

УДК: 551.501

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-604-616

Е. В. Захарова¹, В. В. Фомин^{2,3,4}

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты сравнения спутниковой температуры поверхности моря (ТПМ) уровня обработки L3S (ТПМ L3S) и L4 (ТПМ L4) с данными контактных измерений 41 станций, расположенных в прибрежной части Балтийского моря. Средняя абсолютная ошибка (САО) ТПМ L4 и L3S соответственно изменяется от 0,6 и 0,59 °С в марте до 2,0 и 2,17 °С в мае, а в среднем за весь 2018 г. равна 1,27 и 1,37 °С. Систематическая ошибка (СО) ТПМ L4 и L3S в среднем за весь год равна –0,08 и –0,09 °С, однако рассмотрение среднемесячных значений позволяет проследить значительную изменчивость в течение 2018 г. СО ТПМ L4 и L3S соответственно изменяется от –0,85 и –1,11 °С в мае до 0,84 и 1,1 °С в декабре, имеет выраженный сезонный ход и неоднородность по пространству. ТПМ занижается в период с февраля по июнь и завышается в период с июля по декабрь в прибрежной зоне Балтийского моря. Наибольшие САО во все сезоны года наблюдаются по станциям на восточном побережье Ботнического залива, на входе в Финский залив, вблизи острова Сааремаа и на акватории Рижского залива. Данные ТПМ L4 имеют более высокую точность в сравнении с данными ТПМ L3S, при этом разница в ошибках незначительна и в обоих массивах наибольшие СО и САО наблюдаются в прибрежной зоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спутниковая температура поверхности моря, ТПМ, Балтийское море

-
- ¹ Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Кропоткинский пер., д. 6 с. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: katezakharova33@gmail.com
 - ² Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Кропоткинский пер., д. 6 с. 1, Москва, Россия, 119991,
e-mail: vladimirfomin@live.com
 - ³ Гидрометцентр России, Большой Предтеченский пер., д. 13 с. 1, Москва, Россия, 123376,
e-mail: vladimirfomin@live.com
 - ⁴ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, ул. Губкина, д. 8, Москва, Россия, 119333,
e-mail: vladimirfomin@live.com

Ekaterina V. Zakharova¹, Vladimir V. Fomin^{2,3,4}

ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF THE SEA SURFACE TEMPERATURE OF THE BALTIC SEA

ABSTRACT

The paper presents the results of a comparison of satellite sea surface temperature (SST) processing level L3S (SST L3S) and L4 (SST L4) with contact measurement data from 41 stations located in the coastal part of the Baltic Sea. Mean absolute deviation (MAD) of SST L4 and L3S, respectively, varies from 0.6 and 0.59 °C in March to 2.0 and 2.17 °C in May, and the whole year average MAD is 1.27 and 1.37 °C. The SST L4 and L3S bias overall year is -0.08 and -0.09 °C, however, consideration of the monthly average values allows us to trace significant variability during 2018. The SST L4 and L3S bias, respectively, varies from -0.85 and -1.11 °C in May to 0.84 and 1.1 °C in December, bias has a pronounced seasonal variation and heterogeneity over space. SST is underestimated from February to June and overestimated from July to December near the coastline of the Baltic Sea. The largest MAD in all seasons of the year are observed at stations on the eastern coast of the Gulf of Bothnia, at the entrance of the Gulf of Finland, near the island of Saaremaa and in the Gulf of Riga. The SST L4 data has higher accuracy compared to the SST L3S data, while the SST difference is negligible and in both arrays the largest bias and MAD are observed in the coastal zone.

KEYWORDS: satellite sea surface temperature, SST, Baltic Sea

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые данные о температуре поверхности моря (ТПМ) обладают высоким пространственным разрешением и являются весьма востребованным продуктом дистанционных измерений в различных задачах гидрометеорологии, таких как изучение процессов тепло- и влагообмена на границе океан-атмосфера, моделирование процессов в океане [Minnett et al., 2019]. Несмотря на многочисленные преимущества спутниковых данных, отмечаются и их недостатки, которые заключаются в ошибках, возникающих при обработке сырых данных, ограничениях по полосе охвата, по качеству съемки в дневное время, пропусках в данных из-за облачности [She, 2007; O'Carroll et al., 2019]. Несмотря на все это, спутниковые данные в настоящее время дают значительно больший объем данных, чем контактные измерения (стационарные и дрейфующие буи, данные судовых измерений и мареографических станций), данные с которых зачастую представляют нерегулярные по времени и пространству измерения. В связи с этим использование данных ТПМ, полученных на основе результатов обработки спутниковой информации, выглядит перспективным при решении большого спектра задач: от изучения физических процессов до использования при моделировании морской циркуляции. При всем этом, т. к. данные не являются результатом прямых измерений, а получены в результате обработки сырой спутниковой информации, то они содержат в себе ошибки, значения которых необходимо учитывать при проведении различных исследований и решении практических задач.

¹ Zubov State Oceanographic Institute, 6 build. 1, Kropotkinsky ln., Moscow, 119991, Russia,
e-mail: katezakharova33@gmail.com

² Zubov State Oceanographic Institute, 6 build. 1, Kropotkinsky ln., Moscow, 119991, Russia,
e-mail: vladimirfomin@live.com

³ Hydrometcenter of Russia, 13 build. 1, Bolshoy Predtechensky ln., Moscow, 123376, Russia,
e-mail: vladimirfomin@live.com

⁴ Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the RAS, 8, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia,
e-mail: vladimirfomin@live.com

Для получения данных ТПМ L4 и L3S проводится многоэтапная обработка сырых данных о температуре, полученных со спутников [Merchant et al., 2019]. Качество спутниковых данных ограничено многими факторами, связанными с работой инфракрасных датчиков, включая наличие облачности, интенсивность осадков, загрязненность прибрежной зоны, величину эффективной зоны покрытия акватории порядка 31 % [She, 2007]. Алгоритмы обработки могут вносить значительный вклад в качество получаемых данных. В работе [Minnett, Kaiser-Weiss, 2012] было изучено изменение профиля температуры в приповерхностном 10-метровом слое, разработано несколько различных методов расчета ТПМ в зависимости от глубины. Показано, как в течение дня температура может увеличиваться на 2,5 °C по сравнению с ночной, но на глубине от двух и более метров разница дневной и ночной температуры не превышает 0,5 °C. Таким образом, существует множество неопределенностей, влияющих на качество данных ТПМ. В работе [O'Carroll et al., 2019] упоминается о формировании минимальных требований к качеству данных ТПМ, которые в дальнейшем усваиваются оперативными моделями океана. Указывается, что поступающие в модель данные должны обладать дискретностью по горизонтали не более 10 км, иметь шаг по времени 6 ч, и погрешность в определении ТПМ не должна превышать 0,2 °C.

С целью валидации измерений температуры проводилось сопоставление спутниковых данных L3S и L4 с данными дрейфующих буев, заякоренных буев и наблюдений с судов, полученных из интегрированной базы данных океана Центра Хэдли (HadIOD) [Hoyer, 2016]. Большой набор данных контактных измерений показан в документе CMEMS¹ и сопоставлен с ТПМ L4. В документе CMEMS показан резкий рост количества дрейфтерных измерений в целом для исследуемого региона, при этом большая их часть сосредоточена в Северном море, тогда как во внутреннем Балтийском море количество данных ограничено. Показано, что количество измерений с заякоренных буев и судов за период с января 1982 г. по май 2021 г. значительным образом меняется в регионе Северного и Балтийского моря, измерения нерегулярны по времени и пространству. Сравнение ТПМ за период 40 лет проводилось в регионе Северного и Балтийского моря, а также только для акватории Балтийского моря. В последнем случае средние СО в ТПМ L4 и L3S соответственно составляют по дрейфтерным измерениям 0,16 и 0,21°, по заякоренным буям 0,02 и 0,07°, судовым данным –0,22 и –0,19°. Полученные результаты также говорят о сопоставимой точности ТПМ L4 и L3S при анализе ошибок, наблюдаемых в открытом море, демонстрируют высокую точность на долгосрочном ряде наблюдений и климатическом масштабе. Интересно также, что СО в ТПМ L4 и L3S при сравнении с буями и судовыми данными имеют различный знак. Несмотря на низкие средние значения многолетней ошибки, к сожалению, такая оценка не может дать полное представление о пространственной структуре точности ТПМ L4 и L3S и внутригодовой изменчивости. Это особенно актуально и для прибрежной зоны, где количество данных дрейфтерных и судовых измерений значительно меньше.

Проведенное сопоставление спутниковых данных о температуре воды с данными измерений термоксы на глубине 1 м в прибрежной зоне Юго-Восточной части Балтийского моря [Мысленков, 2017] позволило установить, что средняя разность по всему ряду данных составляет 0,25 °C, а наличие отклонений более 2 °C связано с сильным дневным прогревом тонкого верхнего слоя, особенно при штиле. Также в работах [Мысленков, 2017; Myslenkov et al., 2023] показано, что сильные и продолжительные ветры

¹ Karagali I. et al., 2023. Product user manual. CMEMS. Электронный ресурс: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-016-040.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

в прибрежной зоне могут вызывать экмановский апвеллинг и тем самым значительно изменять ТПО в полосе шириной порядка 5–25 км.

Балтийское море имеет большую протяженность, а его температурный режим определяется различными физико-географическими факторами (мелководность, значительная широтная протяженность, слабый водообмен с Северным морем) [Котлярова, Буканова, 2019; Omstedt, 1996]. Поэтому ТПМ может иметь значительные различия в значениях в прибрежной акватории, в мелководных заливах и на открытой акватории. Кроме того, качество спутниковых данных также зависит от широты и снижается в высоких широтах [She, 2007].

Интересом данного исследования является анализ точности полей ТПМ L4 и L3S, получение оценки их качества в прибрежной зоне по данным мареографических станций, с которыми не проводилось сравнение в отчетах CMEMS и изучение пространственных различий; последние не отражаются в средних по всему бассейну статистических показателях [Hoyer, 2016].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе в качестве материалов для исследования были использованы данные спутниковой температуры океана уровней обработки L3S (Level 3 Super-collated) и L4 (level 4), а также данные стационарных наблюдений с сайта CMEMS¹.

ТПМ L3S — это обработанные данные спутниковых измерений, представленные на сеточной области с пространственным шагом $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ в виде ежедневных карт температуры поверхности моря, полученных с использованием инфракрасных спутниковых наблюдений в рамках проектов ESA CCI и C3S. Они основаны на спутниковых измерениях уровня обработки L2 (level 2), из которых исключены сроки с 10 до 18 ч дня и данные скорректированы на глубину 20 см с целью исключения ошибки, возникающей из-за дневного прогрева поверхности моря [O'Carroll et al., 2019]. При обработке и подготовке данных ТПМ L3S используются данные, предварительно прошедшие контроль качества.

Для перехода к полям ТПМ L4, к данным уровня обработки L3S применяются алгоритмы оптимальной интерполяции². Поля ТПМ L4 также имеют пространственное разрешение $0,02^\circ \times 0,02^\circ$ и представлены в виде ежедневных карт, но дополняются данными в местах, где спутниковые измерения отсутствуют и, таким образом, имеют покрытие акватории без пропусков. ТПМ L3S и L4 рассчитываются в Датском Метеорологическом институте (Danish Meteorological Institute (DMI)), алгоритм подготовки данных подробно описан в работе [Merchant et al., 2019].

В качестве стационарных данных были использованы данные с мареографических станций (Tide gauge station) (рис. 1) из массива Baltic Sea in situ near real time observations (Наблюдения за Балтийским морем на месте, близкие к реальному времени)³. Они не используются для заполнения данных на этапах перехода от ТПМ L3S к анализу ТПМ L4 и, таким образом, могут быть использованы для проведения независимого сравнения. Точность измерений температуры изменяется от станции к станции в зависимости от используемого оборудования и варьируется в диапазоне $0,001–0,3^\circ\text{C}$ ⁴.

¹ CMEMS. Электронный ресурс: <https://data.marine.copernicus.eu/products> (дата обращения 25.04.2024)

² Hoyer J. L. Product user manual for SST_BAL_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_016 level 4 SST Электронный ресурс: <http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-OSI-PUM-010-016.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

³ CMEMS. Baltic Sea — In situ near real time observations. Электронный ресурс: <https://doi.org/10.48670/moi-00032> (дата обращения 25.04.2024)

⁴ CMEMS. Quality information document. Электронный ресурс: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-INS-QUID-013-030-036.pdf> (дата обращения 25.04.2024)

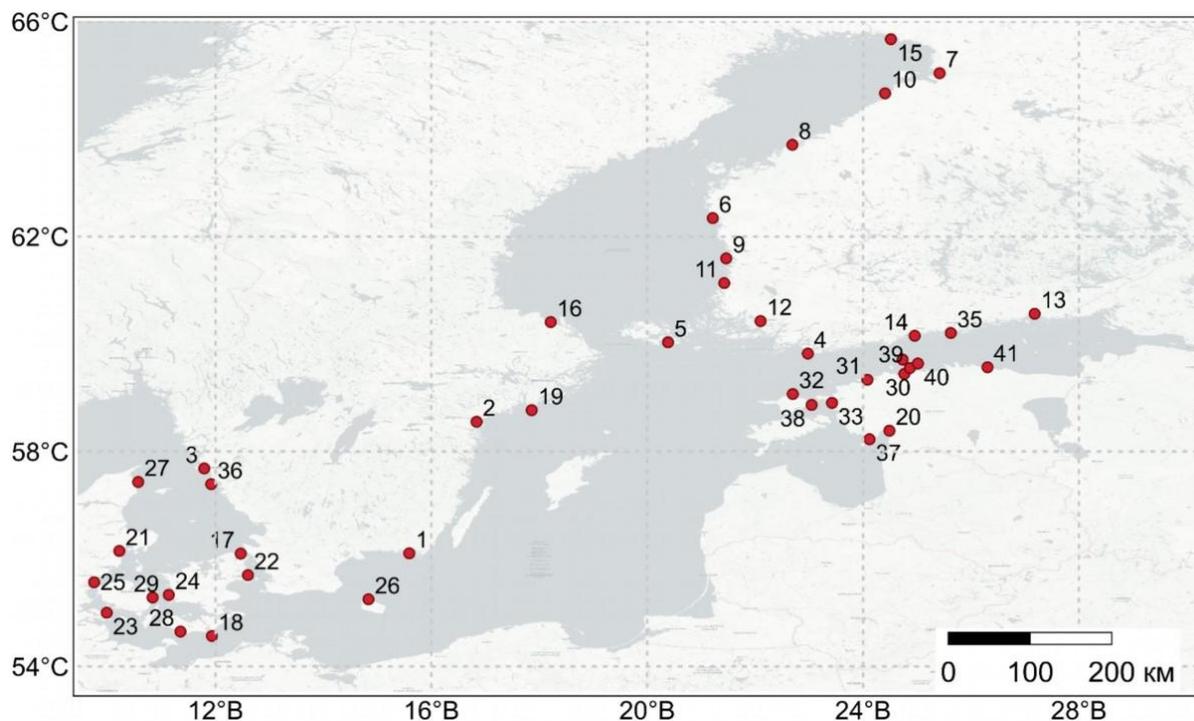


Рис. 1. Расположение 41 мареографической станции на побережье Балтийского моря, м-б 1: 2 800 000
Fig. 1. Location of 41 tidal gauge station on the coastline of Baltic Sea, scale 1: 2 800 000

Для количественной оценки точности SST L3S и L4 были использованы статистические параметры, такие как систематическая ошибка (CA/BIAS) (1), среднее абсолютное отклонение (CAO/MAD) (2) и дисперсия (Var) (3):

$$BIAS = \frac{\sum x_i - x_{in\ situ}}{n}, \quad (1)$$

$$MAD = \frac{\sum |x_i - x_{in\ situ}|}{n}, \quad (2)$$

$$Var = \frac{\sum (|x_i - \bar{x}|)^2}{n}, \quad (3)$$

где x_i — спутниковая температура,
 $x_{in\ situ}$ — станционная температура со станций мареографа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные ТПМ L3S, несмотря на их представление на регулярной сетке, имеют сильно нерегулярное покрытие по сравнению с ТПМ L4. В узлах регулярной сеточной области, где наблюдается облачность или данные низкого качества, данные исключаются. График, представленный на рис. 2, показывает неоднородность покрытия данными ТПМ L3S акватории Балтийского моря в течение 2018–2019 гг. Число узлов сетки, в которых есть значения ТПМ L4, охватывает всю акваторию Балтийского моря, не меняется с течением времени и принимается здесь за 100 %. А покрытие данными ТПМ L3S определяется как отношение числа узлов сетки, в которых есть значение ТПМ L3S за конкретные сутки, к

числу узлов сетки, в которых имеются значения ТПМ L4. Прослеживается сезонность: летом процент покрытия данными выше по сравнению с зимним периодом. Также видно резкое снижение качественных данных ТПМ L3S с 01.09.2019 г., что, вероятно, связано с внедрением обновленного алгоритма обработки данных командой специалистов СМЕМС.

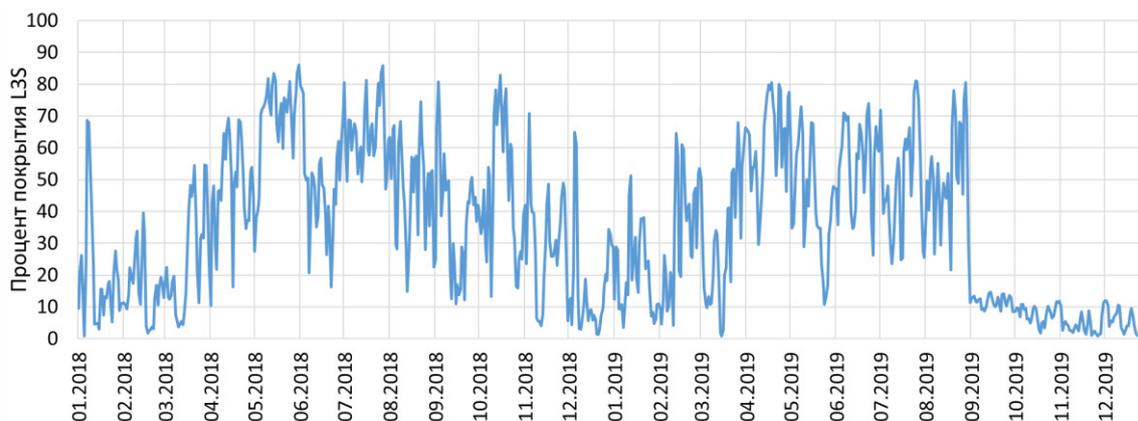


Рис. 2. Покрытие Балтийского моря данными SST L3S (%) за период 2018–2019 гг.
Fig. 2. Coverage of the Baltic Sea by SST L3S data (%) for the period 2018–2019

Из-за нерегулярного покрытия данными ТПМ L3S точное их сопоставление с данными прибрежных станций провести практически невозможно. Для получения репрезентативной выборки и получения среднемесячных значений СО и САО сопоставление между данными ТПМ L3S и станционными данными проводилось в ближайшем к станционным данным узле сеточной области, расположенном в радиусе 25 км от станции измерений. При введении такого ограничения 3 станции выбыли из выборки, статистика была обобщена по 39 станциям. При уменьшении радиуса до 5 км количество станций, в которых имеются измерения, сокращается с 39 до 16, а в зимние месяцы среднее по всем 16-ти станциям количество измерений составляет 2–4 из максимально возможных 28–31 (равных количеству дней в месяце), что не позволяет получить статистические оценки, особенно в зимний сезон. Из массива данных ТПМ L4 брался аналогичный узел на сеточной области. В случае, если для соответствующего срока по времени данные в указанном радиусе отсутствовали, то этот срок исключался из рассмотрения. Также для исключения влияния суточного хода и прогрева тонкого поверхностного слоя для сравнения были взяты значения температуры в ночное время. Результаты сравнения были осреднены по месяцам и за год в целом и представлены на рис. 3А и 3В.

Видно, что в ошибках присутствует сезонность. С марта по июнь характерно занижение температуры по сравнению с данными наблюдений, а в остальные месяцы — завышение (рис. 3А). Максимальные значения САО наблюдаются с мая по июль. По результатам получено, что СО ТПМ L4 чуть ниже по сравнению с СО ТПМ L3S. В совокупности с тем, что покрытие акватории Балтийского моря данными L3S значительно хуже, чем данными L4, то можно сделать вывод, что целесообразность использования данных L3S для каких-либо исследований в целом ниже.

Были также сопоставлены ТПМ L4 за каждые сутки 2018 г. в ближайших узлах сетки к станциям измерений (рис. 3С и 3D). Годовой ход выглядит схожим образом (что позволяет говорить о корректности используемой методики), но возрастает САО в зимний период, незначительно снижаясь в период с мая по июль. Такая изменчивость может быть связана с тем, что зимой ряд имеет большее количество сроков с данными по сравнению с рядом на рис. 3А и 3В, где за некоторые сроки данные отсутствуют из-за пробелов в L3S.

CO показывает, что ТПМ L4 занижены относительно наблюдений с января по июнь и завышены с июля по декабрь.

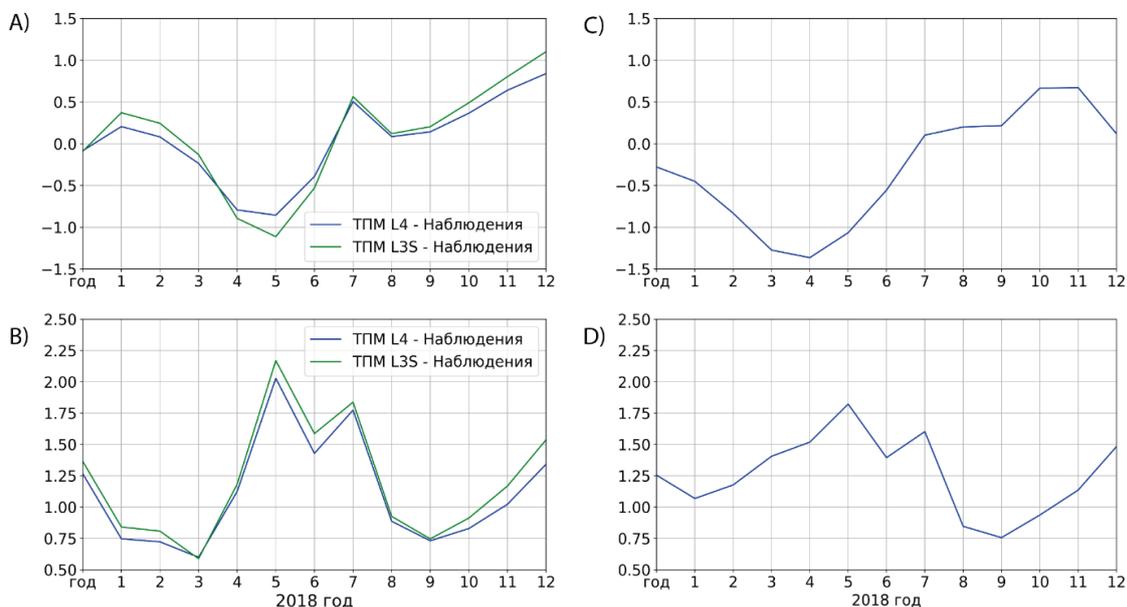


Рис. 3. Осредненные по 39 станциям ошибки спутниковой температуры по месяцам и в целом за 2018 г.: А) CO и В) CAO для L4 (синяя линия) и L3S (зеленая линия) в радиусе 25 км от станции; С) CO; D) CAO для L4 (синяя линия) в ближайшем узле сетки от станций
Fig. 3. Averaged over 39 stations, satellite sea surface temperature errors by month and overall 2018: A) BIAS and B) MAD for L4 (blue line) and L3S (green line) within a radius of 25 km from the station; C) BIAS; D) MAD for L4 (blue line) at the nearest grid point from the stations.

Рассмотрим подробнее сезонные пространственные отличия сопоставленных L4 с данным в точках за год и по сезонам года (рис. 4). Видно, что зимой температура более занижена на акватории Ботнического залива (рис. 4А), весной занижение температуры происходит по всей акватории Балтийского моря, минимальные ошибки наблюдаются на станциях, расположенных в Датских проливах (рис. 4В). В летний период занижение температуры ТПМ характерно для станций южной части Ботнического залива, вблизи острова Сааремаа, восточного побережья Датских проливов, а завышение — для станций Финского залива и западного побережья Датских проливов (рис. 4С). Осенью происходит завышение температуры по всем станциям Финского и Ботнического заливов и центральной части Балтийского моря, занижение температуры осенью характерно лишь для станций, расположенных в Датских проливах (рис. 4D). По карте фактических ошибок в целом за год видно, что лишь по двум станциям наблюдается ошибка температуры более 1 °С, а по остальным 39 станциям не превышает 1 °С. Уменьшение средней за год ошибки происходит за счет осреднения разных по знаку ошибок за летний и зимний сезоны, но остается по-прежнему высокой для ТПМ L4 в прибрежной зоне Балтийского моря, а особенно Ботнического залива, где наблюдаются наибольшие средние ошибки за зимний и осенний периоды. Из карты абсолютных ошибок (рис. 4 F–J) видно, что наибольшие их значения достигаются в весенний период. В течение всего года выделяются станции с более высокими значениями CAO, расположенные на восточном побережье Ботнического залива, на входе в Финский залив, вблизи о. Сааремаа и на акватории Рижского залива.

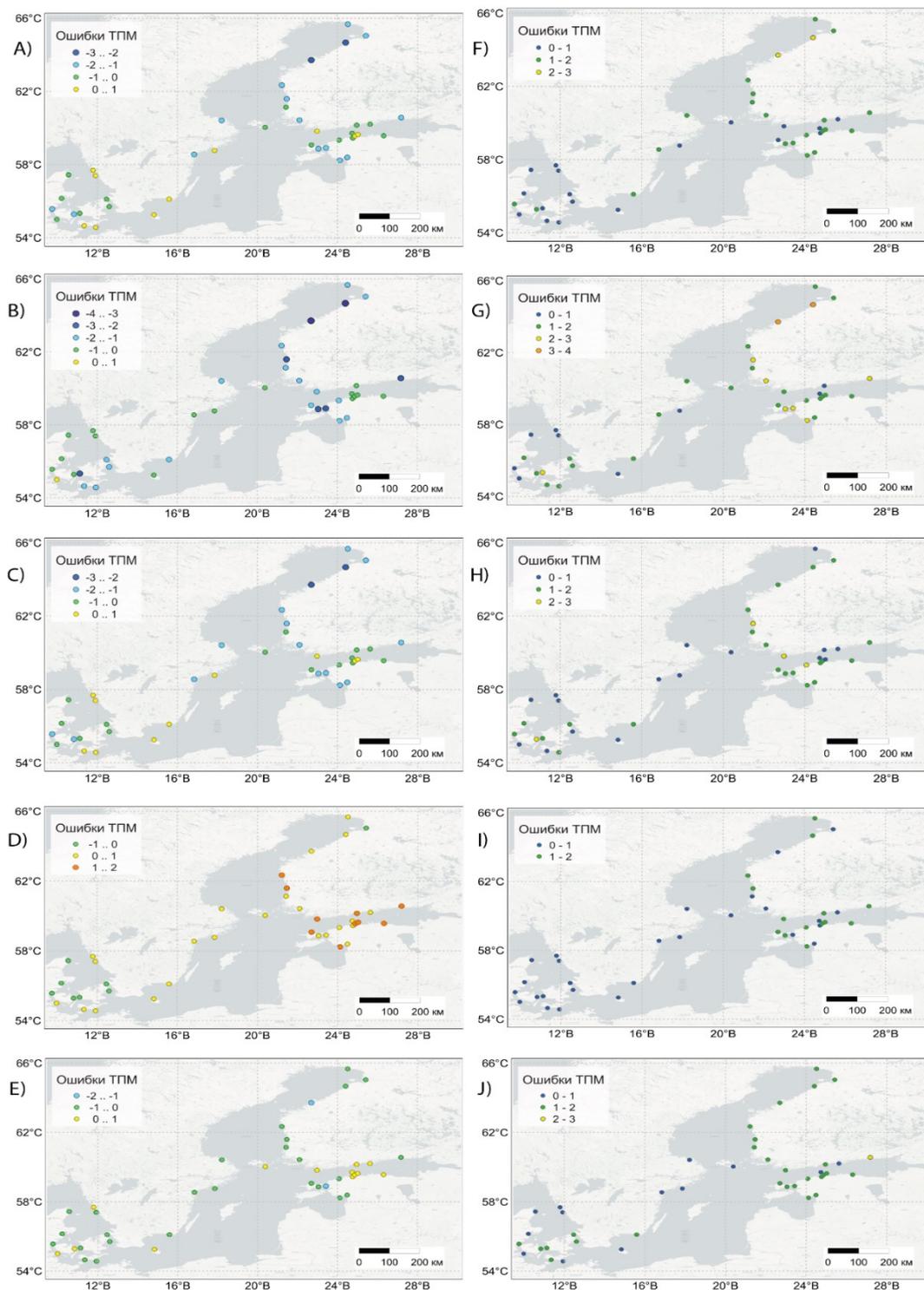


Рис. 4. Карты ошибок SST L4 за 2018 г. в узлах сетки ближайших к расположению мареографических станций, м-б 1: 2 800 000. СО по сезонам:

А) зима, В) весна, С) лето, Д) осень, Е) за 2018 г. в целом.

САО по сезонам: F) зима, G) весна, H) лето, I) осень, J) за 2018 г. в целом

Fig. 4. Maps of SST L4 errors in the nearest grid nodes to tidal gauge stations, scale 1: 2 800 000. Bias by seasons: A) winter B) spring, C) summer, D) autumn, E) year 2018.

MAД by seasons: F) winter, G) spring,

H) summer, I) autumn, J) year 2018

На рис. 5 показана разница полей ТПМ L3S–L4 за год (рис. 5E) и по сезонам года (рис. 5A–D). Видно, что в целом за год ошибка распределена равномерно по всей акватории и ее ошибки практически на всей акватории не превышают значений ± 0.2 °C, тогда как по средним за сезоны картам видны пространственные отличия. Зимой (рис. 5A) L3S завьшается по сравнению с L4 в прибрежной зоне практически по всей акватории. Наибольшая разница температур в зимний сезон характерна для северного побережья Ботнического залива, восточного побережья южной части Ботнического залива, Рижского залива и основной части Балтийского моря. Особенностью весеннего периода (рис. 5B) является наибольшая по сравнению с другими сезонами разница ТПМ. Разница полей L3S и L4 весной значительно возрастает у берегов Ботнического залива и в мелководной части, соединяющей северную часть акватории залива с южной. У берегов Рижского и Финского заливов видно занижение L3S по сравнению с L4. Летом (рис. 5C) наблюдается небольшое завьшение L3S по сравнению с L4 у Восточного берега основной акватории Балтийского моря и вблизи о. Сааремаа; в целом на акватории практически не встречается значительных отличий, происходит занижение L3S и L4. Осенью (рис. 5D) завьшения L3S по сравнению с L4 наблюдаются в северной части Финского залива вблизи Хельсинки, на северо-западной части основной акватории Балтийского моря, севернее о. Готланд и вдоль северного побережья Балтийского моря к северу от о. Борнхольм. Осенью в поле разницы ТПМ прослеживается повышенная контрастность по сравнению с другими сезонами: положительные значения L3S–L4 вдоль побережий сменяются широкими зонами отрицательных значений при удалении от берегов. Карта кинетической энергии с направлениями течений (рис. 5F) приведена за май 2018 г., где наблюдается наибольшая ошибка ТПМ L4. Карта показывает зоны интенсификации течений: выделяется область вдоль северного побережья Финского залива, где течения направлены с востока на запад, и северной части Ботнического залива, где формируется замкнутая циркуляция из-за зоны мелководья между северной и южной частями Ботнического залива.

Карты дисперсии (рис. 6), представленные по сезонам 2018 г., также показывают, что наибольшие различия ТПМ L3S и L4 наблюдаются весной в северной части Ботнического залива — на мелководье и в прибрежных зонах. Повышение дисперсии характерно также для юго-восточной части Финского залива и для узкой прибрежной зоны вдоль юго-восточного побережья основной акватории Балтийского моря. Летом дисперсия L3S–L4 высока на мелководье между северной и южной частью Ботнического залива, в Финском заливе и у восточного побережья основной акватории Балтийского моря. Осенью дисперсия высока у западных берегов основной акватории Балтийского моря и на выходе из Финского залива. В зимний период дисперсия минимальна.

Сопоставление карт L3S и L4 в целом показывает, что ошибка в спутниковых данных больше в береговой зоне, а также в областях интенсивных течений. По сезонам ошибки неодинаковы и имеют разнонаправленные знаки, но при осреднении за год разница между ТПМ уменьшается и выглядит однородной на всей акватории Балтийского моря.

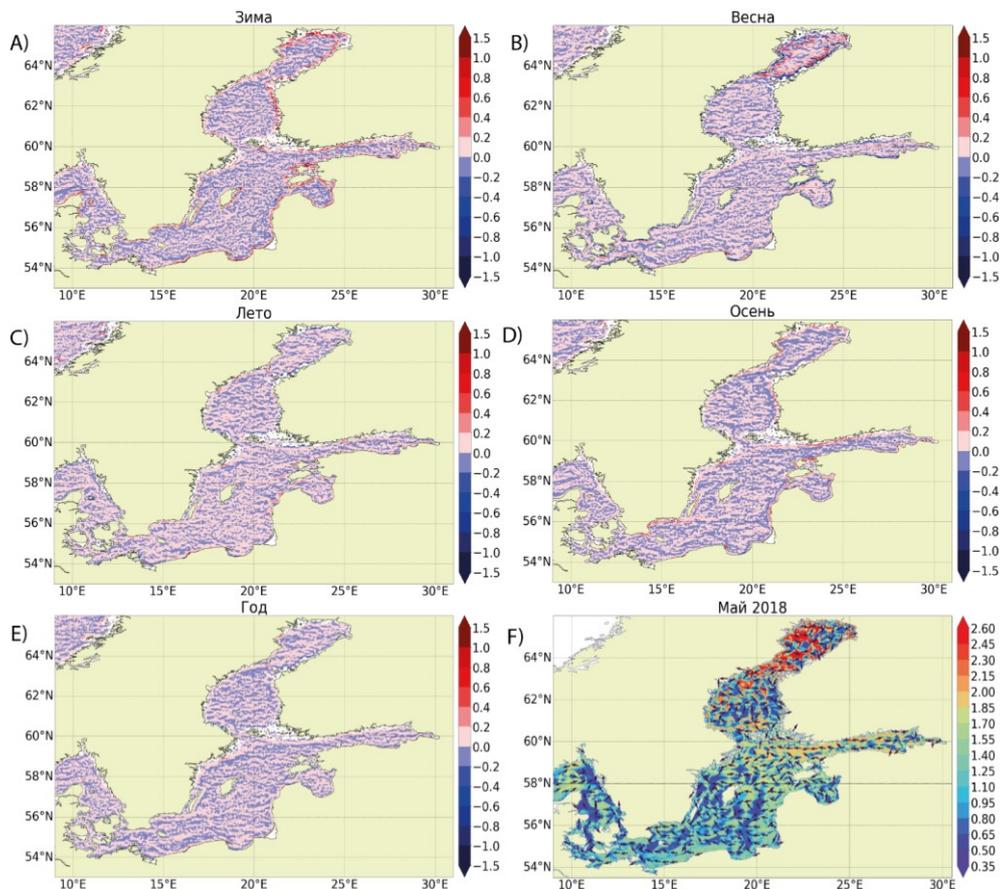


Рис. 5. Карты разницы ТПМ L3S–L4 по сезонам 2018 г.: А) зима, В) весна, С) лето, D) осень, E) за 2018 г. в целом. Карта кинетической энергии за май 2018 г.
Fig. 5. Maps of the difference SST L3S–L4 by seasons 2018: A) winter, B) spring, C) summer, D) autumn, E) year 2018. Kinetic Energy Map for May 2018

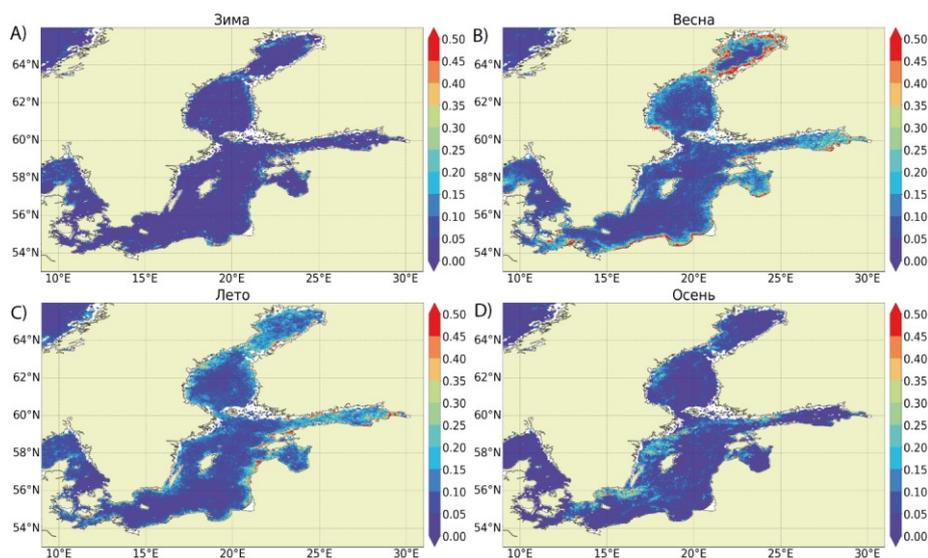


Рис. 6. Карты дисперсии разницы L3S-L4 по сезонам 2018 г.: А) зима, В) весна, С) лето, D) осень
Fig. 6. Maps of variance of the difference L3S-L4 by season, 2018: A) winter B) spring, C) summer, D) autumn

ВЫВОДЫ

Сопоставление спутниковых данных ТПМ L3S и L4 с данными стационарных измерений показывает, что как в данных ТПМ L3S, так и в данных ТПМ L4 наблюдаются ошибки по сравнению со стационарными данными. В ошибках наблюдается сезонная изменчивость, при которой температура занижается в период с февраля по июнь и завышается в период с июля по декабрь в целом по большому числу прибрежных станций бассейна Балтийского моря. Наибольшие абсолютные ошибки возникают с мая по июль. Присутствует также их пространственная изменчивость: наибольшие абсолютные ошибки наблюдаются по станциям на восточном побережье Ботнического залива, на входе в Финский залив, вблизи о. Сааремаа и в Рижском заливе. Ввиду большого расстояния между сравниваемыми парами данных спутника и мареографа до 25 км, полученные ошибки могут содержать пространственную изменчивость поля температуры, однако при уменьшении радиуса поиска не хватает данных для статистики.

Сопоставление полученных в настоящей работе результатов с материалами работ, где проводилась оценка точности по судовым и дрейферным наблюдениям [Hoyer, 2016] показывает, что в прибрежной зоне значения ошибок в данных L3S и L4 выше, чем в открытой акватории, где расположены судовые и дрейферные наблюдения. Это говорит о том, что данные ТПМ L3S и L4 могут иметь недостаточную точность в прибрежной акватории, и они не всегда могут быть использованы для решения научных и практических задач. Например, ошибка в данных ТПМ L3S и L4, наблюдаемая в зимний период, может приводить к некорректным результатам в воспроизведении ТПМ моделями морской циркуляции при усвоении данных и, соответственно, к некорректному расчету ледовых характеристик (сплоченности и толщины ледового покрова).

Сравнивая ТПМ L3S и L4, можно сделать вывод, что данные ТПМ L4 имеют несколько более высокую точность в сравнении со стационарными данными ТПМ L3S. Это позволяет сделать вывод о том, что использование данных по ТПМ L3S в целом имеет маленький практический смысл, т.к. данные имеют нерегулярное покрытие из-за облачности и в отдельные сезоны количество данных в целом может составлять не более 10–15 % от общей площади Балтийского моря. Данные ТПМ L4 имеют сопоставимую и более высокую точность, чем данные ТПМ L3S, при этом охватывают всю акваторию Балтийского моря и, таким образом, могут использоваться в большом спектре научных и практических задач.

Сопоставление данных ТПМ L3S и L4, разница их значений показывают, что наибольшие отклонения, а, следовательно, и наибольшая ошибка в данных по ТПМ наблюдается в прибрежных мелководных зонах, где точность спутниковых данных недостаточно высока, а также в областях интенсивной динамики вод, что подтверждается картами изменчивости кинетической энергии в приповерхностном слое моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Котлярова М. А., Буканова Т. В. Изменчивость температуры поверхности юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным. Известия КГТУ, 2019. № 53. С. 51–60.
- Мысленков С. А., Кречик В. А., Соловьев Д. М. Анализ температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по спутниковым данным и измерениям термокосы. Труды Гидрометцентра России, 2017. № 364. С. 159–169.
- Hoyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea. Journal of Climate, 2016. V. 29. P. 2529–2541. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0663.
- Merchant C. J., Embury O., Bulgin C. E., Block T., Corlett G. K., Fiedler E., Good S. A., Mittaz J., Rayner N. A., Berry D., Eastwood S., Taylor M., Tsushima Y., Waterfall A., Wilson R.,

Donlon C. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. *Scientific Data*, 2019. V. 6. P. 223. 18 p. DOI: 10.1038/s41597-019-0236-x.

Minnett P. J., Alvera-Azcárate A., Chin T. M., Corlett G. K., Gentemann C. L., Karagali I., Li X., Marsouin A., Marullo S., Maturi E., Santoleri R., Saux Picart S., Steele M., Vazquez-Cuervo J. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2019. V. 233. P. 111366. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111366.

Minnett P. J., Kaiser-Weiss A. K. Group for high resolution sea-surface temperature discussion document: near-surface oceanic temperature gradients, 2012. 7 p.

Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., Kapustina M. Verification of the Ekman upwelling criterion with in situ temperature measurements in the southeastern Baltic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023. V. 11. No. 1. P. 179. DOI: 10.3390/jmse11010179.

O'Carroll A. G., Armstrong E. M., Beggs H. M., Bouali M., Casey K. S., Corlett G. K., Dash P., Donlon C. J., Gentemann C. L., Høyer J. L., Ignatov A., Kabobah K., Kachi M., Kurihara Y., Karagali I., Maturi E., Merchant C. J., Marullo S., Minnett P. J., Pennybacker M., Ramakrishnan B., Ramsankaran R., Santoleri R., Sunder S., Saux Picart S., Vázquez-Cuervo J., Wimmer W. Observational needs of sea surface temperature. *Frontiers in Marine Science*, 2019. V. 6. P. 420. 27 p. DOI: 10.3389/fmars.2019.00420

Omstedt A., Nyberg L. Response of Baltic Sea ice to seasonal, interannual forcing and Climate change. *Tellus A*, 1996. V. 48. No. 5. P. 644–662.

She J., Høyer J. L., Larsen J. Assessment of sea surface temperature observational networks in the Baltic Sea and North Sea. *Journal of Marine Systems*, 2007. V. 65. No. 1–4. P. 314–335.

REFERENCES

Høyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea. *Journal of Climate*, 2016. V. 29. P. 2529–2541. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0663.

Kotlyarova M. A., Bukanova T. V. Variability of surface temperature of the south-eastern part of the Baltic Sea according to satellite data. *Izvestia KSTU (KSTU News)*, 2019. No. 53. P. 51–60 (in Russian).

Merchant C. J., Embury O., Bulgin C. E., Block T., Corlett G. K., Fiedler E., Good S. A., Mittaz J., Rayner N. A., Berry D., Eastwood S., Taylor M., Tsushima Y., Waterfall A., Wilson R., Donlon C. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. *Scientific Data*, 2019. V. 6. P. 223. 18 p. DOI: 10.1038/s41597-019-0236-x.

Minnett P. J., Alvera-Azcárate A., Chin T. M., Corlett G. K., Gentemann C. L., Karagali I., Li X., Marsouin A., Marullo S., Maturi E., Santoleri R., Saux Picart S., Steele M., Vazquez-Cuervo J. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2019. V. 233. P. 111366. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111366.

Minnett P. J., Kaiser-Weiss A. K. Group for high resolution sea-surface temperature discussion document: near-surface oceanic temperature gradients, 2012. 7 p.

Myslenkov S. A., Krechik V. A., Soloviev D. M. Water temperature analysis in the coastal zone of the Baltic Sea based on thermistor chain observations and satellite data. *Trudy Gidrometcentra Rossii (Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia)*, 2017. No. 364. P. 159–169 (in Russian).

Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., Kapustina M. Verification of the Ekman upwelling criterion with in situ temperature measurements in the southeastern Baltic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023. V. 11. No. 1. P. 179. DOI: 10.3390/jmse11010179.

O'Carroll A. G., Armstrong E. M., Beggs H. M., Bouali M., Casey K. S., Corlett G. K., Dash P., Donlon C. J., Gentemann C. L., Høyer J. L., Ignatov A., Kabobah K., Kachi M., Kurihara Y., Karagali I., Maturi E., Merchant C. J., Marullo S., Minnett P. J., Pennybacker M., Ramakrishnan B., Ramsankaran R., Santoleri R., Sunder S., Saux Picart S., Vázquez-Cuervo J., Wimmer W. Observational needs of sea surface temperature. *Frontiers in Marine Science*, 2019. V. 6. Iss. 420. 27 p. DOI: 10.3389/fmars.2019.00420

Omstedt A., Nyberg L. Response of Baltic Sea ice to seasonal, interannual forcing and Climate change. *Tellus A*, 1996. V. 48. No. 5. P. 644–662.

She J., Høyer J. L., Larsen J. Assessment of sea surface temperature observational networks in the Baltic Sea and North Sea. *Journal of Marine Systems*, 2007. V. 65. No. 1–4. P. 314–335.
