

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ НАТУРНЫХ, СПУТНИКОВЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР И ИХ БИООПТИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

П.А. Салюк, П.А. Файман, Н.А. Липинская, Д.В. Макаров

Представлен совместный анализ данных судовых *in situ* измерений гидрологических и биооптических характеристик водной толщи, спутниковых данных по концентрации хлорофилла-а и температуре поверхности моря, а также данных регионального океанографического реанализа JCOPE2 для изучения гидродинамических структур и их биооптических проявлений в заливе Петра Великого (Японское море). Использован подход проведения быстрых океанографических разрезов через наблюдаемые в оперативных данных спутникового зондирования структуры в верхнем слое моря для валидации результатов гидродинамического моделирования, что позволяет получить массивы данных для анализа мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивости. Натурные измерения проведены в 89-м рейсе НИС «Профессор Гагаринский» в октябре 2024 г. через конкретные гидродинамические структуры, предварительно идентифицированные по оперативным спутниковым данным (MODIS, VIIRS) в видимом и ИК диапазонах. В результате проведенных исследований выделены две зоны действия антициклонических вихрей разных масштабов (мезо- и субмезо-), положение которых согласуется между данными численного моделирования JCOPE2 и прямых измерений (судовых и спутниковых), что может быть использовано в качестве показателя корректности реанализа. Обнаружено существенное заглубление слоя повышенных концентраций хлорофилла-а в области действия субмезомасштабного антициклонического вихря, характерное для действия даунвеллинга.

Ключевые слова: гидродинамические структуры, антициклонический вихрь, температура, концентрация хлорофилла-а, *in situ*, спутниковое зондирование, реанализ, залив Петра Великого, Японское море

Введение

Концепция оперативной океанографии получила широкое распространение в последние десятилетия и де факто стала стандартом современных океанографических исследований [1–4]. Самой важной частью подобных систем становится блок численных моделей, которые позволяют рассчитывать четырехмерные поля в пространстве–времени основных океанографических характеристик (температура, соленость, векторы скорости течений) как в режиме реанализа, так и в режиме прогноза [5–9]. Дополнительно оперативно могут рассчитываться характеристики акустических и биооптических полей, термохалинной стратификации, процессов газо-, тепло- и солеобмена. Также возможно проведение двухмерного и трех-

мерного лагранжева анализа траекторий перемещения частиц в рассматриваемых акваториях [10]. Для корректной работы подобных численных моделей требуется ассимиляция большого числа гидрометеорологических измерений и валидация результатов численных расчетов с данными реальных измерений [11]. Для ассимиляции хорошо подходят результаты распределенных и спутниковых измерений [12]. А для валидации могут быть использованы результаты отдельных измерительных экспериментов. При этом важным направлением дальнейшего развития океанографического численного моделирования является увеличение пространственного разрешения до сотен метров, что требует как новых подходов к самим численным расчетам, так и к схемам ассимиляции и валидации данных [13].

В ТОИ ДВО РАН одним из развиваемых подходов к валидации численных моделей является проведение быстрых океанографических разрезов через наблюдаемые в данных спутникового зондирования структуры в верхнем слое моря [13–15]. Основным преимуществом перед стандартной океанографической съемкой на фиксированной сетке [16–18] является возможность исследовать изменчивость конкретных гидродинамических структур с субмезомасштабным разрешением, минимизируя при этом эффекты от их перемещения в пространстве. Данный подход не заменяет, а дополняет существующие методы. С учетом того, что гидродинамические структуры на поверхности моря могут проявляться как за счет изменчивости шероховатости морской поверхности, так и за счет перераспределения полей температуры поверхности моря или биооптических характеристик, важным также является комплексный анализ спутниковых данных микроволнового, видимого и ИК спектральных диапазонов, что увеличивает вероятность обнаружения любых значимых структур в спутниковых данных [19].

В представленной работе приведен пример проведения океанографической съемки с целью сбора данных по вертикальной изменчивости гидрологических и биооптических характеристик в гидродинамических структурах для валидации гидродинамиче-

ского моделирования, а также для поиска проявлений гидродинамических процессов в биооптических измерениях.

■ Методы исследований

Работы выполнены в 89-м рейсе на НИС «Профессор Гагаринский» (ПГ89) в заливе Петра Великого и в прилегающих районах Японского моря с 8 по 14 октября 2024 года. На рис. 1 представлены схема работ и батиметрия района исследований.

При проведении исследований в течение всего рейса ежедневно использовались данные оптического и микроволнового спутникового зондирования, получаемые в пределах нескольких часов после измерений, а также результаты океанографических прогнозов, что позволило проводить оперативное планирование маршрута и получить данные в большом количестве гидродинамических структур за сжатые сроки экспедиции. Это существенно повысило эффективность исследований.

Для сбора *in situ* данных проводились следующие виды судовых работ: вертикальное зондирование профилографом Rinco (температура (T в $^{\circ}\text{C}$), соленность, мутность, флуоресценция хлорофилла-а (хл-а) (F_{chl} в мг/м^3 хл-а), кислород) на океанологических

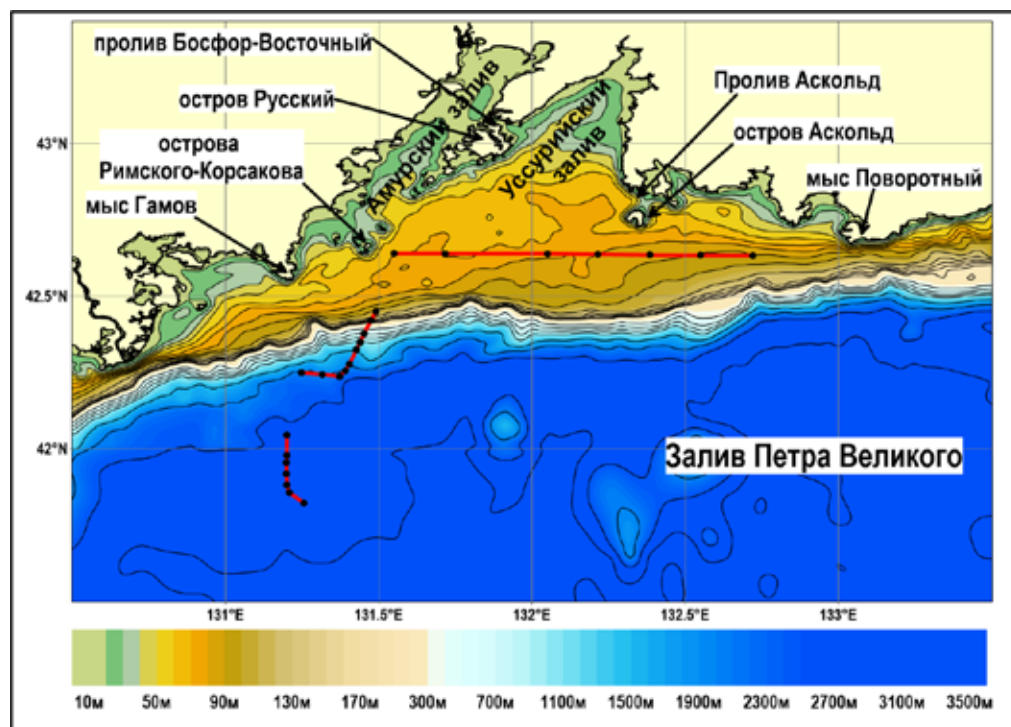


Рис. 1. Батиметрия района исследований и океанографические разрезы, выполненные в 89-м рейсе на НИС «Профессор Гагаринский» (ПГ89), в юго-западной части Японского моря с 8 по 14 октября 2024 г.

станциях; вертикальное зондирование на океанологических станциях и/или использование в проточной системе на ходу судна мультиканального флуориметра Turner C6P (мутность, флуоресценция хл-а, фикоэритрина, фикоцианина, окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ)); проточные измерения температуры и электропроводности морской воды с помощью термосолинографа SeaBird SBE-45 на ходу судна.

Для сравнения с натурными измерениями использованы данные оптического спутникового зондирования (радиометры семейства MODIS и VIIRS, размеры пикселя 0.7–2 км) второго уровня обработки с рассчитанными концентрациями хл-а (Chla в мг/м³) и температуры поверхности моря (SST в °C) по стандартным алгоритмам [20].

Данные о циркуляции и гидрологических характеристиках вод северо-западной части Японского моря получены из второй версии Японского эксперимента по прогнозированию циркуляции прибрежных вод океана (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2) — JCOPE2 [21]. Японское агентство морских и геологических наук и технологий (JAMSTEC) разрабатывает JCOPE2 с целью анализа и прогнозирования циркуляции океана. JCOPE2 основан на Принстонской модели океана с s-системой координат [8].

Область моделирования охватывает северо-западную часть Тихого океана в границах 10.5°–62° с.ш., 108°–180° в.д. Горизонтальное разрешение составляет 1/12° по долготе и широте. Временное разрешение – сутки. Период времени с первого января 1993 года по настоящее время плюс прогноз на неделю. Напряжение трения и потоки тепла на поверхности рассчитаны по данным реанализа NCEP/NCAR [22]. Соленость поверхности моря ассимилирована по климатологическим среднемесячным данным [23]. Спутниковые данные уровня и температуры поверхности моря, а также измеренные данные температуры и солености усваиваются трехмерным вариационным сопряженным методом.

■ Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены данные натурных и спутниковых измерений концентрации хл-а и температуры поверхности моря, выполненные через мезомасштабный антициклонический вихрь AE1 (разрез № 1, примерная зона действия вихря отмечена черным штрихованным контуром). Натурные измерения выполнены с 08:14 по 17:00 UTC 12.10.2024. Спутниковые данные Chla получены радиометром VIIRS на спутнике JPSS2 в 04:18 UTC 12.10.2024 (за 4 часа до

начала разреза). Спутниковые данные SST получены из ночных измерений радиометра VIIRS/JPSS1 в 17:24 UTC 12.10.2024 (через 20 минут после окончания разреза).

На рис. 2 проявления вихря AE1 видны как на спутниковых данных Chla, так и на SST в виде характерных завихренностей. При этом зоны повышенной концентрации хл-а соответствуют зонам пониженной температуры поверхности моря. Направление циркуляции вихря определено из спутниковых данных путем анализа нескольких последовательных спутниковых изображений, полученных в течение дня.

При сопоставлении спутниковых и натурных данных важно иметь в виду, что спутниковое изображение получено практически мгновенно, а океанографический разрез выполнен в течение определенного интервала времени. Поэтому обнаруженные особенности в данных спутниковых и судовых измерений могут быть сдвинуты относительно друг друга. В данных натурных измерений основное проявление вихря зафиксировано на станции 14, где изотермы и изолинии F_{chl} выгнуты вверх в слое 0–150 м, а в слоях глубже 150 м изотермы выгнуты вниз. На соседней станции 13, которая находится ближе к ядру вихря, изотермы в приповерхностном слое направлены вниз.

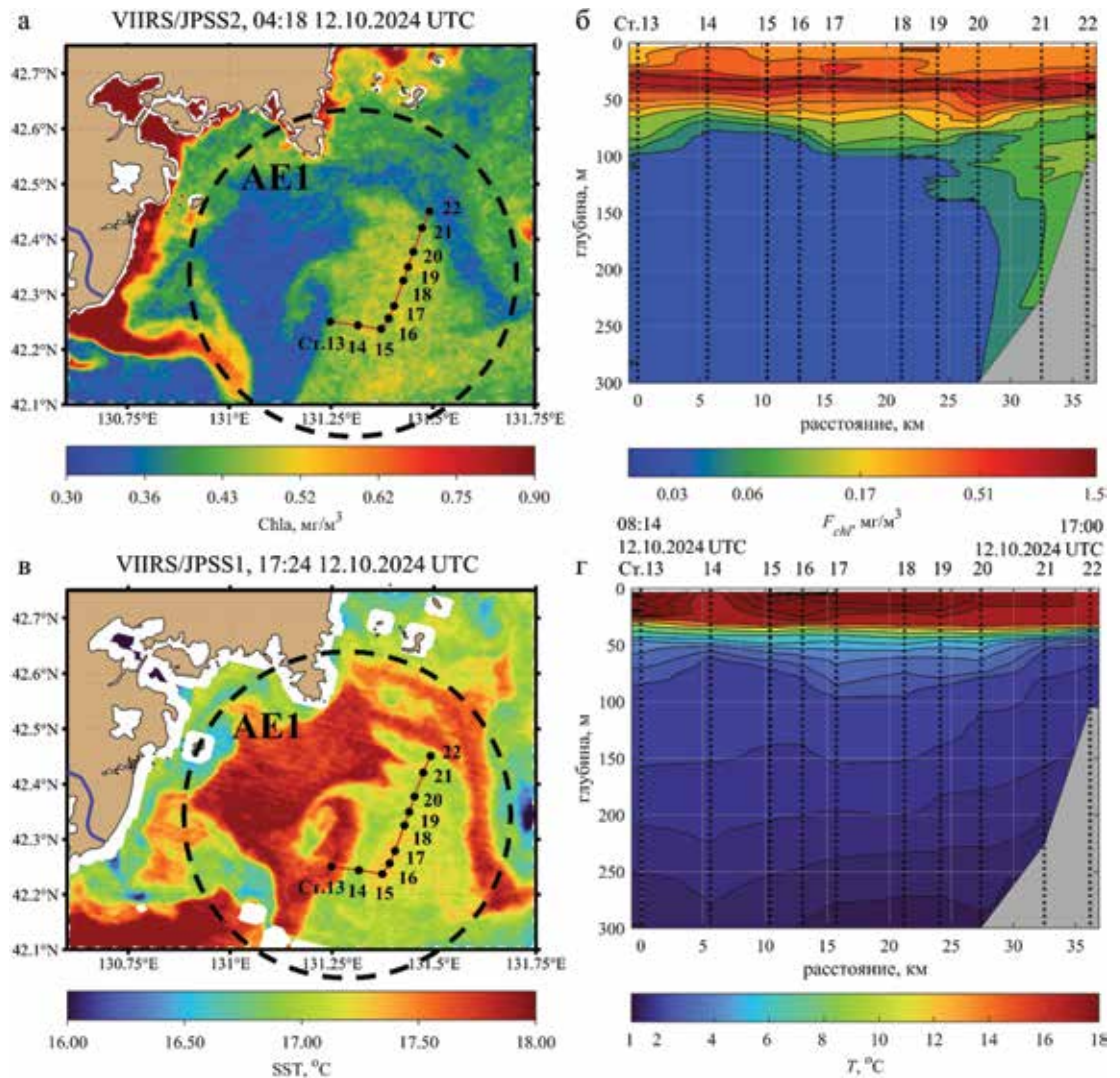
На рис. 3 представлены натурные и спутниковые измерения, выполненные в зоне влияния холодного Приморского течения через контрастную зону смены относительно теплых и холодных вод (разрез № 2). Натурные измерения проведены с 05:14 по 17:00 UTC 13.10.2024. Спутниковые данные Chla получены радиометром MODIS/Aqua в 04:56 UTC 13.10.2024 (за 18 минут до начала разреза). Спутниковые данные SST измерены радиометром VIIRS/JPSS1 в 03:07 UTC 13.10.2024 (за ~2 часа до начала разреза).

Контрастная зона пониженной температуры, которую видно на спутниковых данных, отчетливо видна на океанографическом разрезе на станциях 27 и 28. При этом зона повышенной концентрации хл-а, которая наблюдается на спутнике, в натурных данных разреза не так очевидна. В приповерхностном слое (0–15 м) значительного изменения концентрации хл-а не видно, но станции 27 и 28 отличаются тем, что на них слой повышенных концентраций хл-а значительно шире (около 40 м), чем для остальных станций разреза (20–30 м), что может влиять на спутниковые оценки концентрации хл-а.

Особое внимание заслуживает особенность, которую можно отметить на 27-й станции на разрезе № 2. Наблюдается два слоя максимума концентрации хл-а. Первый – узкий слой около 35 м, а второй суще-

Рис. 2. Результаты спутниковых и натуральных измерений, выполненных на разрезе № 1 12.10.2024 г., в районе действия мезомасштабного антициклонического вихря AE1. Пунктирной линией представлена примерная зона действия вихря:

а – Спутниковые оценки концентрации хл-а по данным спутникового радиометра VIIRS/JPSS2; б – Вертикальное распределение интенсивности флуоресценции хл-а вдоль разреза; в – Спутниковые оценки температуры поверхности моря по данным спутникового радиометра VIIRS/JPSS1; г – Вертикальное распределение температуры морской воды вдоль разреза



ственно заглублен до глубин 45–70 метров. При этом на разрезе № 2 на ст. 27 изотермы в приповерхностном слое (0–15 м) выгнуты вверх, а в слое 40–80 м выгнуты вниз. Подобная картина может указывать на процесс даунвеллинга на ст. 27. На спутниковых изображениях на ст. 27 видно проявление субмезомасштабного вихря AE2 (зона действия вихря отмечена белым штрихованным контуром). На основе анализа нескольких последовательных спутниковых изображений, выполненных перед разрезом № 2, было определено, что данный вихрь является антициклоническим и перемещался в северном направлении.

На рис. 4 приведен результат океанографического реанализа JCOPE2 по распределению векторов течений на глубине 20 м, а также по температуре морской воды (T_{model}) в точках разреза № 2. Дополнительно отмечены две зоны действия антициклонических вихрей AE1_model и AE2_model, которые можно сопоставить с данными спутниковых и натуральных измерений.

Мезомасштабный вихрь AE1 хорошо проявляется в данных численного моделирования и по своему положению и размеру достаточно близок к данным прямых измерений. Смещение составляет около 0.3 градуса в южном направлении. Такое расхождение является типичным для подобных сопоставлений, поскольку при численном моделировании наблюдаемые гидродинамические особенности могут быть смещены как по пространству, так и по времени. Особенно это актуально в случае значимого движения гидродинамических структур.

Субмезомасштабный вихрь AE2, который обнаружен в данных прямых спутниковых и судовых измерений, в данных реанализа JCOPE2 явно не проявляется вследствие недостатка горизонтального разрешения численного моделирования. Однако в непосредственной близости от AE2 можно выделить зону AE2_model, которая имеет признаки антициклонической завихренности и в которой вполне могут образовываться антициклонические вихри.

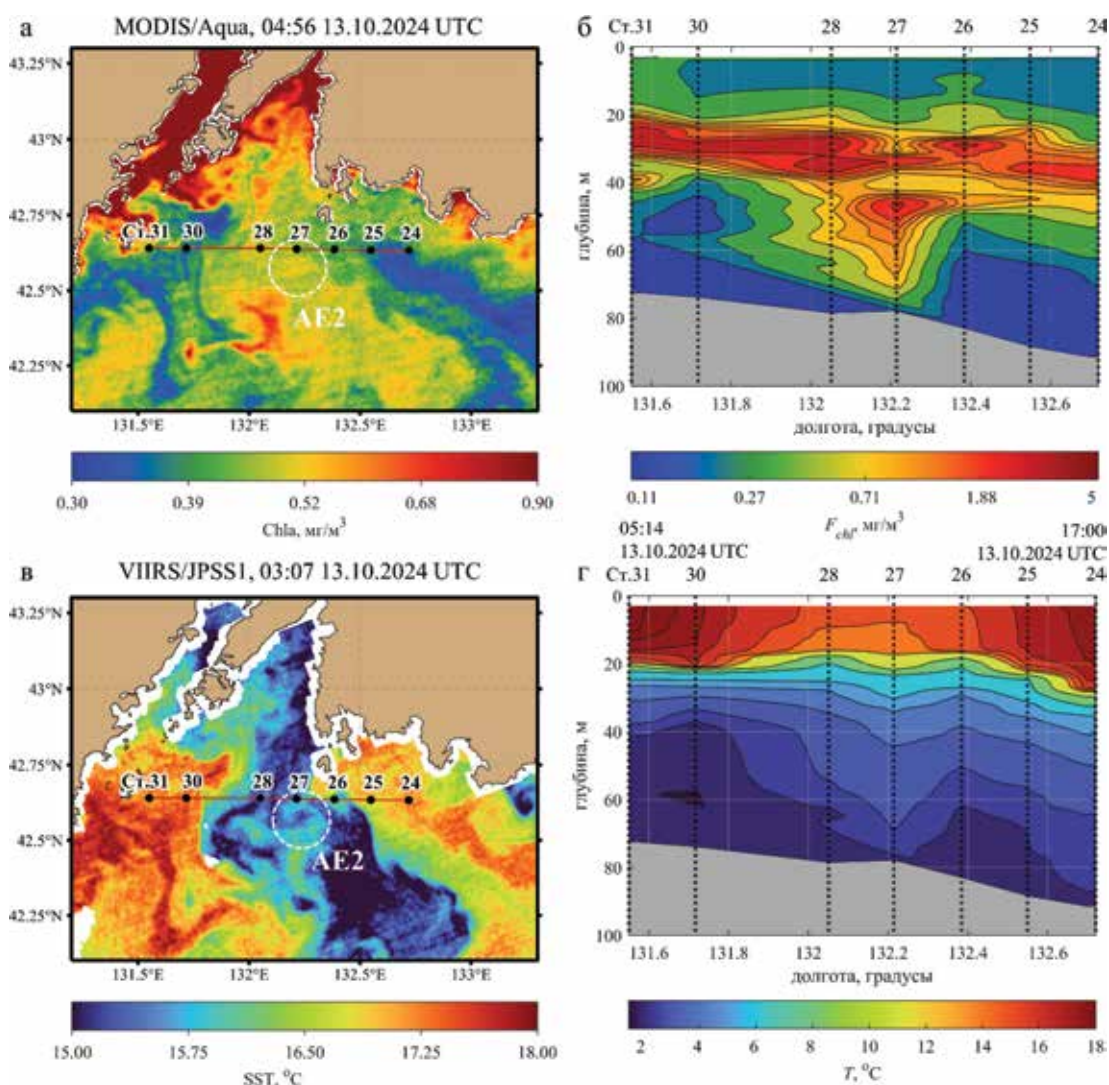


Рис. 3. Результаты спутниковых и натуральных измерений, выполненных вдоль разреза № 2 13.10.2024 г. Пунктирной линией представлена примерная зона действия субмезомасштабного антициклонического вихря: а – Спутниковые оценки концентрации хл-а по данным спутникового радиометра MODIS/Aqua; б – Вертикальное распределение интенсивности флуоресценции хл-а вдоль разреза; в – Спутниковые оценки температуры поверхности моря по данным спутникового радиометра VIIRS/JPSS1; г – Вертикальное распределение температуры морской воды вдоль разрез

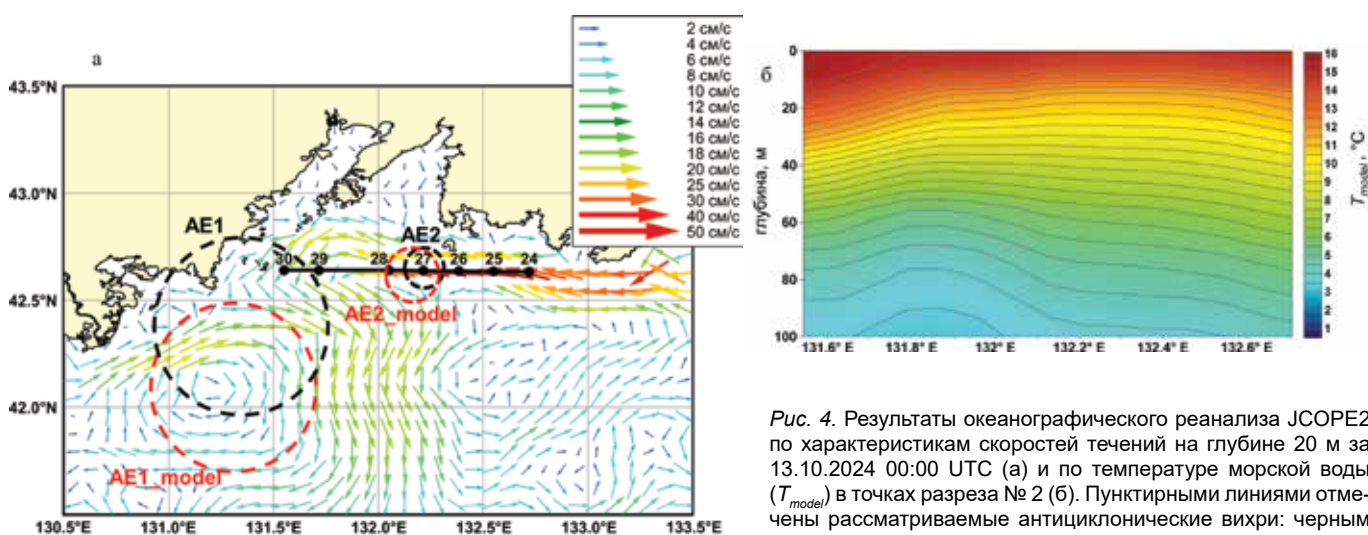


Рис. 4. Результаты океанографического реанализа JCOPE2 по характеристикам скоростей течений на глубине 20 м за 13.10.2024 00:00 UTC (а) и по температуре морской воды (T_{model}) в точках разреза № 2 (б). Пунктирными линиями отмечены рассматриваемые антициклонические вихри: черным цветом – зоны действия вихрей по данным прямых измерений, красным цветом – по данным численного моделирования

Распределение модельной температуры T_{model} в целом повторяет распределение измеренной температуры, представленной на рис. 3, 2, с учетом особенностей численного гидродинамического моделирования, при котором происходит сглаживание фронтальных зон и гидродинамических структур. В центре разреза на станциях 27 и 28 в приповерхностном слое изотермы в данных численного моделирования выгнуты вверх, что также наблюдалось в данных прямых измерений. Диапазон модельных температур на разрезе составил около 3–16 °С, измеренных температур около 1–18 °С.

Проведенное сравнение подтверждает, что используемая модель адекватно описывает крупные черты поля температуры и мезомасштабные вихри, в то время как воспроизведение более мелких структур и точных границ фронтов требует повышения разрешающей способности реанализа.

Заключение

В ходе работы получен совместный массив данных судовых и спутниковых измерений, а также данных гидродинамического численного моделирования JCOPE2 в заливе Петра Великого. В данных зафиксированы проявления гидродинамических структур в полях гидрологических, биооптических и гидродинамических характеристик. Выделены две зоны действия антициклонических вихрей разных масштабов, положение которых согласуется между данными численного моделирования и прямых измерений, что может быть использовано в качестве показателя корректности океанографического реанализа JCOPE2. Обнаружено существенное заглубление слоя повышенных концентраций хл-а в области действия субмезомасштабного антициклонического вихря, характерное для действия даунвеллинга. Результаты реанализа JCOPE2 демонстрируют способность воспроизводить основные черты гидрологической структуры и мезомасштабной изменчивости залива Петра Великого, однако с ограничениями в точности позиционирования и разрешении субмезомасштабных вихрей.

Проводимые исследования востребованы для развития систем оперативной океанографии по восстановлению и прогнозированию гидрологических, гидродинамических и гидрооптических характеристик в четырехмерном пространстве-времени, а также для создания систем многоуровневого экологического мониторинга.

Работы выполнялись в рамках Государственного задания ТОИ ДВО РАН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коротаев Г.К. Оперативная океанография - новая ветвь современной океанологической науки // Вестник Российской академии наук. 2018. Т. 88, № 7. С. 579–588. DOI 10.31857/S086958730000081-7. EDN RZVKBKD.
2. Зацепин А.Г., Коваленко В.В., Куклев С.Б., Телегин В.А. Прибрежная оперативная океанография – современный метод мониторинга шельфовосклоновой зоны морей и океанов // Океанология. 2024. Т. 64, № 6. С. 1023–1025. DOI 10.31857/S0030157424060143. EDN FHMKYW.
3. Schiller A., Mourre B., Drillet Y., Brassington G. An overview of operational oceanography // New Frontiers in Operational Oceanography / eds E. Chassignet, A. Pascual, J. Tintoré, J. Verron. GODAE Ocean View, 2018. P. 1–26. DOI 10.17125/gov2018.ch01.
4. She J., Allen I., Buch E., Crise A., Johannessen J. A., Le Traon P.-Y., Lips U., Nolan G., Pinardi N., Reißmann J. H., Siddorn J., Stanev E., Wehde H. Developing European operational oceanography for Blue Growth, climate change adaptation and mitigation, and ecosystem-based management // Ocean Science. 2016. Vol. 12. P. 953–976. DOI 10.5194/os-12-953-2016.
5. Cummings J.A., Smedstad O.M. Variational Data Assimilation for the Global Ocean // Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications / eds. S. Park, L. Xu. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. Vol. II. P. 303–342. DOI 10.1007/978-3-642-35088-7_13.
6. Gusev A.V., Diansky N.A., Fomin V.V., Volodin E.M., Zalesny V.B. The Model of Oceanic and Marine Circulation INMOM: From Origins to the Present Day // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2025. Vol. 61, No. 3. P. 311–324. DOI 10.1134/S0001433825700653. EDN VSOSJV.
7. Jean-Michel L., Eric G., Romain B.-B., Gilles G., Angélique M., Marie D., Clément B., Mathieu H., Olivier L. G., Charly R., Tony C., Charles-Emmanuel T., Florent G., Giovanni N., Mounir B., Yann D., Pierre-Yves L.T. The Copernicus Global 1/12° Oceanic and Sea Ice GLORYS12 Reanalysis // Frontiers in Earth Science. 2021. Vol. 9. Art. 698876. DOI 10.3389/feart.2021.698876.
8. Mellor G.L., Hakkinen S., Ezer T., Patchen R. A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids // Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications / ed. N. Pinardi, J. D. Woods. New York: Springer, 2002. P. 55–72.
9. Shechepetkin A.F., McWilliams J.C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model // Ocean Modelling. 2005. Vol. 9, No. 4. P. 347–404. DOI 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
10. Prants S.V. Dynamical systems theory approach in oceanography: a review on achievements, limitations, verification and validation of Lagrangian methods // Frontiers in Marine Science. 2025. Vol. 12. Art. 1621820. DOI 10.3389/fmars.2025.1621820.
11. Davidson F., Alvera-Azcárate A., Barth A., Brassington G.B., Chassignet E.P., Clementi E., De Mey-Frémaux P., Divakaran P., Harris C., Hernandez F., Hogan P., Hole L.R., Holt J., Liu G., Lu Y., Lorente P., Maksymczuk J., Martin M., Mehra A., Melsom A., Mo H., Moore A., Oddo P., Pascual A., Pequignat A.-C., Kourafalou V., Ryan A., Siddorn J., Smith G., Spindler D., Spindler T., Stanev E. V., Staneva J., Storto A., Tanajura C., Vinayachandran P. N., Wan L., Wang H., Zhang Y., Zhu X., Zu Z. Synergies in Operational Oceanography: The Intrinsic Need for Sustained Ocean Observations // Frontiers in Marine Science. 2019. Vol. 6. Art. 450. DOI 10.3389/fmars.2019.00450.
12. Le Traon P.-Y. From satellite altimetry to Argo and operational oceanography: three revolutions in oceanography // Ocean Science. 2013. Vol. 9, No. 5. P. 901–915. DOI 10.5194/os-9-901-2013.
13. Fayman P.A., Salyuk P.A., Budyansky M.V., Burenin A.V., Di-dov A.A., Lipinskaya N.A., Ponomarev V.I., Udalov A.A., Morgunov Y.N., Uleysky M.Y., Shkramada S.S. Transport of the Tumen River water to the Far Eastern Marine Reserve (Posyet Bay) based on in situ, satellite data and Lagrangian modeling using ROMS current velocity output // Marine Pollution Bulletin. 2023. Vol. 194. Art. 115414. DOI 10.1016/j.marpolbul.2023.115414.
14. Budyansky M.V., Ladychenko S.Yu., Lobanov V.B., Prants S.V., Udalov A.A. Evolution and structure of a mesoscale anticyclonic eddy in the northwestern Japan Sea and its exchange with surrounding waters:

in situ observations and Lagrangian analysis // *Ocean Dynamics*. 2024. Vol. 74, No. 11–12. P. 901–917. DOI 10.1007/s10236-024-01631-w.

15. Udalov A.A., Lobanov V.B., Prants S.V., Ladychenko S.Yu., Budyansky M.V., Salyuk A.N. Census of mesoscale eddies in the northwestern Japan Sea based on Lagrangian analysis and ship observations // *Progress in Oceanography*. 2025. Vol. 236. Art. 103513. DOI 10.1016/j.pcean.2025.103513.

16. Данченков М.А. Структура вод залива Петра Великого // *Труды / Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт*. 2021. № 156. С. 6–34. EDN: RASVQF.

17. Никитин А.А., Цыпышева И.Л., Зуенко Ю.И., Басюк Е.О. Структура Приморского течения (Японское море) на спутниковых изображениях и стандартных разрезах // *Изв. ТИПРО*. 2024. Т. 204, Вып. 4. С. 843–865. DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-843-865. EDN: TPQWML.

18. Файман П.А., Пономарев В.И. Диагностические расчеты циркуляции вод залива Петра Великого по данным экспедиций ДВНИГМИ 2007–2010 гг. // *Вестн. ДВО РАН*. 2018. № 1(197). С. 60–70. EDN: YOTIWL.

19. Lipinskaya N.A., Salyuk P.A., Golik I.A. Variations and depth of formation of submesoscale eddy structures in satellite ocean color data in the southwestern region of the Peter the Great Bay // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 23. Art. 5600. DOI 10.3390/rs15235600.

20. NASA Ocean Color. 2025. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 31.10.2025).

21. Miyazawa Y., Yaremchuk M., Varlamov S.M., Miyama T., Aoki K. Applying the adjoint-free 4dVar assimilation to modeling the Kuroshio south of Japan // *Ocean Dynamics*. 2020. Vol. 70. P. 1129–1149. DOI: 10.1007/s10236-020-01372-6.

22. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77, No. 3. P. 437–471. DOI 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

23. Conkright M.E., Antonov J.I., Baranova O., Boyer T.P., Garcia H.E., Gelfeld R., Johnson D., Locarnini R.A., Murphy P.P., O'Brien T.D., Smolyar I., Stephens C. *World Ocean Database 2001: Vol. 1: Introduction* / ed. S. Levitus. Washington, DC: NOAA, 2002. (NOAA Atlas NESDIS; Vol. 42). 1 CD-ROM.

Информация об авторах

САЛЮК Павел Анатольевич, к. ф.-м. н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)

Область научных интересов: оптика океана, спутниковое зондирование, океанология

E-mail: psalyuk@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-3224-710X

ФАЙМАН Павел Аркадьевич, PhD, в. н. с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)

Область научных интересов: гидродинамическое численное моделирование

E-mail: pavel.fayman@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-4136-302X

ЛИПИНСКАЯ Надежда Александровна, к. ф.-м. н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)

Область научных интересов: оптика океана, океанология

E-mail: lipinskaya.na@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-3177-4426

МАКАРОВ Денис Владимирович, д. ф.-м. н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)

Область научных интересов: нелинейная динамика, квантовая оптика, акустика океана

E-mail: makarov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-2568-8927



JOINT ANALYSIS OF IN-SITU, SATELLITE, AND MODEL DATA FOR STUDYING HYDRODYNAMIC STRUCTURES AND THEIR BIO-OPTICAL MANIFESTATIONS IN PETER THE GREAT BAY

P.A. Salyuk, P.A. Fayman, N.A. Lipinskaya, D.V. Makarov

A joint analysis of data from shipboard in-situ measurements of hydro-physical and bio-optical characteristics of the water column, satellite data on chlorophyll-a concentration and sea surface temperature, and data from the JCOPE2 regional oceanographic reanalysis is presented to study hydrodynamic structures and their bio-optical manifestations in Peter the Great Bay (Sea of Japan). An approach involving rapid oceanographic transects across structures observed in operational satellite remote sensing data in the upper sea layer was used to validate the results of hydrodynamic modeling, allowing for the acquisition of data arrays to analyze mesoscale and submesoscale variability. In-situ measurements were carried out during the 89th voyage of the R/V Professor Gagarinsky in October 2024 across specific hydrodynamic structures pre-identified from operational satellite data (MODIS, VIIRS) in the visible and infrared ranges. As a result of the research, two zones of influence of anticyclonic eddies of different scales (meso- and submesoscale) were identified. Their locations are consistent across the numerical modeling data JCOPE2 and direct measurement data (shipboard and satellite), which can be used as an indicator of the reanalysis correctness. A significant deepening of the layer of elevated chlorophyll-a concentrations was detected in the area of the submesoscale anticyclonic eddy, characteristic of downwelling.

Keywords: hydrodynamic structures, anticyclonic eddy, temperature, chlorophyll-a concentration, in situ, satellite remote sensing, reanalysis, Peter the Great Bay, Sea of Japan

References

1. Korotaev G.K. Operational Oceanography: A New Branch of Modern Oceanological Science // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2018. Vol. 88, No. 4. P. 272–280. DOI 10.1134/S1019331618040032. EDN XKPEVC. (In Russian)
2. Zatsepin A.G., Kovalenko V.V., Kuklev S.B., Telegin V.A. Coastal operational oceanography – a modern method of monitoring the shelf-slope zone of seas and oceans // Oceanology 2024. Vol. 64, No 6. P. 1023–1025. DOI 10.31857/S0030157424060143. EDN FHMKYW. (In Russian)
3. Schiller A., Mourre B., Drillet Y., Brassington G. An overview of operational oceanography // New Frontiers in Operational Oceanography / eds E. Chassignet, A. Pascual, J. Tintoré, J. Verron. GODAE Ocean View, 2018. P. 1–26. DOI 10.17125/gov2018.ch01.
4. She J., Allen I., Buch E., Crise A., Johannessen J.A., Le Traon P.-Y., Lips U., Nolan G., Pinardi N., Reißmann J.H., Siddorn J., Stanev E., Wehde H. Developing European operational oceanography for Blue Growth, climate change adaptation and mitigation, and ecosystem-based management // Ocean Science. 2016. Vol. 12. P. 953–976. DOI 10.5194/os-12-953-2016.
5. Cummings J.A., Smedstad O.M. Variational Data Assimilation for the Global Ocean // Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II) / eds S. Park, L. Xu. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 303–342. DOI 10.1007/978-3-642-35088-7_13.
6. Gusev A.V., Diansky N.A., Fomin V.V., Volodin E.M., Zalesny V. B. The Model of Oceanic and Marine Circulation INMOM: From Origins to the Present Day // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2025. Vol. 61, No. 3. P. 311–324. DOI 10.1134/S0001433825700653. EDN VSOSJV.
7. Jean-Michel L., Eric G., Romain B.-B., Gilles G., Angélique M., Marie D., Clément B., Mathieu H., Olivier L.G., Charly R., Tony C., Charles-Emmanuel T., Florent G., Giovanni R., Mounir B., Yann D., Pierre-Yves L. T. The Copernicus Global 1/12° Oceanic and Sea Ice GLORYS12 Reanalysis // Frontiers in Earth Science. 2021. Vol. 9. Art. 698876. DOI 10.3389/feart.2021.698876.
8. Mellor G.L., Hakkinen S., Ezer T., Patchen R. A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids // Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications / ed. N. Pinardi, J.D. Woods. New York: Springer, 2002. P. 55–72.
9. Shchepetkin A.F., McWilliams J.C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model // Ocean Modelling. 2005. Vol. 9, No. 4. P. 347–404. DOI 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
10. Prants S.V. Dynamical systems theory approach in oceanography: a review on achievements, limitations, verification and validation of Lagrangian methods // Frontiers in Marine Science. 2025. Vol. 12. Art. 1621820. DOI 10.3389/fmars.2025.1621820.
11. Davidson F., Alvera-Azcárate A., Barth A., Brassington G.B., Chassignet E.P., Clementi E., De Mey-Frémaux P., Divakaran P., Harris C., Hernandez F., Hogan P., Hole L.R., Holt J., Liu G., Lu Y., Lorente P.,

Maksymczuk J., Martin M., Mehra A., Melsom A., Mo H., Moore A., Oddo P., Pascual A., Pequignot A.-C., Kourafalou V., Ryan A., Siddorn J., Smith G., Spindler D., Spindler T., Stanev E. V., Staneva J., Storto A., Tanajura C., Vinayachandran P.N., Wan L., Wang H., Zhang Y., Zhu X., Zu Z. Synergies in Operational Oceanography: The Intrinsic Need for Sustained Ocean Observations // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 6. Art. 450. DOI 10.3389/fmars.2019.00450.

12. Le Traon P.-Y. From satellite altimetry to Argo and operational oceanography: three revolutions in oceanography // *Ocean Science*. – 2013. Vol. 9, No. 5. P. 901–915. DOI 10.5194/os-9-901-2013.

13. Fayman P.A., Salyuk P.A., Budyansky M.V., Burenin A.V., Didov A.A., Lipinskaya N.A., Ponomarev V.I., Udalov A.A., Morgunov Y. N., Uleysky M.Y., Shkramada S.S. Transport of the Tumen River water to the Far Eastern Marine Reserve (Posyet Bay) based on in situ, satellite data and Lagrangian modeling using ROMS current velocity output // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 194. Art. 115414. DOI 10.1016/j.marpolbul.2023.115414.

14. Budyansky M.V., Ladychenko S.Yu., Lobanov V.B., Prants S.V., Udalov A. A. Evolution and structure of a mesoscale anticyclonic eddy in the northwestern Japan Sea and its exchange with surrounding waters: in situ observations and Lagrangian analysis // *Ocean Dynamics*. – 2024. – Vol. 74, No. 11–12. P. 901–917. DOI 10.1007/s10236-024-01631-w.

15. Udalov A.A., Lobanov V.B., Prants S.V., Ladychenko S.Yu., Budyansky M.V., Salyuk A.N. Census of mesoscale eddies in the northwestern Japan Sea based on Lagrangian analysis and ship observations // *Progress in Oceanography*. 2025. Vol. 236. Art. 103513. DOI 10.1016/j.pocean.2025.103513.

16. Danchenkov M.A. Water Structure of the Peter the Great Bay // *Proceedings of FERHRI*. 2021. № 156. P. 6–34. EDN: RASVQF. (In Russian)

17. Nikitin A.A., Tsypysheva I.L., Zuenko Yu.I., Basyuk E.O. Structure of the Primorye Current (Japan Sea) on satellite images and standard sections // *Izvestiya TINRO*. 2024. Vol. 204. No. 4. P. 843–865. DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-843-865. EDN: TPQWMQ. (In Russian)

18. Fayman P.A., Ponomarev V.I. Diagnostic Simulation of Sea Currents in The Peter the Great Bay Based on FERHRI Oceanographic Surveys From 2007 To 2010 // *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2018. № 1(197). P. 60–70. EDN: YOTIWL. (In Russian)

19. Lipinskaya N.A., Salyuk P.A., Golik I.A. Variations and depth of formation of submesoscale eddy structures in satellite ocean color data in the southwestern region of the Peter the Great Bay // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. No. 23. Art. 5600. DOI 10.3390/rs15235600.

20. NASA Ocean Color [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 31.10.2025).

21. Miyazawa Y., Yaremchuk M., Varlamov S.M., Miyama T., Aoki K. Applying the adjoint-free 4dVar assimilation to modeling the Kuroshio south of Japan // *Ocean Dynamics*. 2020. Vol. 70. P. 1129–1149. DOI: 10.1007/s10236-020-01372-6.

22. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77, No. 3. P. 437–471. DOI 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

23. Conkright M.E., Antonov J.I., Baranova O., Boyer T.P., Garcia H.E., Gelfeld R., Johnson D., Locarnini R.A., Murphy P.P., O'Brien T.D., Smolyar I., Stephens C. *World Ocean Database 2001: Vol. 1: Introduction* / eds. S. Levitus. Washington, DC: NOAA, 2002. (NOAA Atlas NESDIS; Vol. 42). 1 CD-ROM.

Recommended citation:

Salyuk P.A., Fayman P.A., Lipinskaya N.A., Makarov D.V. JOINT ANALYSIS OF IN-SITU, SATELLITE, AND MODEL DATA FOR STUDYING HYDRODYNAMIC STRUCTURES AND THEIR BIO-OPTICAL MANIFESTATIONS IN PETER THE GREAT BAY. *Underwater investigations and robotics*. 2025. No. 4 (54). P. 68–76. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_54_04_07. EDN: CPKSMO.

Information about the authors

SALYUK Pavel Anatolievich, Candidate of physical and mathematical sciences

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS)

Address: Vladivostok, Russia

Research interests: ocean optics, satellite sensing, oceanology

E-mail: psalyuk@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-3224-710X

FAYMAN Pavel Arkadievich, PhD, leading research

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS)

Address: Vladivostok, Russia

Research interests: hydrodynamic numerical modeling

E-mail: pavel.fayman@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-4136-302X

LIPINSKAYA Nadezhda Alexandrovna, Candidate of physical and mathematical sciences

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS)

Address: Vladivostok, Russia

Research interests: ocean optics, oceanology

E-mail: lipinskaya.na@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-3177-4426

MAKAROV Denis Vladimirovich, Doctor of physical and mathematical sciences

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS)

Address: Vladivostok, Russia

Research interests: nonlinear dynamics, quantum optics, ocean acoustics

E-mail: makarov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-2568-8927

