

# РАСЧЁТ ЦИРКУЛЯЦИИ ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ROM

**П.О. Харламов<sup>1,2</sup>, И.С. Олейников<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ДВНИГМИ, г. Владивосток, [oleynikov@ferhri.ru](mailto:oleynikov@ferhri.ru)

<sup>2</sup> ТОИ ДВО РАН, г. Владивосток, [pkharlamov@poi.dvo.ru](mailto:pkharlamov@poi.dvo.ru)

Берега Японского моря являются самыми заселенными на Дальнем востоке России. центром сосредоточения людей здесь является залив Петра Великого (далее ЗПВ), на берегах которого находятся практически все крупные города Приморского края: Владивосток, Находка, Большой камень и т. д. Важной задачей с точки зрения инфраструктуры является изучение процессов, происходящих как в заливе, так и в окружающем его Японском море. Поскольку циркуляция залива формируется на масштабах больших самого залива и включает не только внутренние, но и внешние процессы, то большое влияние на течения в ЗПВ оказывают внешние факторы: Приморское течение, Восточно-Корейское течение, свал глубин на границе залива и т. п.

Поэтому для построения правильной и корректной схемы циркуляции в этой важной с экономической точки зрения акватории необходимо использовать максимально точную модель внешней акватории с циркуляцией, близкой к замкнутой — Японского моря. Поскольку Японское море имеет всего три контактирующих с океаном пролива: Цусимский, Сангарский и Лаперуза (пролив Невельского, контактирующий с Охотским морем через Амурский лиман можно не учитывать из-за небольшой площади поперечного сечения и небольших объемов перетекающих вод), то границы региона моделирования естественным путем определяются по проливам. Сформированная таким образом модельная сетка представлена на рисунке 1.

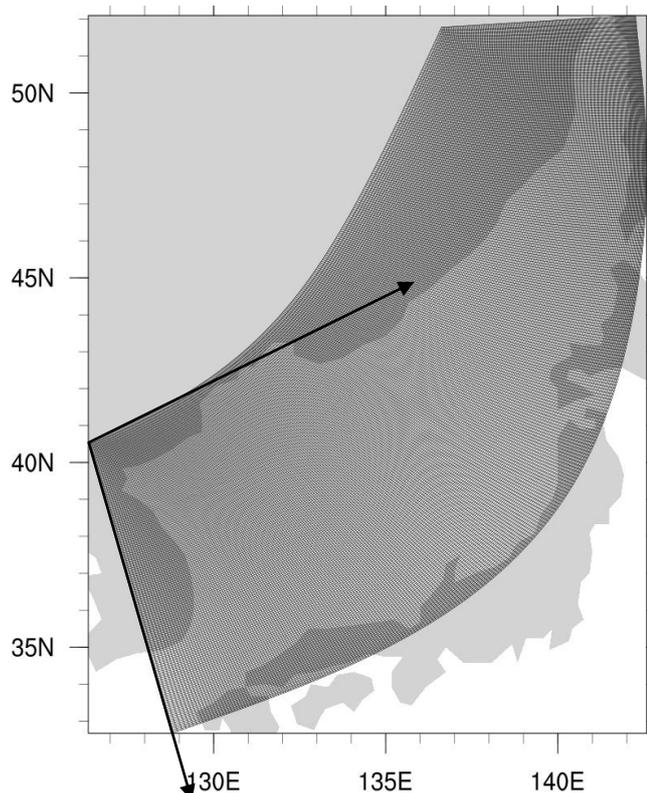


Рисунок 1. Криволинейная сетка модели.

Самый большой из проливов, — Цусимский, — обеспечивает поступление теплых вод течения Куро시오 и формирует Восточно-Корейское течение. Сангарский пролив и пролив Лаперуза в сформированной численной модели выполняют функцию «стока». При этом распределение расходов по месяцам [4,7] сильно отличается от равномерного, как показано на рисунке 2.

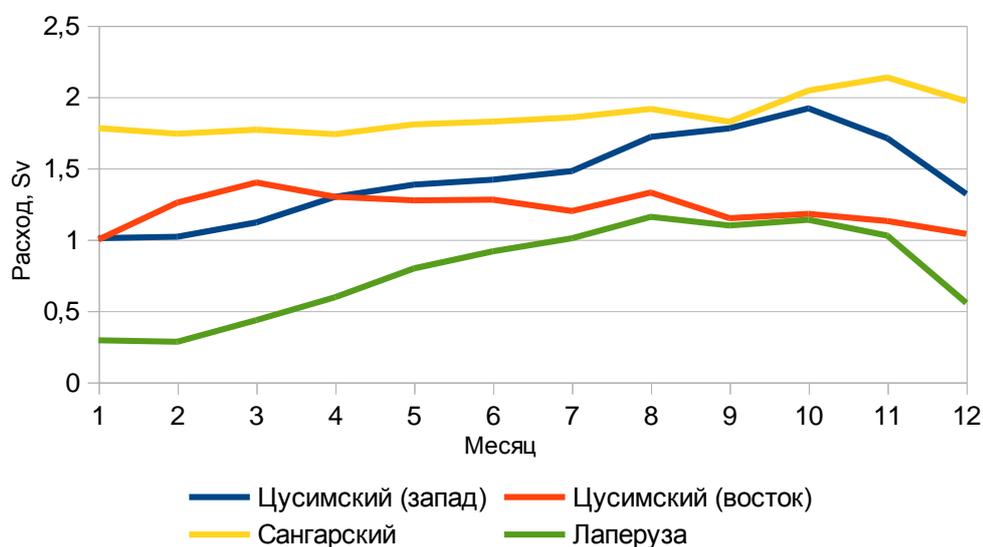


Рисунок 2. Оценка годового хода среднего расхода через проливы Японского моря.

Цусимский пролив разделен на восточную и западную часть островом Цусима.

Таблица 1. Среднегодовой расход воды в проливах Японского моря. Положительный расход – поступление воды в акваторию, отрицательный – отток вод через пролив.

Пролив	Модельная площадь пролива, км <sup>2</sup>	Расход воды, Sv	Средняя скорость, см/с
Цусимский	11,9	+2,6	22
Сангарский	8,04	-1,56	19
Лаперуза	2,34	-1,04	44

Также важно рассмотреть, помимо вычислительной погрешности самой численной схемы, погрешности, вносимые в расчет в начальных и граничных условиях. Однако с данным типом погрешностей можно бороться только путём усвоения данных наблюдений, первым шагом к которому является определение чувствительности модели к изменению магнитуды граничных условий. Для определения погрешностей был проведён ряд численных экспериментов, продемонстрировавших поведение модели при варьировании: скорости течений на границах, скорости ветра у поверхности и потока исходящего тепла через поверхность океана (рисунок 3).

### Аномалия расхода в Цусимском проливе при изменении длинноволновой радиации

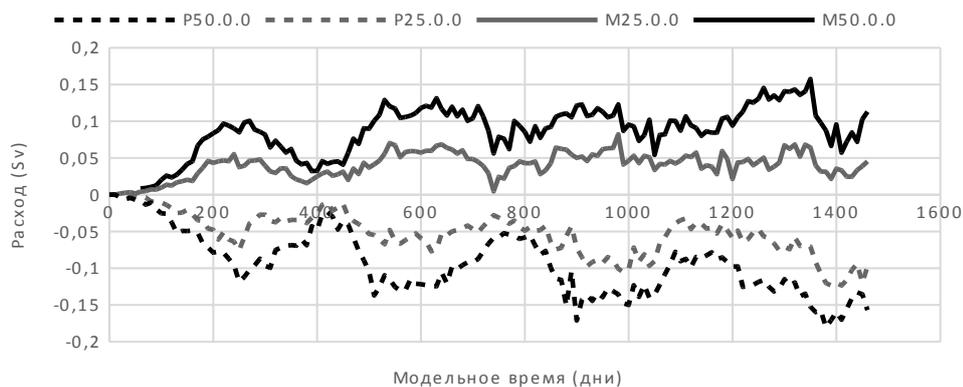


Рисунок 3. Изменение отклонения расхода (Sv) в Цусимском проливе от эталонного эксперимента при изменении потока исходящей длинноволновой радиации: P50 — увеличение на 50%, P25 — увеличение на 25%, M25 — уменьшение на 25%, M50 — уменьшение на 50%.

В результате экспериментов на чувствительность было выявлено рассогласование состояния модели и подаваемых потоков тепла при интегрировании на длительные сроки, более 1 года, которое проявлялось в интенсивном перегреве глубинных вод. Для устранения данного эффекта в модель добавлены алгоритмы расчёта потоков тепла [1,2,6,10], учитывающие температуру поверхностного слоя модели. Также в ходе разработки модели циркуляции Японского моря на основе Принстонской модели океана (ПОМ) [3] проведено множество экспериментов, выявивших различные аспекты и особенности, которые необходимо учитывать при моделировании данного региона.

В частности, использование мирового атласа океана в версии от 2013 г. в качестве начальных условий приводит к образованию неестественных, и притом довольно устойчивых структурных образований, проявляющихся в изменении уровня и схемы течений отдельных областей. Поэтому в качестве граничных условий для модели Японского моря нами были использованы данные реанализа FORA-WNP30 [12], предоставленные институтом JAMSTEC.

Использувавшаяся ранее в моделях и технологиях ДВНИГМИ минутная батиметрия ЕТОРО2 [11] имеет явные артефакты склейки различных регионов, которые проходят прямо по Японскому морю. Однако, батиметрия GEBCO [8] с пространственным разрешением 30" обладает такими эффектами в гораздо меньшей степени. В то же время даже в GEBCO присутствуют отдельные ошибки и артефакты, как например, в бухте Киевка наблюдаются глубины до 90 метров там, где, по другим источникам они не превышают 10 м. Данные ошибки в GEBCO не принципиальны при моделировании в масштабах всего моря, однако будут оказывать большое влияние в будущем, при переходе к масштабам заливов и отдельных бухт. К тому же при создании батиметрии для модельного региона была произведена «интерполяция»

рельефа дна в модельную сетку с «сохранением значения», т. е. глубины усреднялись по площади каждой модельной ячейки.

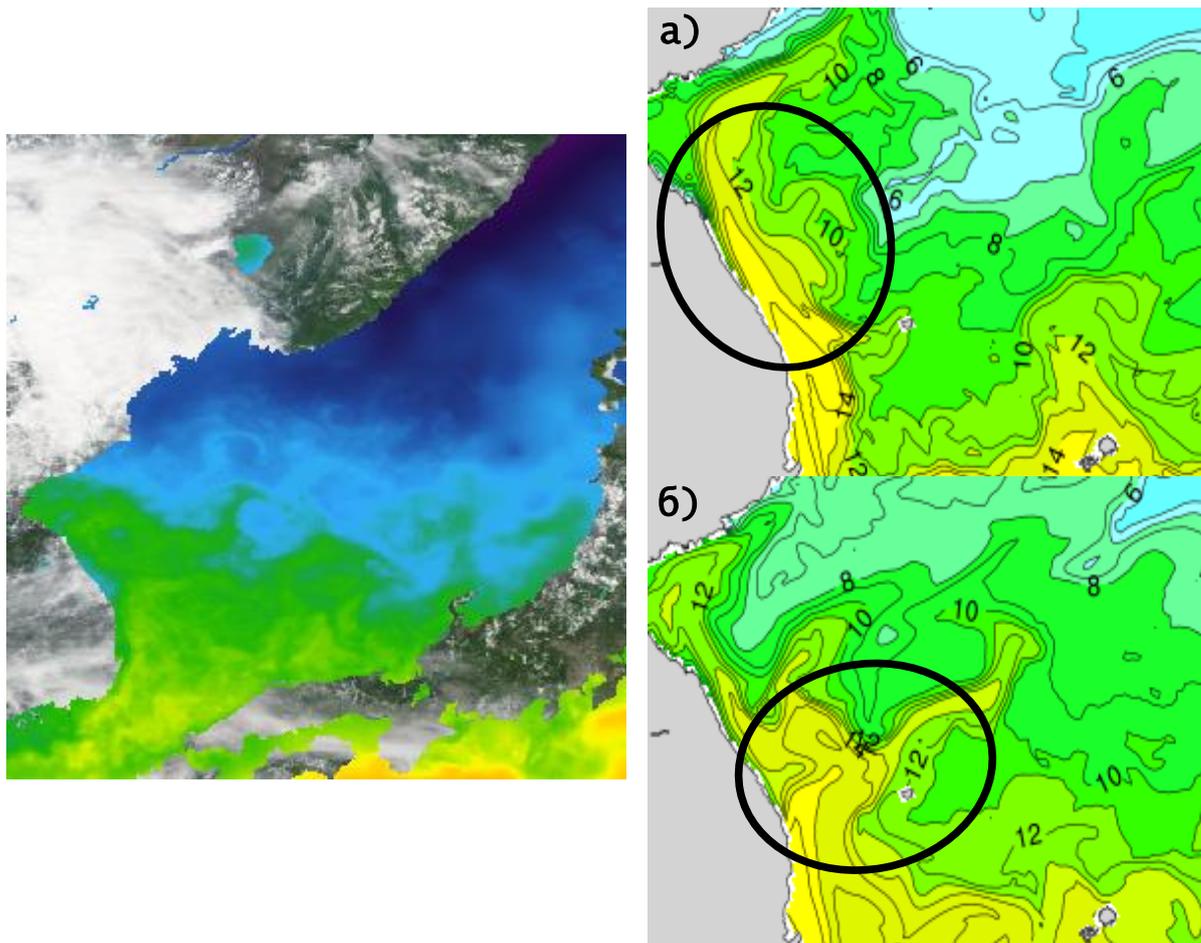


Рисунок 4. Сравнение различных модельных схем Восточно-корейского течения (справа) с данными о температуре поверхности океана GHRSSST (слева) за 4 июня 2012 г. (а — старт с 1 января 2012 г.; б — старт с 1 апреля 2012 г.)

В процессе моделирования были установлены две устойчивые схемы циркуляции, зависящие от начальных условий работы модели: старт моделирования с 1 января («январская» циркуляция) и старт с 1 апреля («апрельская» циркуляция). На рисунке 4 продемонстрировано сравнение температуры вод поверхностного слоя модели обеих схем с данными спутникового зондирования. Хорошо видно, что на 4 июня 2012 года актуальной можно считать «апрельскую» схему циркуляции, с отрывом восточно-корейского течения около  $36^{\circ}$ - $38^{\circ}$  с.ш. Для разных лет моделирования актуальной может являться и «январская» схема. Также в динамике проявляется тенденция к «потеплению» глубинных вод как в модели, так и в реальности. В работе [9] прослеживается тренд повышения температуры на глубинах более 500 метров в регионе отрыва восточно-корейского течения и на глубинах более 200 метров в регионе ЗПВ. В работе [13] это повышение связывают либо с антропогенным воздействием, либо с недостаточным количеством наблюдений, однако полученная в ходе работы модель воспроизводит повышение температуры глубинных вод и при этом не учитывает антропогенное воздействие.

Во многом такое поведение модели можно считать результатом граничных условий, в частности потоков тепла, на поверхности и высокого градиента давления в прибрежной области

моделирования. Для изучения данного вопроса было произведено моделирование с использованием в качестве граничных условий на свободной поверхности реанализа ERA-Interim [5], вместо ранее используемого NCEP-Reanalysis 2. Результат эксперимента представлен на рисунке 5. Из рисунка видно, что данные ERA-Interim позволяют воспроизводить «отрыв» Восточно-Корейского течения точнее, чем данные реанализа NCEP, при этом устойчивой становится схема «апрельской» циркуляции, даже при старте с 1 января. Исходя из этого можно сказать что во многом схема циркуляции Японского моря, воспроизводимая моделью, зависит от точности данных атмосферного воздействия. Предпочтительно использование данных ERA-Interim, которые для региона моделирования показали лучшие результаты из-за более высокого пространственного разрешения.

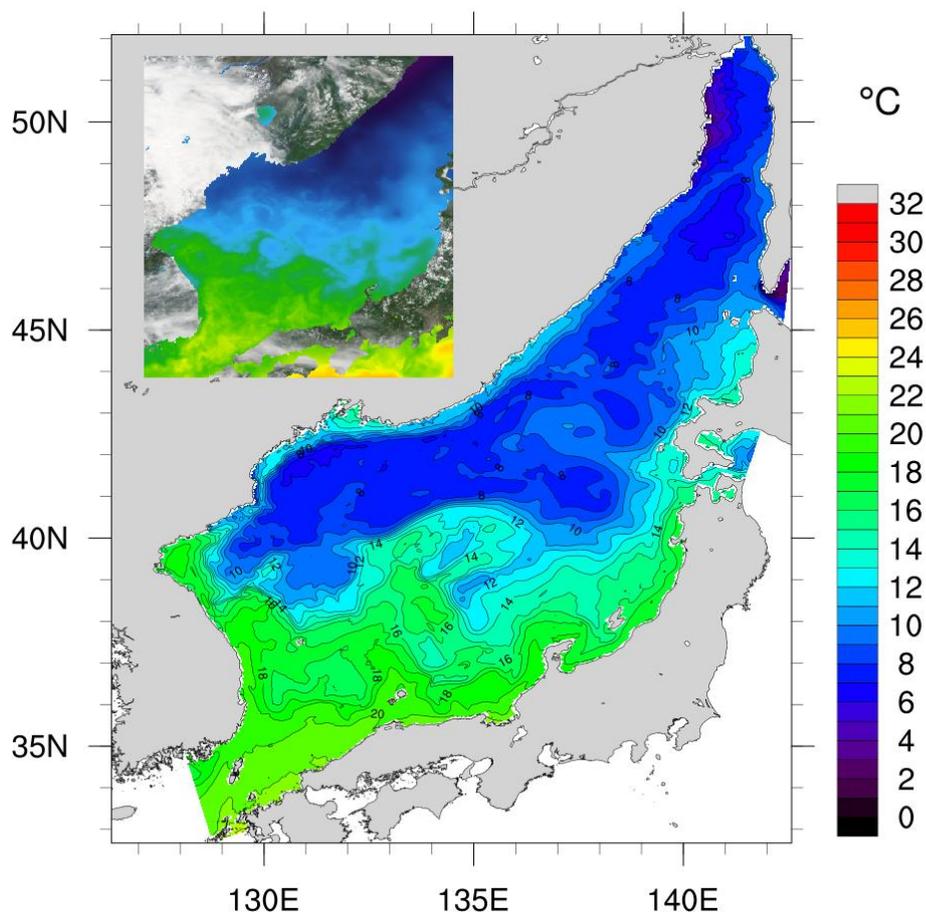


Рисунок 5. Температура поверхностного слоя модели на 4 июня 2012 г. по данным эксперимента с использованием атмосферного реанализа ERA-Interim.

Результатом моделирования является настроенная на регион Японского моря модель РОМ, воспроизводящая основные движения Восточно-Корейского и Приморского течений, которые являются наиболее критичными для граничных условий региона ЗПВ. Модель успешно воспроизводит генеральную циркуляцию Японского моря и способна устойчиво поддерживать циркуляционную схему на период более года. Использование данной модели целесообразно в качестве граничного условия для малых вложенных регионов Японского моря масштаба бухт и заливов, в том числе и залива Петра Великого.

## Литература

1. Berliand M. E. Determining the net long-wave radiation of the Earth with consideration of the effect of cloudiness // *Izv. Akad. Nauk. SSSR Ser. Geofiz.* – 1952. – Т. 1. – С. 64-78.
2. Bignami F. et al. Longwave radiation budget in the Mediterranean Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 1995. – Т. 100. – №. C2. – С. 2501-2514.
3. Blumberg A. F., Mellor G. L. A description of a three- dimensional coastal ocean circulation model // *Three-dimensional coastal ocean models.* – 1987. – С. 1-16.
4. Chang K. I. et al. (ed.). *Oceanography of the East Sea (Japan Sea).* – Springer International Publishing, 2016. – С. 45-50.
5. Dee D. P. et al. The ERA- Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the royal meteorological society.* – 2011. – Т. 137. – №. 656. – С. 553-597.
6. Fairall C. W. et al. Bulk parameterization of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // *Journal of climate.* – 2003. – Т. 16. – №. 4. – С. 571-591.
7. Fukudome K. I. et al. Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations // *Journal of oceanography.* – 2010. – Т. 66. – №. 4. – С. 539-551.
8. Ioc I. BODC, 2003. Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans // *British Oceanographic Data Centre, Liverpool, UK.* – 2008. – Т. 260.
9. Luchin V. et al. Climatic Atlas of the North Pacific Seas 2009: Bering Sea, Sea of Okhotsk, and Sea of Japan/V. Akulichev, Yu. Volkov, V. Sapozhnikov, S. Levitus (eds): NOAA Atlas NESDIS 67 // *Wash. DC: US Gov. Printing Office.* – 2009.
10. May P. W. A brief explanation of Mediterranean heat and momentum flux calculations // *NORDA code.* – 1986. – Т. 322. – №. 1.
11. National Geophysical Data Center. 2-minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2) v2. – 2006.
12. Usui N. et al. Four-dimensional variational ocean reanalysis: a 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30) // *Journal of Oceanography.* – 2017. – Т. 73. – №. 2. – С. 205-233.
13. Лучин В.А., Кислова С.И., Круц А.А. Тенденции долгопериодных изменений в водах залива Петра Великого // *Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. Владивосток: Дальнаука, 2007. С. 33-50.*