на еженедельный) показал устойчивость расчета величин ошибок по предложенным метрикам.

Обсуждение и выводы

Многообразие природы экспериментальных данных и соответствующих задач их анализа привело к появлению множества критериев «близости» различных массивов данных. Многомасштабность движения вод морей и океанов и невозможность выбора достаточно подробных расчетных сеток привели к появлению алгоритмов (процедур) учета «подсеточных» движений. Особую сложность решение задач параметризации приобретает для прибрежных морских акваторий со значительной изменчивостью их физико-географических характеристик (геоморфология, форсинг). Поэтому вполне актуальной является задача анализа природы несоответствия модельных расчетов и натурных наблюдений, возникающая при моделировании на различных масштабах изменчивости природной системы.

Переход к безразмерным критериям подобия широко распространен в геофизической гидродинамике и других науках. Предлагаемый в работе подход по смыслу близок к использованному в работе (Eilola et al., 2011) конструированию критериев «близости» показателей различных моделей эвтрофикации Балтийского моря. Однако, наш подход позволяет явно учитывать как величину шага по времени при модельных расчетах, так и период осреднения эталонного ряда при интегрировании невязок расчетных и измеренных значений параметров морской среды. Новизна предлагаемого подхода построения алгоритмов сравнения одномерных временных рядов состоит в переходе к сравнению «близости» непрерывных прообразов изучаемых процессов и выборе в качестве масштабов нормировок «естественных» параметров их изменчивости.

Выполненное исследование позволяет заключить, что для констатации факта несовпадения измеренных (эталонных) и рассчитанных на модели (проверяемых) значений любого термодинамического параметра, характеризующего естественную изменчивость конкретной морской акватории, использование размерных критериев поточечной близости (one-to-one) или среднеквадратичного отклонения (RMSE) вполне достаточно. Однако, для выявления природы несовпадения и деталей поведения модели реанализа на различных этапах изменчивости изучаемой природной системы, а также для определения качества учета в модели «подсеточных» процессов, то есть работоспособности выбранных процедур параметризаций, могут быть использованы оценки по предложенным в работе метрикам, количественно оценивающие отношения:

• суммы квадратов разностей измеренных и рассчитанных значений относительно дисперсии измеренных;

• суммарной разности измеренных и рассчитанных значений относительно измеренных;

• максимального диапазона изменчивости («амплитуды») измеренных и рассчитанных значений конкретного параметра относительно «амплитуды» измеренных.

Предложенные критерии (7)–(9) отражают потенциальное воздействие внутрисуточной изменчивости конкретного термодинамического параметра на величины ошибок, что можно учитывать при калибровке коэффициентов в параметризации «подсеточных» процессов модели под условия конкретной акватории моря. При анализе природы несовпадения диапазонов изменчивости эталонного и проверяемого временных рядов, оценки показали разницу величин ошибок между монотонным понижением температуры морской воды 19 и 24 октября и V-образным понижением с последующим повышением температуры 21–22 октября. Полученные оценки несовпадения по критерию (8) позволяют сравнить невязки сравниваемых рядов относительно суммарного превышения значений элементов эталонного ряда над их минимальным значением. По критерию (7) можно оценить зависимость изменений среднеквадратичного несоответствия эталонного и проверяемого рядов от аналогичных изменений компонентов эталонного ряда относительно их среднего значения. Наконец, третий критерий (9) отражает оценку разницы «амплитуд» ошибок сравниваемых рядов.

Таким образом, полученные в работе результаты подтверждают выводы работ разных авторов о том, что выявление деталей соответствия модельных расчетов (проверяемых) и измеренных значений (эталонных), описывающих эволюцию параметров одной и той же природной системы (морской акватории), может быть достигнуто только с использованием нескольких критериев (Paparrizos et al., 2009), в том числе и предложенных в работе метрик (7)–(9). Полученные в данной работе количественные оценки несовпадения инструментальных и расчетных данных подтверждают необходимость более точной привязки процедур параметризации в численных моделях к условиям мелководья Юго-Восточной Балтики.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Исследование было проведено с использованием E.U. Copernicus Marine Service Information; https://doi.org/10.48670/moi-00059.

Список литературы

1. *Апанович В. В., Гладилин Д. Л.* Применение ковариационного анализа методом «скользящего окна» для оценки связи нестационарных временных рядов // Экспериментальная психология. 2025. Т. 18. №. 3. С. 85–100. EDN: PHOBAS. https://doi.org/10.17759/exppsy.2025180306
2. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с.
3. *Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А. В.* Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1. С. 176–189. EDN: ZXFTXI. https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-176-189
4. *Вудс Дж. Д.* Параметризация движений подсеточного масштаба. В кн.: Моделирование и прогноз верхних слоев океана: пер с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. Гл. 9. С. 146–174.
5. *Вулих Б. З.* Введение в функциональный анализ. М.: Изд. Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1958. 348 с. https://djvu.online/file/3N7r8IqzREv6a
6. *Гуляев А. В., Пивнева С. В.* Метрики оценки зависимости двух временных рядов // International Journal of Open Information Technologies. 2025. Т. 13. №. 5. С. 56–61. EDN: RRNDZA
7. *Захарчук Е. А., Сухачев В. Н., Тихонова Н. А., Литина Е. Н.* Стерические колебания уровня Балтийского моря // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23. №. 4. С. 1–23. EDN: TLODEE. https://doi.org/10.2205/2023ES000846
8. *Зацепин А. Г., Сильвестрова К. П., Куклев С. Б., Пиотух В. Б., Подымов О. И.* Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56. №. 2. С. 203–214. EDN: VRYSTZ. https://doi.org/10.7868/S0030157416020222
9. *Максимова О. В.* Сравнение временных рядов в прикладных исследованиях: близость, синхронность и корреляция // Экологический мониторинг и моделирование экосистем. 2025. Т. 36. №. 1–2. С. 46–64. EDN: PLEVLY. https://doi.org/10.24412/2782-3237-2025-1-2-46-64
10. *Мезингер Ф., Аракава А.* Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 136 с. https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/40278/1/Mesinger_ArakawaGARP.pdf
11. *Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г.* Изменчивость Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 262 с. https://archive.org/details/1974_20230820

12. *Мысленков С. А., Кречик В. А., Бондарь А. В.* Суточная и сезонная изменчивость температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по данным термокосы на платформе Д-6 // Экологические системы и приборы. 2017. № 5. С. 25–33. EDN: YUSMLT
13. *Balmaseda M. A., Hernandez F., Storto A., Palmer M. D., Alves O., Shi L., Smith G. C., Toyoda T., Valdivieso M., Barnier B., Behringer D., Boyer T., Chang Y-S., Chepurin G. A., Ferry N., Forget G., Fujii Y., Good S., Guinehut S., Haines K., Ishikawa Y., Keeley S., Köhl A., Lee T., Martin M. J., Masina S., Masuda S., Meyssignac B., Mogensen K., Parent L., Peterson K. A., Tang Y. M., Yin Y., Vernieres G., Wang X., Waters J., Wedd R., Wang O., Xue Y., Chevallier M., Lemieux J-F., Dupont F., Kuragano T., Kamachi M., Awaji T., Caltabiano A., Wilmer-Becker K., Gaillard F.* The Ocean Reanalyses Intercomparison Project (ORA-IP) // Journal of Operational Oceanography. 2015. 8:sup.1. P. 80–97. EDN: CSAKME. https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1022329
14. *Eilola K., Gustafsson B. G., Kuznetsov I., Meier H. E. M., Neumann T., Savchuk O. P.* Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state-of-the-art numerical models of the Baltic Sea // Journal of Marine Systems. 2011. Vol. 88. No. 2. P. 267–284. EDN: OLGGOX. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.05.004
15. *Frassl M. A., Boehrer B., Holterman, P. L., Hu W., Klingbeil K., Peng Z., Zhu J., Rinke K.* Opportunities and limits of using meteorological reanalysis data for simulating seasonal to subdaily water temperature dynamics in a large shallow lake // Water. 2018. Vol. 10. No. 594. P. 1–17. EDN: YHBGIH. https://doi.org/10.3390/w10050594
16. *Hjelmervik K. B., Hjelmervik K. T.* Demonstration of comparison methods for ocean model validation // The Open Ocean Engineering Journal. 2012. Vol. 5. P. 1–14. https://doi.org/10.2174/1874835X01205010001
17. *Kapustina M. V., Zimin A. V.* Variability of Upwelling Characteristics in the Southeastern Baltic Sea in the First Two Decades of the 21st Century // Physical Oceanography. 2023. Vol. 30. No. 6. P. 760–775. EDN: NUSAVT
18. *Kärnä T., Ljungemyr P., Falahat S., Ringgaard I., Axell L., Korabel V., Murawski J., Maljutenko I., Lindenthal A., Jandt-Scheelke S., Verjovkina S., Lorkowski I., Lagemaa P., She J., Tuomi L., Nord A., Huess V.* Nemo-Nordic 2.0: Operational marine forecast model for the Baltic Sea // Geoscientific Model Development. 2021. Vol. 14. No. 9. P. 5731–5749. EDN: ZMZZPA. https://doi.org/10.5194/gmd-14-5731-2021
19. *Liu Y., Axell L., Jandt S., Lorkowski I., Lindenthal A., Verjovkina S., Schwichtenberg F.* Baltic Sea Production Centre BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011, Copernicus Marine Environment Monitoring Service. 2019. 35 p. https://doi.org/10.48670/moi-00013
20. *Paparrizos J., Li H., Yang F., Wu K., d'Hondt J. E., Papapetrou O. A* survey on time-series distance measures // arXiv preprint. arXiv:2412.20574v1. 2009. P. 1–41. https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.20574
21. *Vasilyeva E. A., Kileso A. V., Isachenko A. E.* Discrepancies of the seawater temperature between Baltic Sea Physical Reanalysis data and in-situ measurements off the shore of the Curonian Spit // Journal of Oceanological Research. 2025. Vol. 53. No. 4. P. 5–22. EDN: KTYFQH. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).1
22. *Wang H., Ren K., Lina M., Yu C., Chen W., Zhang W.* Long-term mean circulation in the Japan Sea as reproduced by multiple eddy-resolving ocean circulation models // Frontiers in Marine Science. 2022. 9:1050028. EDN: OPTOVQ. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1050028

Статья поступила в редакцию 20.04.2026, одобрена к печати 28.06.2026.
Для цитирования: *Исаченко А. Е., Васильев П. А., Грищенко В. А.* Проблемы верификации численного моделирования морских акваторий // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 3. С. 199–216. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).10

PROBLEMS OF VERIFICATION OF NUMERICAL MODELING OF MARINE REGIONS

A. E. Isachenko[1], P. A. Vasilyev[2], V. A. Gritsenko[1]

[1] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia;
[2] Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, A. Nevskogo str., Kaliningrad, 236041, Russia,
e-mail: kupriyanova.ae@atlantic.ocean.ru, pavel.img@gmail.com, gritsenko-vl-al@mail.ru

This paper presents an approach to assessing the discrepancies between model data and in-situ observations (i. e., one of the stages of data verification), based on the assumption of continuous variability in a natural system (a marine region) and methods of functional analysis . The essence of this approach is that the in-situ and model datasets of seawater temperature are considered discrete analogues of a real continuous process of change in one of the parameters of a natural system. Thus, the problem of assessing the "proximity" of discrete time series can be replaced by a comparison of their continuous prototypes, a well-established methods in classical functional analysis. It is shown that the use of the point-wise proximity criteria (MAE) or the root mean square deviation (RMSE) is sufficient to detect discrepancies between measured (reference) and model (verified) datasets for any thermodynamic parameter (in this paper, seawater temperature) in a specific marine region. However, the dimensionless criteria of data discrepancy proposed in the paper may be useful for determining the quality of the model's accounting for subgrid processes. The effectiveness of these criteria is illustrated by comparing Baltic Sea Physical Reanalysis data with instrumentally measured seawater temperature during the autumn cooling of coastal waters in the Baltic Sea.

Keywords: model verification, time series analysis, dimensionless temperature discrepancy, seawater temperature, Baltic Sea Physical Reanalysis, coastal waters, Baltic Sea

Acknowledgments: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0025). This study has been conducted using E. U. Copernicus Marine Service Information; https://doi.org/10.48670/moi-00059.

References

1. Apanovich, V. V. and D. L. Gladilin, 2025: Application of the covariance analysis by the "sliding window" method to assess the relationship of non-stationary time series. *Experimental Psychology*, **18** (3), 85–100, EDN: PHOBAS, https://doi.org/10.17759/exppsy.2025180306
2. Balmaseda, M. A., F. Hernandez, A. Storto, M. D. Palmer, O. Alves, L. Shi, G. C. Smith, T. Toyoda, M. Valdivieso, B. Barnier, D. Behringer, T. Boyer, Y-S. Chang, G. A. Chepurin, N. Ferry, G. Forget, Y. Fujii, S. Good, S. Guinehut, K. Haines, Y. Ishikawa, S. Keeley, A. Köhl, T. Lee, M. J. Martin, S. Masina, S. Masuda, B. Meyssignac, K. Mogensen, L. Parent, K.A. Peterson, Y. M. Tang, Y. Yin, G. Vernieres, X. Wang, J. Waters, R. Wedd, O. Wang, Y. Xue, M. Chevallier, J-F. Lemieux, F. Dupont, T. Kuragano, M. Kamachi, T. Awaji, A. Caltabiano, K. Wilmer-Becker, and F. Gaillard, 2015: The Ocean Reanalyses Intercomparison Project (ORA-IP). *Journal of Operational Oceanography*, 8:sup.1, 80–97, EDN: CSAKME, https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1022329

3. Bendat, J. and A. Piersol, 1966: *Measurement and analysis of random data*. London, John Wiley, p. 390.
4. Borsch, S. V., Y. A. Simonov, and A. V. Khristoforov, 2020: Efficiency of streamflow modeling and forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], **1**, 176–189, EDN: ZXFTXI, https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-176-189
5. Eilola, K., B. G. Gustafsson, I. Kuznetsov, H. E. M. Meier, T. Neumann, and O. P. Savchuk, 2011: Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state-of-the-art numerical models of the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, **88** (2), 267–284, EDN: OLGGOX, https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.05.004
6. Frassl, M. A., B. Boehrer, P. L. Holtermann, W. Hu, K. Klingbeil, Z. Peng, J. Zhu, and K. Rinke, 2018: Opportunities and limits of using meteorological reanalysis data for simulating seasonal to sub-daily water temperature dynamics in a large shallow lake. *Water*, **10** (594), 1–17, EDN: YHBGIH, https://doi.org/10.3390/w10050594
7. Gulyaev, A. V. and S. V. Pivneva, 2025: Metrics for Evaluating the Dependence of Two Time Series. *International Journal of Open Information Technologies*, **13** (5), 56–61, EDN: RRNDZA
8. Hjelmervik, K. B. and K. T. Hjelmervik, 2012: Demonstration of comparison methods for ocean model validation. *The Open Ocean Engineering Journal*, **5**, 1–14, https://doi.org/10.2174/1874835X01205010001
9. Kapustina, M. V. and A. V. Zimin, 2023: Variability of Upwelling Characteristics in the Southeastern Baltic Sea in the First Two Decades of the 21st Century. *Physical Oceanography*, **30** (6), 760–775, EDN: NUSAVT
10. Kärnä, T., P. Ljungemyr, S. Falahat, I. Ringgaard, L. Axell, V. Korabel, J. Murawski, I. Maljutenko, A. Lindenthal, S. Jandt-Scheelke, S. Verjovkina, I. Lorkowski, P. Lagemaa, J. She, L. Tuomi, A. Nord, and V. Huess, 2021: Nemo-Nordic 2.0: Operational marine forecast model for the Baltic Sea. *Geoscientific Model Development*, **14** (9), 5731–5749, EDN: ZMZZPA, https://doi.org/10.5194/gmd-14-5731-2021
11. Liu, Y., L. Axell, S. Jandt, I. Lorkowski, A. Lindenthal, S. Verjovkina, and F. Schwichtenber, 2019: Baltic Sea Production Centre BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011. *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, 35 p., https://doi.org/10.48670/moi-00013
12. Maksimova, O. V., 2025: Comparison of time series in applied research: proximity, synchronism and correlation. *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling,* **36** (1–2), 46–64, EDN: PLEVLY, https://doi.org/10.24412/2782-3237-2025-1-2-46-64
13. Mesinger, F. and A. Arakawa, 1976: Numerical methods used in atmospheric models. *Geneva: World Meteorological Organization*, 1979, p. 499, https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/40278/1/Mesinger_ArakawaGARP.pdf
14. Monin, A., V. Kamenkovich, and V. Kort, 1974: *Variability of the Oceans*. J. L. Lumley (Eds.). London, John Wiley & Sons Ltd, p. 241, https://doi.org/10.1017/S0025315400026254
15. Myslenkov, S. A., V. A. Krechik, and A. V. Bondar, 2017: Daily and seasonal water temperature changes in the coastal zone of the Baltic Sea measured by thermistor chain. *Ecological systems and devices*, **5**, 25–33, EDN: YUSMLT
16. Paparrizos, J., H. Li, F. Yang, K. Wu, J. E. d'Hondt, and O. Papapetrou, 2009: A survey on time-series distance measures. *arXiv preprint. arXiv:2412.20574**v1,*** 1–41, https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.20574
17. Vasilyeva, E. A., A. V. Kileso, and A. E. Isachenko, 2025: Discrepancies of the seawater temperature between Baltic Sea Physical Reanalysis data and in-situ measurements off the shore of the Curonian Spit. *Journal of Oceanological Research*, **53** (4), 5–22, EDN: KTYFQH, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).1

18. Vulikh, B. Z., 1963: Introduction to Functional Analysis for Scientists and Technologists. I. N. Sneddon (Eds.) *Pergamon Press*, p. 399, https://djvu.online/file/3N7r8IqzREv6a
19. Wang, H., K. Ren, M. Lina, C. Yu, W. Chen, and W. Zhang, 2022: Long-term mean circulation in the Japan Sea as reproduced by multiple eddy-resolving ocean circulation models. *Frontiers in Marine Science*, 9:1050028, EDN: OPTOVQ, https://doi.ocean.ru/10.3389/fmars.2022.1050028
20. Woods, J. D., 1979: Parameterization of subgrid-scale motions. *Upper Ocean Modeling and Forecasting*, Leningrad, Hyrdometeoizdat, 146–174.
21. Zakharchuk, E. A., V. N. Sukhachev, N. A. Tikhonova, and E. N. Litina, 2023: Steric Oscillations of the Baltic Sea Level. *Russian Journal of Earth Sciences*, **23** (4), 1–23, EDN: TLODEE, https://doi.org/10.2205/2023ES000846
22. Zatsepin, A. G., K. P. Silvestrova, S. B. Kuklev, V. B. Piotoukh, and O. I. Podymov, 2016: Observation of Intensive Coastal Upwelling-Downwelling Cycle at the IO RAS Hydrophysical Testing Site in the Black Sea. *Oceanology*, **56** (2), 203–214, EDN: VRYSTZ, https://doi.org/10.7868/S0030157416020222

Submitted 20.04.2026, accepted 28.06.2026.
For citation: Isachenko, A. E., P. A. Vasilyev, and V. A. Gritsenko, 2026: Problems of verification of numerical modeling of marine regions. *Journal of Oceanological Research*, **54** (3), 199–216, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).10

海域数值模拟验证中的问题

A. E. Isachenko[1], P. A. Vasilyev[2], V. A. Gritsenko[1]

[1] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, 邮编 : *117997, Russia;*
[2] Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, A. Nevskogo str., Kaliningrad, 邮编 : *236041, Russia,*
电子邮件 : *kupriyanova.ae@atlantic.ocean.ru, pavel.img@gmail.com, gritsenko-vl-al@mail.ru*

本文提出了一种基于自然系统 (海域) 连续变化假设 , 并运用泛函分析方法来评估数值模拟结果与现场观测数据一致性 (即模型验证的环节之一) 的方法。该方法的本质在于 , 将海水温度的实测值与模拟值视为自然系统某一参数变化的真实连续过程的离散样本 , 从而将评估两个离散时间序列 “接近程度” 的问题转化为比较其连续原型的问题 , 这在经典泛函分析中已有成熟的理论基础。研究证实 , 对于判定特定海域任何热力学参数 (本文中为水温) 的实测值 (基准值) 与模型计算值 (待检验值) 之间的不一致性 , 使用逐点接近度准则或均方根误差已足够。然而 , 为了评估模型对 “亚网格” 过程的描述质量 , 本文提出的无量纲 “接近度” 准则可能更为有效。所提出的准则通过对波罗的海物理再分析数据与秋季冷却期间波罗的海沿岸水域海水温度的仪器测量结果进行比较 , 验证了其可行性。

关键词 : 模型验证 , 时间序列分析 , 数据 “接近度” 无量纲准则 , 水温 , Baltic Sea Physical Reanalysis , 沿岸水域 , 波罗的海

致谢 : 本研究在俄罗斯联邦科学与高等教育部下达给 Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences 的国家任务 (课题编号 : FMWE-2024-0025) 框架内完成。研究使用了欧盟哥白尼海洋服务信息 (https://doi.org/10.48670/moi-00059)。