

ний в геоинформатике // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 87–89

12. Цветков В. Я. Информационные единицы сообщений // Фундаментальные исследования. 2007. № 12. С. 123–124.

13. Цветков В.Я. Разработка проблемно ориентированных систем управления. М.: ГКНТ, ВНИЦентр, 1991. 113 с.

14. Ковержнев Е.А., Сурков Д.М. Анализ надежности связи в системе КОСПАС-САРСАТ // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2006. № 99. С. 111–115.

15. Пржибыл П., Свитек М. Телематика на транспорте. М.: МАДИ (ГТУ), 2003. 540 с.

16. Tsvetkov V.Ya. Framework of Correlative Analysis // European Researcher. 2012. Vol.(23). No. 6–1. P. 839–844.

17. Майоров А.А. Состояние и развитие геоинформатики // Науки о Земле. Вып. 03.2012. С. 11–16.

The use of global navigation satellite systems to support intelligent transportation systems

Alexandr Anatolievich Lobanov, Ph.D., Associate Professor, Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation MSTU MIREA

The article describes the global navigation satellite system as a basis of support for intelligent transportation systems. The article describes the use of intelligent transportation systems for the management of all types of transport, including sea and river. The article describes the difference between intelligent systems and automated control systems. The article describes the conditions for the application of intelligent transport systems. The paper highlights the role of the Russian government decree No. 641 for the development of traffic management and for the development of intelligent systems. The article highlights features of the current state of the development of Intelligent Transport Systems in the field of activity of the Ministry of Maritime and River Transport of Russia. In the article the problem of the use of ITS in the field of marine and inland water transport.

Key words: intelligent transportation systems, transportation management, intelligent control of the courts, information support management for transport

УДК 532.5.032:51-37

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Марина Георгиевна Алексанина, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

E-mail: margo@mail.ru

Сергей Евгеньевич Дьяков, мл. науч. сотр.

E-mail: sergdkv@gmail.com

Алексей Андреевич Загумёнов, инж.-прог.

E-mail: truepikvic@gmail.com

Институт автоматизи и процессов управления ДВО РАН

<https://www.iacp.dvo.ru>; <https://www.satellite.dvo.ru>

Описываются технологии расчета термодинамических параметров поверхности океана (температуры, параметров синоптических вихрей, скоростей течений) по изображениям метеорологических спутников Земли. Разрабатываемые технологии нацелены на повышение точности и достоверности проводимых расчетов для использования в оперативном мониторинге аквато-

рий. Все они внедрены и используются в Центре коллективного пользования «Региональный спутниковый мониторинг окружающей среды ДВО РАН».

Ключевые слова: метеорологические спутники, температура поверхности океана, синоптические вихри океана, скорости поверхностных течений.

Введение

На протяжении более чем 100 лет основной стратегической задачей развития Дальнего Востока является укрепление влияния России в бассейне Тихого океана. Именно здесь, на самой протяженной морской границе, проходят основные транспортные морские и воздушные пути. Ведется добыча морских энерго- и биоресурсов. Только данные со спутников дистанционного зондирования Земли могут регулярно давать информацию для таких обширных территорий и акваторий. Поэтому для Дальнего Востока чрезвычайно актуально освоение технологий мониторинга по данным метеорологических спутников с расчетом основных физических параметров океана.



М.Г. Алексанина

Расчет и построение температуры поверхности океана (ТПО) является одной из ключевых задач мониторинга морских акваторий. От ее решения зависят последующие задачи – достоверный расчет таких термических структур как вихри, струи, апвеллинги. Построению композиционных карт посвящено значительно количество работ [1–4]. В настоящее время для построения композиционных карт ТПО используется или простое осреднение данных (так делается в проекте NOAA/NASA Pathfinder) [5] или метод оптимальной интерполяции, используемый, например, в проекте New Generation Sea Surface Temperature – NGSST [4].

Циркуляция океана представляет собой «плотную упаковку» вихрей различных размеров [5], поэтому поле скорости течений синоптического масштаба можно представить как совокупность полей течений конкретных синоптических объектов – вихрей и фронтальных течений. Спутниковые изображения океана в инфракрасном, видимом и микроволновом спектральных диапазонах являются квазимгновенными отпечатками термодинамики как самого океана, так и взаимодействия океана и атмосферы. Яркостные неоднородности спутниковых инфракрасных изображений океана не являются чисто поверхностными явлениями, а отображают физические характеристики вод.



С.Е. Дьяков

Расчёт скоростей течений на поверхности океана – одна из наиболее актуальных научных и практических задач. Было доказано, что при расчете скоростей перемещений для



А.А. Загумёнов

потоков, присущих вихрям и течениям синоптического масштаба визуально-ручное прослеживание перемещений яркостных неоднородностей (метод морских маркеров) дает приемлемые результаты [6, 7, 8]. Все имеющиеся подходы к построению автоматического метода расчета скоростей [9–16] имеют 2 существенных недостатка – занижение значений величин скоростей и наличие значительного количества «ложных» векторов (не удовлетворяющих заданной точности).

В Центре коллективного пользования «Региональный спутниковый мониторинг окружающей среды ДВО РАН» (Спутниковый центр ДВО РАН) уже более 20 лет ведется прием и обработка данных всей группировки метеорологических спутников над регионом. На основе получаемых данных ведется разработка новых методов автоматического получения по спутниковым изображениям температуры поверхности океана, параметров излучения водной поверхности и биопараметров океана, скоростей поверхностных течений, динамических параметров синоптических вихрей.

Разработана технология построения композиционных карт ТПО, основанная на расчете наиболее вероятной температуры поверхности за заданный интервал времени (а не средней, как это принято в основном в настоящее время). Подход позволяет сохранять четкость термических фронтов океана. Наличие чётких термических фронтов позволяет рассчитать структуру течений в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) [17, 18]. ДОТК, построенные по композиционным полям ТПО, являются основой автоматического выделения вихрей и фронтальные течения с расчетом положения, формы и размера синоптических объектов. На основе термической неоднородности поверхности океана разработан метод автоматического получения оценок скоростей поверхностных течений, основанный на прослеживании термических неоднородностей по последовательности спутниковых изображений (кросскорреляционная методика с новым критерием отбраковки неправильно рассчитанных векторов).

Технологии расчета термодинамических параметров поверхности океана

1. Температура поверхности океана (ТПО)

Два вида температуры воды имеют особое значение: температура на глубине в 1 метр (bulk), и температура тонкого, миллиметрового слоя морской воды (skin). Температура на глубине в 1 м меньше подвержена влиянию дневного прогрева и отражает информацию о структурах поверхности океана. Точность температуры на глубине в 1 метр легко определяется по данным дрейфующих буев, передающих информацию в систему GTS (Global Telecommunications System WMS). Температура миллиметрового слоя поверхности океана может определяться по данным спутниковых измерений (после учета влияния облачности). Она определяет скорость обмена энергией между океаном и атмосферной и существенно меняется из-за суточного прогрева. Результат измерения температуры тонкого верхнего слоя поверхности океана верифицируется по данным радиометров, смонтированных на плавающих платформах, но число таких платформ невелико.

Карты температур поверхности океана, построенные по одиночным спутниковым снимкам, хорошо отражают как абсолютные значения температур, так и положение океанических образований, но возможно только при отсутствии облачности. В том случае, когда обозреваемый регион закрыт частичной облачностью, используются композиционные карты температуры поверхности океана.

Построение карт температуры поверхности океана требует следующих шагов (в случае наличия карт радиационных температур) (рисунки 1):

- фильтрация участков поверхности океана, закрытых облачностью;
- расчет значений температуры поверхности океана с использованием технологий MCSST, NLSST;
- построение грубых композиционных карт поверхности океана;
- дополнительная фильтрация облачности с использованием композиционных карт поверхности океана построенных на шаге 3;
- построение композиционных карт поверхности океана данным, прошедшим дополнительную фильтрацию.

Для построения карт температуры поверхности океана в Спутниковом центре ДВО РАН используются данные спутников серии POES NOAA и MTSAT (MTSAT-1R, MTSAT-2). Выбор спутников серии MTSAT связан с удачным расположением последних для наблюдения за западной частью Тихого океана и достаточно хорошим качеством радиометров.

Ярко-выраженные полосовые шумы на изображениях канала IR2 спутника MTSAT-1R устраняются с помощью отдельного алгоритма, использующего наличие корреляции между радиационными температурами каналов IR1, IR2 спутника MTSAT-1R. Поэтому для выбранного региона размером 100 на 100 км рассчитываются параметры преобразования $B(T(IR1))$ радиационной температуры канала IR1– $T(IR1)$ в разность каналов $T(IR1)–T(IR2)$. Затем рассматриваются колебания разницы $T(IR1)–T(IR2)–B(T(IR1))$ и после дополнительного осреднения с помощью горизонтального медианного фильтра оценивается

величина полового шума в каждом пикселе изображения, после чего исходные величины радиационных температур корректируются.

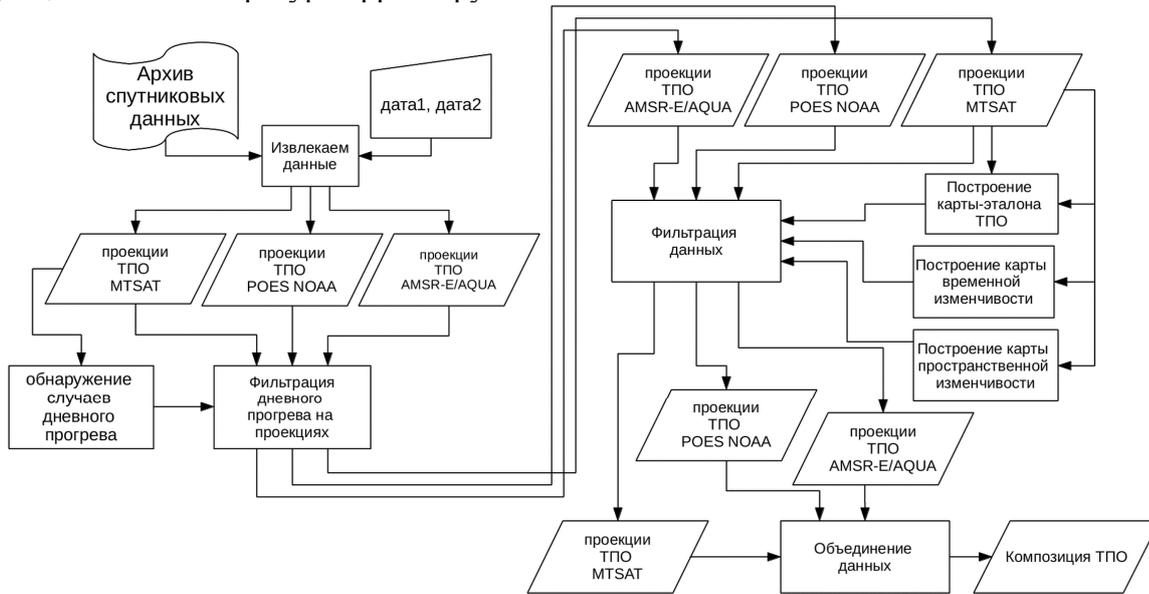


Рисунок 1 – Схема построения структурных композиционных карт ТПО

Грубая фильтрация облачности осуществляется с помощью классических пороговых алгоритмов, в которых величина порогов задана таблично как зависимость от высот Солнца и спутника над горизонтом.

Построение карты-эталона (грубой композиционной карты) производится с помощью медианного осреднения значений ТПО пикселей находящихся в окрестности данной точки и объединяет данные за 1 неделю.

Дополнительная фильтрация облачности включает:

- расчет карт пространственной и временной изменчивости значений ТПО;
- фильтрацию облачности на основе карты-эталона, карт пространственной и временной изменчивости согласно следующей зависимости:

$$\|T_{ТПО} - T_{эталон}\| < T_{простр.изм} + T_{врем.изм};$$

- фильтрацию случаев экстремального дневного прогрева тонкого верхнего слоя поверхности океана с помощью сопоставления дневных и ночных карт ТПО.

Построение композиционной карты ТПО выполняется с помощью медианного осреднения данных, прошедших дополнительную фильтрацию облачности. Получаемые таким образом композиционные карты (рисунок 2) содержат робастные оценки температуры поверхности океана, хорошо сохраняют очертания океанологических объектов.

2. Синоптические вихри

Метод автоматического обнаружения вихрей в океане использует два алгоритма: алгоритм поиска вихря с оценкой его размера и алгоритм построения контура ядра вихря. Фильтрация ложных и обнаружение устойчивых во времени объектов производится в два этапа. Сначала происходит отбраковка объектов по форме и «протеканию» ДОТК через его контур с учетом иерархии масштабов (от больших объектов к меньшим), а затем учитывается устойчивость вихрей во времени, которая оценивается по перемещениям объектов и их параметрам (размерам, форме и «протеканию») [19]. Для отбраковки ложных вихрей, которые составляют подавляющее большинство по одиночным изображениям, используется процедура трассировки. Суть трассировки состоит в том, что по серии карт для каждого объекта одного изображения находится ближайший к нему в окрестности его размера объект на другом изображении, после чего происходит сравнение их параметров. Если расстояние между объектами не превышает допустимого, то в случае высокой корреляции параметров, вихри объединяются в пару. Данная процедура повторяется для всей серии изображений. В результате устойчивые вихри стабильно выделяются алгоритмом,

при этом отфильтровывается подавляющая часть ложных объектов. Анализ показал высокую надежность прослеживаемых в течение 5 дней и более вихрей в условиях тяжелой облачности. Только 12% объектов оказались ложными.

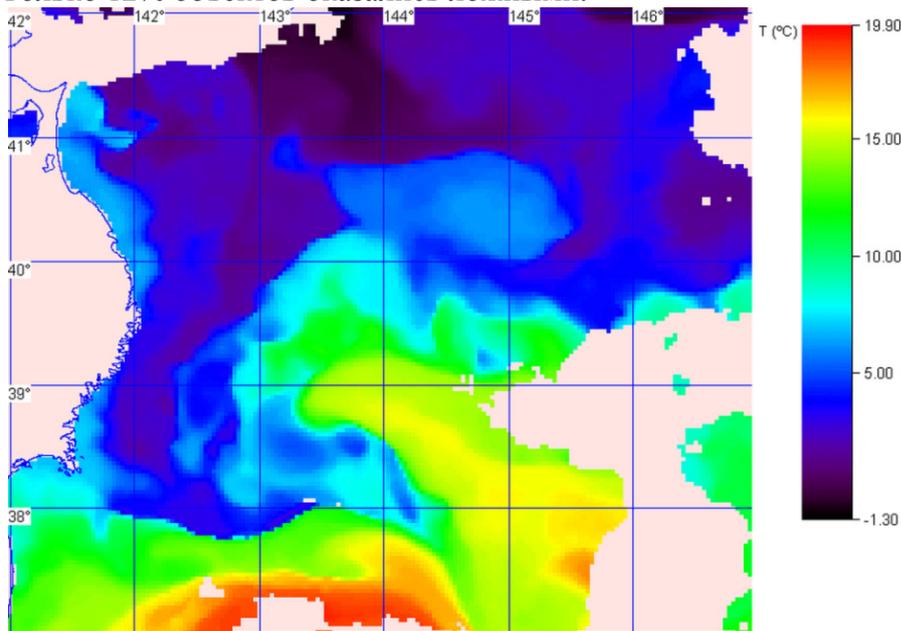


Рисунок 2 – Пример структурной композиционной карты ТПО за 15.03.2013

Созданный метод автоматического выделения синоптических вихрей с возможностью трассировки позволяет отследить эволюцию вихря и динамику его параметров (рисунок 3).

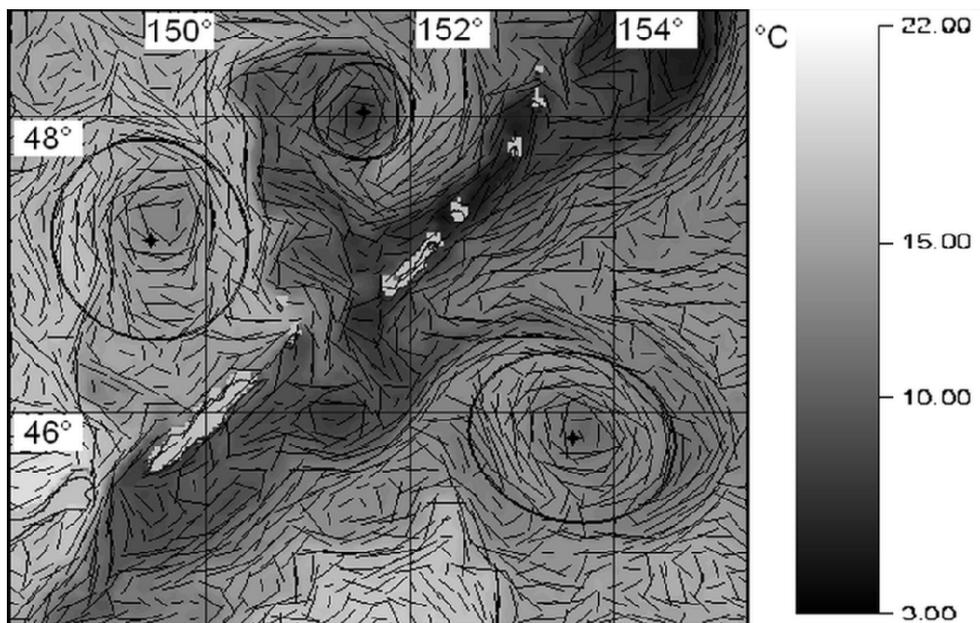


Рисунок 3 – Представление циркуляции на поверхности океана виде композиционной карты ТПО за 11.09.2010, совмещенной с картой ДОТК за 11.09.2010 и выделенными автоматически ядрами синоптических вихрей

3. Скорости течений

Технология автоматического расчета скоростей поверхностных течений (рисунок 4) по последовательности спутниковых изображений базируется на прослеживании термических неоднородностей и оценке их перемещений на спутниковых ИК-изображениях стандартным методом максимума кросс-корреляции (МКК) [20]. Предполагается, что за время наблюдения структура изображения, соответствующая шаблону, перемещается равномерно без поворотов. Оригинальность предложенного метода автоматического прослежива-

ния термических неоднородностей и оценка их перемещений на основе критерия подобия площадок двух изображений состоит в наличии нового критерия отбраковки некорректно рассчитанных перемещений. Используется не величина сходства площадок S , а «априорная оценка точности» расчета скорости. «Априорная оценка точности» рассчитывается по следующей технологии.

Для площадки исходного изображения и площадки-образа на другом изображении строятся аналоги автокорреляционных функций, где вместо величины автокорреляции используется модернизированная величина критерия сходства IQI [21]. Утверждается, что он наиболее близок к визуальной оценке качества изображений и представляет собой произведение трех положительных, нормированных на единицу величин:

$$IQI = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot \frac{2 * \bar{I}_1 \bar{I}_2}{\bar{I}_1^2 + \bar{I}_2^2} \cdot \frac{2 * \sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2},$$

где первый множитель – это коэффициент корреляции r яркостей двух площадок с нулевыми средними значениями (σ_1, σ_2 – соответствующие стандартные отклонения), второй множитель характеризует меру схожести средних яркостей I , а третий – это параметр схожести контрастов S . При полном совпадении изображений максимальная величина индекса равняется единице. По аналогии и с учетом специфики обрабатываемых изображений (средняя яркость ИК-изображений может меняться значительно за период между моментами получения изображений) в качестве параметра схожести площадок возьмем этот индекс, заменив второй множитель более приемлемым:

$$K = r^\alpha \cdot E^\beta \cdot S^\gamma,$$

где α, β, γ – положительные величины, E – нормированное рассогласование яркостей площадки первого изо-

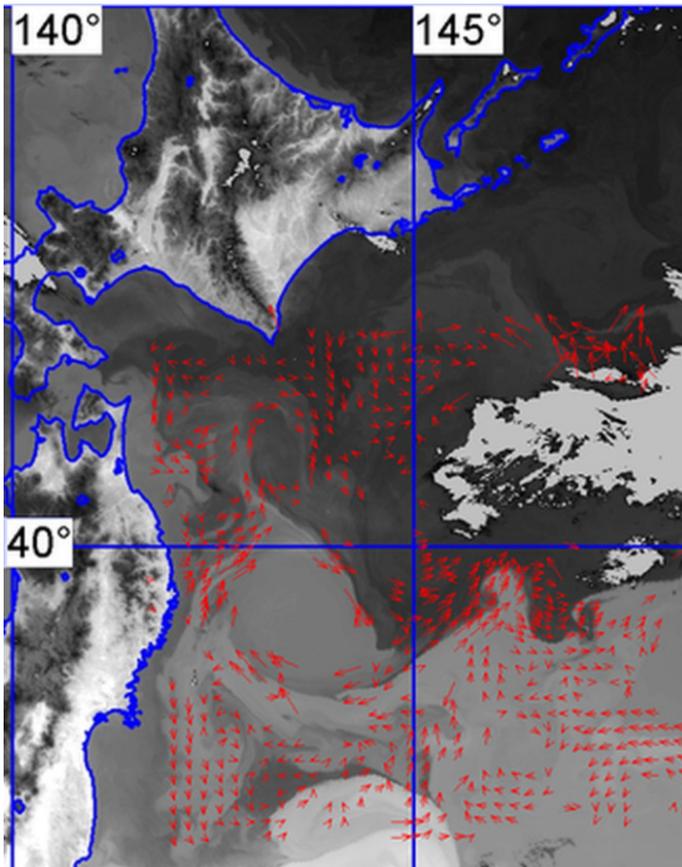


Рисунок 4 – Рассчитанные скорости течений, наложенные на поле ТПО за 11–12 апреля 2011 г.

бражения с яркостями площадки второго изображения, сдвинутой относительно первой на вектор перемещения (p, q) :

$$E(p, q) = 1 - \frac{1}{e_1 + e_2} \sum_j \sum_i |[I(i, j) - \bar{I}_1] - [I(i + p, j + q) - \bar{I}_2]|,$$

$$e_1 = \sum_j \sum_i |I(i, j) - \bar{I}_1|, \quad e_2 = \sum_j \sum_i |I(i + p, j + q) - \bar{I}_2|.$$

Размер сечения этих функций на уровне, равной величине S , считается пропорциональным ошибке расчета перемещения и используется для априорной оценки точности перемещения. Критерий отбраковки пропорционален максимальному радиусу сечения автокорреляционной функции на уровне величины максимума кросс-корреляции [22, 23]. Он позволил улучшить точность расчета величины перемещения водных масс, и в несколько раз увеличить число строящихся корректных векторов перемещений.

Средняя ошибка автоматического расчета была в пределах 5–9 см/сек. Занижение скорости не превышало 3-х см/сек. При наиболее часто используемом временном интервале в 12 часов скорости течений выше 60 см/сек не строятся из-за быстрого размыва

структуры термической неоднородности. Требуется уменьшение временного интервала. Новый подход к расчету скоростей поверхностных течений позволил резко уменьшить число некорректно рассчитанные векторов при уменьшении величины отбраковки корректных.

Заключение

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты. Разработанные методы автоматического получения по спутниковым изображениям температуры поверхности океана, динамических параметров синоптических вихрей, скоростей поверхностных течений позволили повысить точность и достоверность расчетов. Все эти подходы внедрены в практику работы ЦКП «Региональный спутниковый мониторинг окружающей среды ДВО РАН» и используются для оперативного мониторинга за состоянием прибрежных акваторий (рисунок 4).

Литература

1. May D.A., Parmeter M.M., Olszewski D.S., McKenzie B.D. Operational Processing of Satellite Sea Surface Temperature Retrievals at the Naval Oceanographic Office // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. Т. 79. No. 3. С. 397–407.
2. Martin M., Dash P., Ignatov A., Banzon V., Beggs H., Brasnett B., Cayula J., Cummings J., Donlon C., Gentemann C., Grumbine R., Ishizaki S., Maturi E., Reynolds R.W., Roberts-Jones J. Group for High Resolution Sea Surface temperature (GHRSSST) Analysis Fields Inter-comparisons. Part 1: A GHRSSST Multi-product Ensemble (GMPE) (Deep Sea Research); Part II: Topical Studies in Oceanography. 2012. Т. 77. С. 21–30.
3. Reynolds R.W., Smith T.M. Improved Global Sea Surface Temperature Analyses Using Optimum Interpolation // Journal of Climate. 1994. Т. 7. No. 6. С. 929–948.
4. Sakaida F., Kawamura H., Takahashi S., Shimada T., Kawai Y., Hosoda K., Guan L. Research and Development of the New Generation Sea Surface Temperature for Open Ocean (NGSST-O) Product and its Demonstration Operation // Journal of Oceanography. 2009. Т. 65. No. 6. С. 859–870.
5. Casey K.S., Cornillo P. A Comparison of Satellite and in Situ-based Sea Surface Temperature Climatologies // Journal of Climate. 1999. Т. 12. С. 1848–1862.
6. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 512 с.
7. Svejkovsky S. Sea surface flow estimation from Advanced Very High Resolution Radiometer and Coastal Zone Color Scanner Satellite Imagery: A Verification Study / J. Geophys. Res. 1988. No. 93. P. 6735–6743.
8. Алексанин А.И. Скорость геострофического течения на поверхности: сопоставление спутниковых и судовых измерений // Исследование Земли из космоса. 1991. № 6. С. 55–61.
9. Breaker L.C., Krasnopolsky V.M., Rao D.B., Yan X.-H. The Feasibility of Estimating Ocean Surface Currents on an Operational Basis using Satellite Feature Tracking Method // Bulletin of the American Meteorological Society. 1994. Vol. 75. No. 11. P. 2085–2095.
10. Ильин Ю.П. Метод оценки морских течений по спутниковым данным посредством обращения модели переноса трассера. Севастополь: Морской гидрофизический институт АН УССР, 1989. 51 с.
11. Wu; Wu Q.X., Pairman D., McNeil S., Barnes E.J. Computing Advective Velocities from Satellite Images of Sea Surface Temperature // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1992. No. 30. P. 166–176.
12. Vastano A.C., Borders S.E. Sea Surface Motion over an Anticyclonic Eddy on the Oyashio Front // Remote Sens. Environ. 1984. No. 16. P. 87–90.
13. Vastano A.C., Borders S.E., Wittenberg R. Sea Surface Flow Estimation with Infrared and Visible Imagery // J. Atmos. Ocean. Technology, 1985. No. 2. P. 401–403.
14. Бобков В.А. и др. Релаксационно-контурный алгоритм определения векторов морских течений по спутниковым изображениям и его синоптическая верификация / В.А. Бобков, А.В. Казанский, М.А. Морозов, А.А. Щебенькова // Автометрия. 2003. № 1. С. 73–81.
15. Emery W.J., Thomas A.C., Collins M.J., Crawford W.R., Mackas D.L. An Objective Method for Computing Advective Surface Velocities from Sequential Infrared Satellite Images // J. Geophys. Res., 1986. Vol. 91. No. C11. P. 12865–12878.

16. *Kamachi M.* Advective Surface Velocities Derived from Sequential Images for Rotational Flow Field: Limitations and Applications of Maximum Cross-correlation Method with Rotational Registration // *J. Geophys. Res.*, 1989. 94. P. 18227–18233.

17. *Tokmakian R., Strub P.T., McClean-Padman J.* Evaluation of the Maximum Cross-correlation Method of Estimating Sea Surface Velocities from Sequential Satellite Images // *J. Atmos. Ocean. Technology*, 1990. No. 7. P. 852–865.

18. *Александина М.Г.* Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA // *Исследования Земли из космоса*. 1997. № 3. С. 44–51.

19. *Александрин А.И., Александина М.Г., Горин И.И.* Спутниковые ИК-изображения: от термических структур к полю скоростей // *Исследование Земли из космоса*. 2001. № 2. С. 7–15.

20. *Александрин А.И., Загуменнов А.А.* Проблемы автоматического обнаружения вихрей океана по спутниковым ИК-изображениям // *Исследование Земли из космоса*. 2011. № 2. С. 1–11.

21. *Bowen M.M., Emery W.J., Wilkin J.L.; Tildesley P.C., Barton I.J., Knewtson R.* Extracting Multiyear Surface Currents from Sequential Thermal Imagery Using the Maximum Cross-correlation Technique // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. No. 19. P. 1665–1676.

22. *Wangand Z., Bovik A.C.* A Universal Image Quality Index // *IEEE Signal Processing Letters*. 2002. Vol. 9. P. 81–84.

23. *Александрин А.И., Александина М.Г., Карнацкий А.Ю.* Автоматический расчет скоростей перемещений ледовых полей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 9–17.

24. *Александрин А.И., Александина М.Г., Карнацкий А.Ю.* Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 2. С. 131–142.

Calculation of thermodynamic parameters of ocean surface on satellite imagery

Marina Georgiyevna Alexanina, PhD, Senior Researcher, Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS

Sergey Evgenyevich Dyakov, Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS

Alexey Andreyevich Zagumennov, Engineer-Programmer, Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS

Technologies of monitoring of physical parameters of sea surface (temperature, currents velocities, synoptic eddies parameters) on satellite imagery are described. The main goal of research is to increase accuracy and reliability of calculations for operational monitoring of ocean hydrodynamic parameters. These technologies were developed and are used in Satellite Center of FEB RAS.

Keywords: meteorological satellites, sea surface temperature, ocean eddies, sea surface currents velocities.