

УДК 528.8

## РАСЧЕТ ПЕРЕПАДА УРОВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯМ

**Александина Марина Георгиевна,**

*канд. техн. наук, ст. научный сотрудник лаборатории спутникового мониторинга,  
e-mail: margo@mail.ru,*

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток,*

**Загумёнов Алексей Андреевич,**

*и.о. научного сотрудника лаборатории информационно-аналитических и управляющих систем  
и технологий,*

*e-mail: truepikvic@gmail.com,*

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток*

*Представлен подход к автоматическому вычислению перепада уровня поверхности моря по скоростям перемещения морских маркеров, рассчитываемых на основе спутниковых изображений в ИК (инфракрасном) диапазоне спектра. На спутниковых ИК-изображениях морской маркер (маркер поверхности моря) представляет собой яркостную неоднородность изображения, которая сохраняется в течение некоторого времени. Скорости перемещений морских маркеров рассчитываются на основе модифицированной функции сходства двух фрагментов изображений, разделенных определенным временным интервалом. Рассматривая рассчитываемые скорости перемещений морских маркеров как скорости течений можно, решая обратную задачу для синоптических вихрей, рассчитать перепад уровня поверхности на отдельном разрезе. Новизна и практическая значимость предлагаемого подхода состоит в том, что расчет перепада уровня поверхности по скоростям перемещений морских маркеров в инфракрасном диапазоне спектра позволит уточнять данные спутниковой альтиметрии, что повысит детальность и точность общей пространственной картины циркуляции на поверхности океана.*

**Ключевые слова:** спутниковая альтиметрия, уровень океана, геострофические течения, морской маркер, скорости течений, синоптический вихрь

## CALCULATION OF THE SEA LEVEL VARIATION USING SATELLITE IMAGERY SST

**Aleksanina M.G.,**

*candidate of technical sciences, senior scientific employee of laboratory of satellite monitoring,  
e-mail: margo@mail.ru,*

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

**Zagumënov A.A.,**

*scientific employee of laboratory of information-analytical and control systems and technologies,  
e-mail: truepikvic@gmail.com,*

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

*A novel approach for automatic calculation of sea level variation is proposed. It uses displacement velocities of sea markers obtained from infrared satellite imagery. Sea marker on satellite image is a brightness heterogeneity which remains during certain time interval. Sea markers displacement velocities are calculated on the base of modified function of similarity of two same fragments of satellite images for certain time interval. Considering sea markers displacement velocities as sea surface currents velocities and solving inverse problem it is possible to calculate sea level variations of synoptic eddies. The main advantage of the proposed approach is that calculation of sea level variation by displacement velocities of sea markers on satellite infrared imagery allows to precise data of satellite altimetry and to raise accuracy of calculated sea level.*

**Keywords:** satellite altimetry, sea levels, geostrophic currents, satellite image, sea marker, current velocities, synoptic eddy

DOI 10.21777/2500-2112-2020-3-98-104

## Введение

Уровенной поверхностью моря называется положение поверхности воды, свободное от влияния ветровых волн, зыби, прибоя и прочих кратковременных периодических возмущающих факторов, измеряемое от некоторого условного горизонта. При осреднении массовых измерений все короткопериодные и случайные возмущения уровенной поверхности исключаются, оставляя только высоты уровня, обусловленные постоянными долговременными факторами. Получаемая при такой процедуре топография поверхности воды, сформированная под воздействием динамических причин, получила название динамической топографии [9]. Динамическая топография океана (ДТО), является важным показателем состояния океана, поскольку горизонтальный градиент ДТО определяет поверхностную геострофическую циркуляцию. Градиент от вычисленных таким образом динамических высот (ДВ) позволяет определить геострофическую циркуляцию океана [6–8].

Традиционно для оценки динамической топографии Мирового океана используются данные спутниковых альтиметрических измерений и обширные массивы океанографических наблюдений. Спутниковая альтиметрия – это измерение высоты спутника относительно поверхности Земли по времени прохождения сигнала, посылаемого спутником и получаемого после отражения от поверхности [10–13].

Сопоставление скоростей поверхностных течений, построенных по спутниковой альтиметрии, со скоростями, рассчитанными по временной последовательности инфракрасных изображений, нередко обнаруживает наличие артефактов. Например, для юго-западной части Охотского моря наблюдается отсутствие стационарных течений, таких как, Соя, Ойясио, Восточно-Сахалинское [1].

Для получения оценок скоростей поверхностных течений по последовательности спутниковых изображений давно используется метод морских маркеров [14], доведенный до автоматического прослеживания морских маркеров (яркостных неоднородностей) и оценки их скоростей перемещений по спутниковым изображениям. На спутниковых инфракрасных (ИК) (тепловой диапазон спектра) изображениях морской маркер (маркер поверхности моря) представляет собой термическую неоднородность, которая сохраняется в течение некоторого временного интервала. Введение в алгоритм автоматического прослеживания морских маркеров априорной оценки точности для отбраковки вычисляемых скоростей и замена корреляционной функции функциональной мерой сходства двух фрагментов изображений позволили повысить надежность и точность оценок скорости перемещений морских маркеров [2].

Автоматически рассчитанные модифицированным методом скорости перемещений морских маркеров могут служить базой для расчета перепада уровенной поверхности (или динамических высот поверхности [9]) океана на основе решения обратной задачи. Эта возможность показана в данной работе посредством сравнения измерений спутниковой альтиметрии и рассчитанного перепада уровенной поверхности через скорости течений на синоптическом вихре.

### Теоретические предпосылки для расчета перепада динамических высот по скоростям течений

При установившемся движении трение поперек течения невелико, поэтому в первом приближении, особенно для поверхностных течений, по разности динамических высот в двух точках можно вычислить проекции скорости течения на направление, перпендикулярное линии соединения этих точек. Геострофическое течение направлено под углом  $90^\circ$  *cum sole* к направлению, в котором идет понижение динамических высот [7]. По градиентам динамической топографии рассчитываются скорости геострофических течений. Для вычисления составляющих скорости  $U$  и  $V$  геострофического течения на поверхности океана используется известная формула [6]:

$$U = -\frac{g}{2\omega \sin \varphi} \times \frac{\partial D}{\partial y}, \quad V = \frac{g}{2\omega \sin \varphi} \times \frac{\partial D}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $D$  – динамическая высота,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\omega$  – угловая скорость Земли,  $\varphi$  – широта местности.

Формула (1) не учитывает поправку на криволинейность движения потока, которая для синоптических вихрей в средних широтах относительно невелика (около 10 %).

С другой стороны, если известны скорости течений, можно оценить перепад динамической высоты на разрезе между точками А и В. При наличии регулярных и плотных по пространству векторов течения расчет перепада уровенной поверхности производится по формуле уравнения баланса сил в вихре [7]:

$$\Delta\eta = \frac{1}{g} \int_A^B (kV_t^2 + fV_t) \partial n, \quad (2)$$

где  $k$  – это кривизна (м-1);  $k = 1/R$ , где  $R$  – радиус кривизны (м);  $V_t$  – тангенциальная скорость (м/с);  $n$  – нормаль к скорости (м);  $g$  – ускорение силы тяжести (м/с<sup>2</sup>);  $\eta$  – динамическая топография (м); параметр Кориолиса  $f = 2\omega \sin\phi$ , где  $\omega$  – угловая скорость Земли;  $\phi$  – широта места.

Уравнение (2) показывает, что градиент давления, направленный перпендикулярно к линии тока, уравновешивается ускорением Кориолиса  $fV_t$  и центробежным ускорением  $kV_t^2 = V_t^2/R$ . Для того чтобы течение было близким к геострофическому, центробежное ускорение должно быть мало по сравнению с ускорением Кориолиса, т. е.  $kV_t^2/f \cong V_t/(fR) \ll 1$ .

Для синоптического вихря при таком условии может быть применен подход к вычислению перепада уровенной (динамической высоты) поверхности океана на основе автоматического расчета скоростей перемещений морских маркеров, скорости которых можно считать аналогом скоростей течений.

#### Используемые данные и методы для тестирования подхода

Для тестирования подхода были подобраны пары спутниковых инфракрасных изображений (ИК) синоптических вихрей северо-западной части Тихого океана за 2004–2006 годы, когда выполнялся проект по изучению течения Курошио – Kuroshio Extension System Study (KESS).

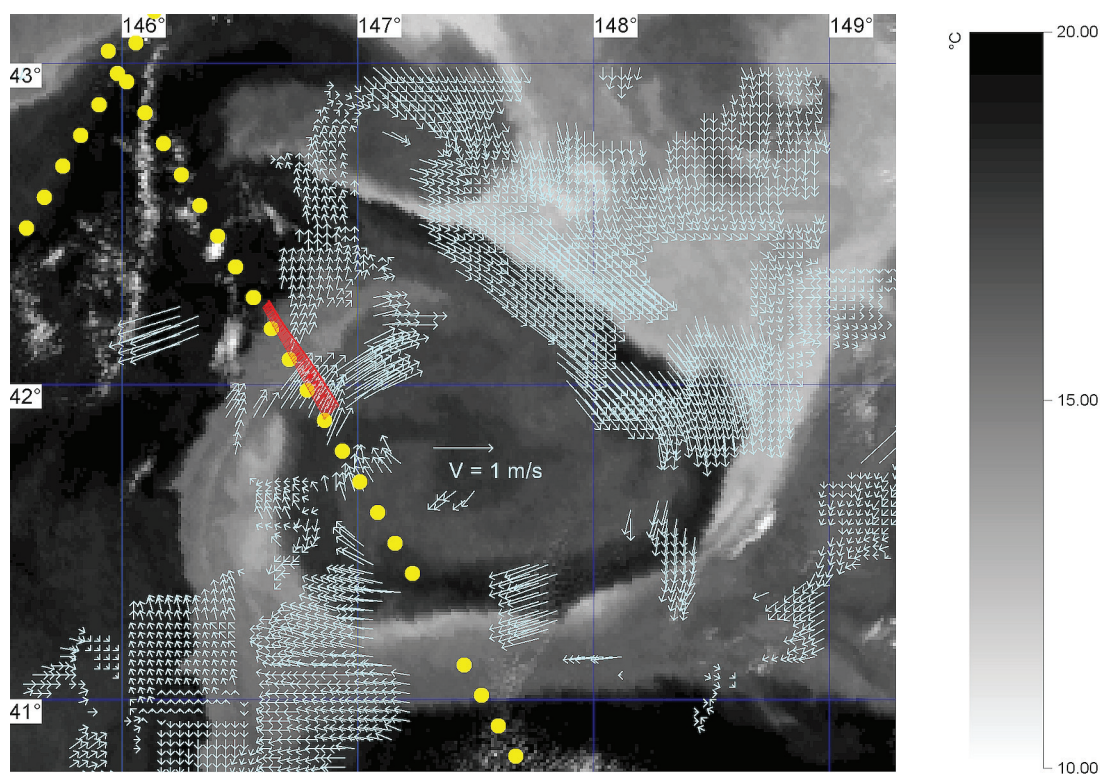


Рисунок 1 – Радиальный профиль тангенциальных составляющих (красным цветом) скоростей перемещений морских маркеров (голубым цветом) на отрезке поперек фронта синоптического вихря в северо-западной части Тихого океана за 29 сентября 2005 г., желтые точки – данные спутниковой альтиметрии на трассе за 30 сентября 2005 г.

Базовым предположением для оценки динамических характеристик струйных и вихревых структур на поверхности океана является предположение когерентности потока, т.е. идентичность профилей скорости на сечениях, перпендикулярных потоку [5]. Рассчитанные по инфракрасным спутниковым изображениям скорости течений распределены неравномерно по профилю, поэтому их необходимо аппроксимировать (рисунок 1). Для этого используется сглаживающая функция Гаусса. Весь промежуток аппроксимации делится на равные небольшие интервалы.

Расчет сглаженной скорости на интервале производится по формуле (3), в которой учитывается значение соответствующего вектора тангенциальной скорости:

$$\bar{V} = \sum_{r_i \in R} V_i \times \alpha_i, \quad (3)$$

где  $V_i$  – значение соответствующего вектора тангенциальной скорости (м/с);  $\alpha_i$  – нормированное значение весовой функции вектора в радиусе  $R$  (м):

$$\alpha_i = \frac{w(r_i)}{\sum_{r_h \in R} w(r_h)};$$

$w(r)$  – весовая функция:  $w(r) = e^{-kr^2}$ ;  $r_i$  – расстояние до  $i$ -ого вектора скорости.

Процесс автоматизации обработки данных состоял в построении стандартных меркаторских проекций изображений выбранного региона в инфракрасном (тепловом) диапазоне спектра, калибровке и атмосферной коррекции значений, уточнении географической привязки, что особенно важно для расчета скоростей перемещений морских маркеров (характерных яркостных неоднородностей изображения). Рассматриваемые как оценки скоростей течений, скорости перемещения морских маркеров строились модифицированным автоматическим методом [2]. Для оценки положения центров, размеров, формы вихрей использовалась специально разработанная система автоматического выделения и прослеживания синоптических вихрей океана [3]. Расчет перепада высоты урвненной поверхности океана по радиальному профилю тангенциальных компонент скоростей течения осуществлялся автоматически интегрированием на равномерной сетке по формуле средних прямоугольников:

$$\int V dx = \sum_{i=1}^n \bar{V}_i \times x,$$

где  $x$  – шаг сетки (м),  $n$  – количество интервалов.

Расчет перепада динамической топографии по профилю скоростей на интервале, не превышающем радиус вихря, производился на основе расчета радиуса вихря.

### Полученные результаты

Перепад урвненной поверхности, рассчитанный по скоростям перемещений морских маркеров для 20 разных (по положению и времени) разрезах синоптических вихрей, сравнивался с перепадом по данным спутниковой альтиметрии сервиса AVISO, который в настоящее время заменен сервисом Copernicus ([https://www.resources.marine.copernicus.eu/?option=com\\_csw&task=results](https://www.resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&task=results)).

Сравнение перепада урвненной поверхности, рассчитанного по скоростям перемещений морских маркеров, с данными спутниковой альтиметрии (AVISO) показало хорошее соответствие, невязка предлагаемого подхода с данными спутниковой альтиметрии составляет около 5 см, что сопоставимо с точностью альтиметрии, относительная ошибка при перепаде в 0,5 метра около 15 % [4]. Рисунок 2 показывает хорошее соответствие значений перепадов, полученных разными подходами, что подтверждается и уравнением регрессии  $y = 1,1001x + 0,0068$ ,  $R^2 = 0,9524$ . Невязка значений перепадов рассчитанных по скоростям перемещений морских маркеров с перепадами по данным спутниковой альтиметрии показало стабильное падение на больших значениях перепадов по спутниковой альтиметрии (рисунок 3).

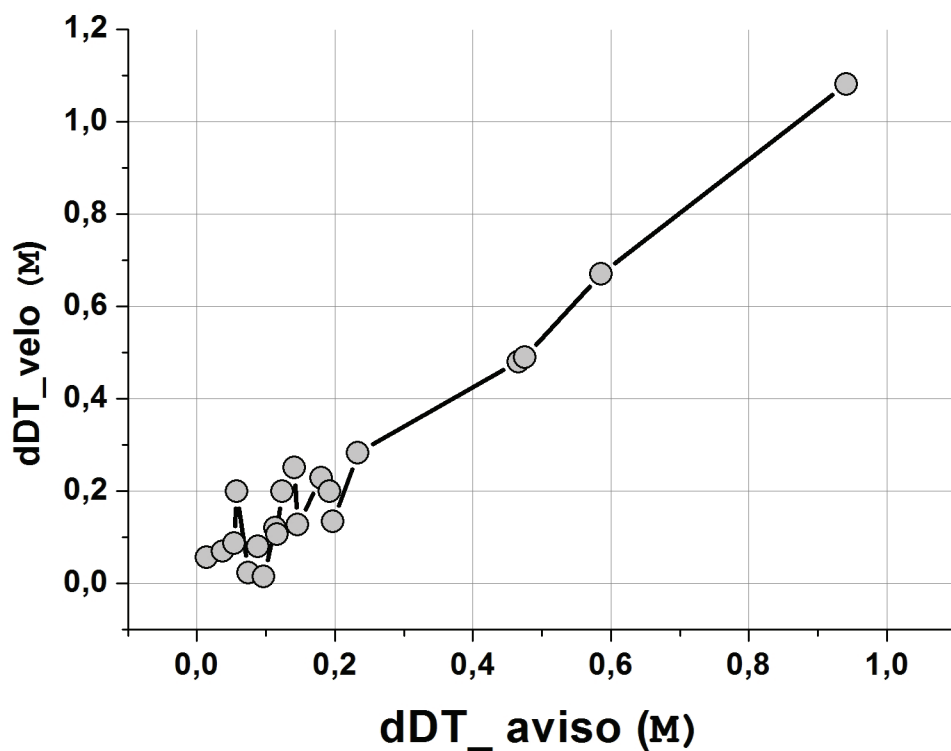


Рисунок 2 – Перепад уровенной поверхности, рассчитанной по скоростям перемещений dDT\_Vel, в сравнении с соответствующим перепадом по данным AVISO – dDT\_aviso

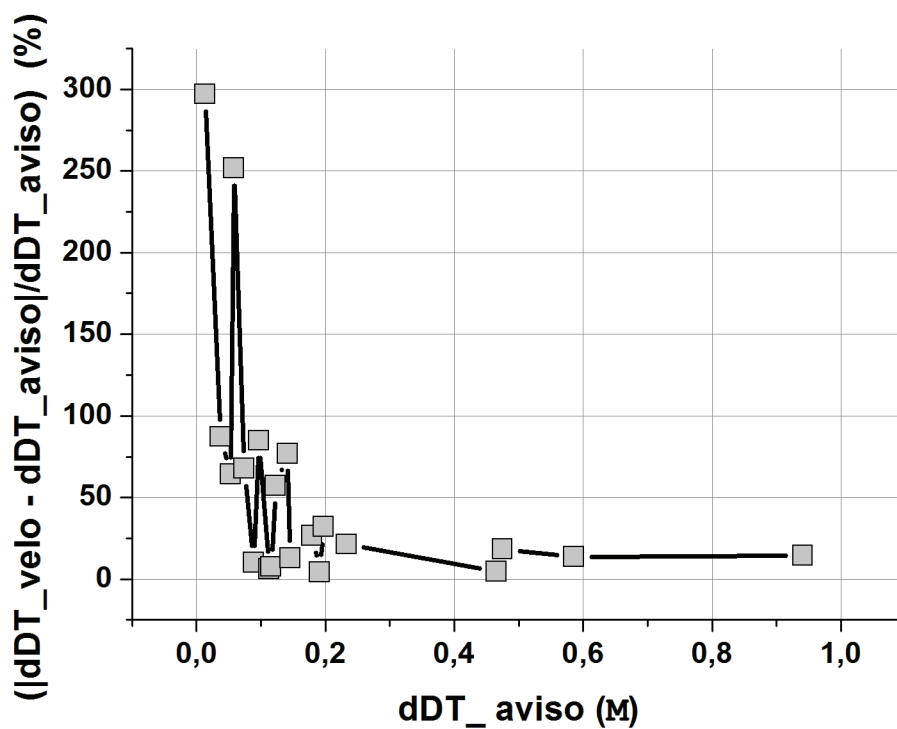


Рисунок 3 – Невязка перепада уровенной поверхности, рассчитанного по скоростям перемещений – dDT\_Vel, с соответствующим перепадом по данным AVISO – dDT\_aviso относительно его величины

Однако встречаются отклонения, достигающие 15 см и более. Анализ показал, что такое происходит в местах, где на масштабах в несколько десятков километров течение испытывает значительную изменчивость. Такое расхождение можно объяснить недостаточной плотностью измерений спутниковых альтиметров по пространству и времени, что не обеспечивает возможность в настоящее время восстанавливать детальную картину течений по данным спутниковой альтиметрии.

### Заключение

Для линейного разреза синоптического вихря показана возможность расчета перепада уровенной поверхности по скоростям перемещений морских маркеров (температурных неоднородностей на инфракрасных спутниковых изображениях), рассматриваемых как оценки скоростей течений [2]. Представленный подход может быть интересен тем, что в комбинации с данными спутниковой альтиметрии позволит взаимно дополнять и верифицировать данные, полученных разными способами в случае пропусков той или иной съемки или ее отсутствия. Комбинация данных спутниковой альтиметрии со скоростями перемещений морских маркеров на основе обратных пересчетов может решить задачу полного восстановления уровенной поверхности на основе использования малопараметрических аналитических моделей восполнения течений, описывающих структуру течений конкретных синоптических объектов (вихрей и фронтальных течений), и учитывающих существующие закономерности изменения скорости течения поперек его направления.

*При выполнении работы использовались информационные ресурсы Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.*

### Список литературы

1. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Загумённых А.А. Построение уровенной поверхности моря по данным альтиметрических измерений и полям термических структур // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2007. – Т. 1. – С. 247–253.
2. Алексанин А.И., Алексанина 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.
3. Алексанин А.И., Загумённых А.А. Проблемы автоматического обнаружения вихрей океана по спутниковым ИК-изображениям // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 3. – С. 65–74.
4. Алексанина М.Г., Загумённых А.А., Легошко О.А. Сравнение подходов к определению перепада уровенной поверхности океана по спутниковым данным // Физика геосфер: XI Всероссийский симпозиум: материалы докладов (г. Владивосток, 9–14 сентября 2019 г.). – Владивосток, 2019. – С. 20, 21.
5. Белкин И.М., Грачёв Ю.М., Михайличенко Ю.Г. Структура, кинематика и синоптическая изменчивость фронтальной зоны северо-западной части Тихого океана в районе 160° в.д. // Моделирование гидрофизических полей и процессов в океане. – М.: Наука, 1986. – С. 170–200.
6. Бурков В.А. Общая циркуляция Мирового океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 253 с.
7. Гарвей Д. Атмосфера и океан: наша жидкая окружающая среда. – М.: Прогресс, 1982. – 184 с.
8. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 396 с.
9. Деев М. Г. Уровень как индикатор изменений состояния Мирового океана [Электронный ресурс] // География. – 2010. – № 6. – URL: [http://www.geo.1september.ru/view\\_article.php?ID=201000604](http://www.geo.1september.ru/view_article.php?ID=201000604) (дата обращения: 25.09.2020).
10. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2006. – 382 с.
11. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. – М.: ИЦ «Море» Международного института океана, 2005. – 366 с.
12. Пустовойтенко В.В., Запелов А.С. Оперативная океанография: современное состояние, перспективы и проблемы спутниковой альтиметрии. – Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2012. – 218 с.

13. Романов А.А. Геоинформационные технологии и интерактивная компьютерная обработка изображений в задачах дистанционного зондирования океана. – М.: Московский физико-технический институт, 1999. – 232 с.
14. 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.

### References

1. Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., Zagumyonnov A.A. Postroenie urovennoj poverhnosti morya po dannym al'timetricheskikh izmerenij i polyam termicheskikh struktur // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa. – 2007. – Т. 1. – С. 247–253.
2. Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., Karnackij A.Yu. Avtomaticheskij raschet skorostej poverhnostnyh techenij okeana po posledovatel'nosti sputnikovyx izobrazhenij // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa. – 2013. – Т. 10, № 2. – С. 131–142.
3. Aleksanin A.I., Zagumyonnov A.A. Problemy avtomaticheskogo obnaruzheniya vihrej okeana po sputnikovym IK-izobrazheniyam // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2011. – № 3. – С. 65–74.
4. Aleksanina M.G., Zagumyonnov A.A., Levoshko O.A. Sravnenie podhodov k opredeleniyu perepada urovennoj poverhnosti okeana po sputnikovym dannym // Fizika geosfer: XI Vserossijskij simpozium: materialy dokladov (g. Vladivostok, 9–14 sentyabrya 2019 g.). – Vladivostok, 2019. – С. 20, 21.
5. Belkin I.M., Grachyov Yu.M., Mihajlichenko Yu.G. Struktura, kinematika i sinopticheskaya izmenchivost' frontal'noj zony severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana v rajone 160° v.d. // Modelirovanie gidrofizicheskikh polej i processov v okeane. – М.: Nauka, 1986. – С. 170–200.
6. Burkov V.A. Obshchaya cirkulyaciya Mirovogo okeana. – L.: Gidrometeoizdat, 1980. – 253 s.
7. Garvej D. Atmosfera i okean: nasha zhidkaya okruzhayushchaya sreda. – М.: Progress, 1982. – 184 s.
8. Gill A. Dinamika atmosfery i okeana. – М.: Mir, 1986. – Т. 1. – 396 s.
9. Deev M. G. Uroven' kak indikator izmenenij sostoyaniya Mirovogo okeana [Elektronnyj resurs] // Geografiya. – 2010. – № 6. – URL: [http://www.geo.1september.ru/view\\_article.php?ID=201000604](http://www.geo.1september.ru/view_article.php?ID=201000604) (data obrashcheniya: 25.09.2020).
10. Korotaev G.K., Ereemeev V.N. Vvedenie v operativnuyu okeanografiyu Chernogo morya. – Sevastopol': NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2006. – 382 s.
11. Lebedev S.A., Kostyanov A.G. Sputnikovaya al'timetriya Kaspijskogo morya. – М.: IC «More» Mezhdunarodnogo instituta okeana, 2005. – 366 s.
12. Pustovojtenko V.V., Zapevalov A.S. Operativnaya okeanografiya: sovremennoe sostoyanie, perspektivy i problemy sputnikovoj al'timetrii. – Sevastopol': Morskoj gidrofizicheskij institut NAN Ukrainy, 2012. – 218 s.
13. Romanov A.A. Geoinformacionnye tekhnologii i interaktivnaya komp'yuternaya obrabotka izobrazhenij v zadachah distancionnogo zondirovaniya okeana. – М.: Moskovskij fiziko-tekhnicheskij institut, 1999. – 232 s.
14. 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.