



Г.М. Михайлов, К.П. Беляев,
Н.П. Тучкова, А.Н. Сальников

**Ансамблевые эксперименты по
усвоению данных наблюдений
уровня океана в модель MPI-ESM**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Михайлов Г.М., Беляев К.П., Тучкова Н.П., Сальников А.Н. Ансамблевые эксперименты по усвоению данных наблюдений уровня океана в модель MPI-ESM // Научный сервис в сети Интернет: труды XVIII Всероссийской научной конференции (19-24 сентября 2016 г., г. Новороссийск). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2016. — С. 259-263. — doi:[10.20948/abrau-2016-7](https://doi.org/10.20948/abrau-2016-7)

Размещена также [презентация к докладу](#)

Ансамблевые эксперименты по усвоению данных наблюдений уровня океана в модель MPI-ESM

Г.М. Михайлов¹, К.П. Беляев^{1,2}, Н.П. Тучкова¹, А.Н. Сальников^{1,3}

¹Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

³ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова

Аннотация. Представлены некоторые результаты ансамблевых экспериментов с усвоением данных уровня океана по методу фильтров Калмана (EnKF). В численных экспериментах задавались начальные климатические поля температуры и солёности океана, соответствующие условному 1850 г., затем проводился расчет с заданными внешними условиями из климатического атласа NCER в течение модельных 150 лет до установления полей скоростей течений для океанской части модели. Результаты анализировались в Арктической зоне Российской Федерации.

Ключевые слова: методы усвоения данных, ансамблевые эксперименты, модель MPI-ESM, алгоритма усвоения по методу EnKF

1. Введение

К задачам усвоения данных относятся задача инициализации и задача коррекции. В первом случае (инициализация) ищется новое начальное поле (начальные условия для заданной системы уравнений), стартуя с которого траектория решения этой системы уравнений наилучшим образом согласуется с данными наблюдений. Во втором случае (коррекция), уже построенное на данный момент времени решение *корректируется* с помощью данных наблюдений, а именно, это решение меняется с сохранением балансовых соотношений, задаваемых данной системой уравнений.

Рассматривается схема (В.2), при которой фазовые состояния модели X_n , начиная с заданного поля X_0 , обновляются последовательно как

$$\begin{aligned} X_n &= F(X_{n-1}) \\ X_{n+1} &= X_n + K(Y_n - HX_n), \end{aligned} \tag{1}$$

где $X_n, n=1,3,5\dots$ состояние модели в дискретный момент времени n , $X_n \in R^r$, $X_n = (x_n^1, \dots, x_n^r)$. Например, состояние океанской модели $X_n = (x_n^1, \dots, x_n^r)$ может состоять из температуры, солёности, компонент скорости течений и других характеристик. Для определенности, этот вектор будет рассматриваться в произвольной точке сеточной области пространства. Далее $F: R^r \mapsto R^r$ -

векторная функция, вообще говоря, нелинейная. Обозначение $Y \in R^{N_{obs}}$ будет использовано для *вектора наблюдений* длины N_{obs} , причем в длину вектора входят число наблюдений и их размерность. Например, если рассматривается океанская модель, то наблюдаемыми значениями может быть температура, соленость, уровень и некоторые другие параметры, причем наблюдаться эти значения могут как в одних и тех же, так и в разных пространственных точках. Наоборот, практически никогда не наблюдается вектор скорости, толщина слоя одинаковой плотности, слой заданного теплосодержания и тому подобные величины. Матрица K — *весовая матрица Калмана (Kalman gain matrix)* имеет $r \times N_{obs}$ — размерность. Соответствующий этой матрице линейный оператор переводит вектор из наблюдаемого пространства в фазовое пространство модели. В выражении (1) матрица H имеет размерность $N_{obs} \times r$ и производит обратную матрице K операцию. При этом в обычном линейном смысле матрицы K и H , вообще говоря, необратимы, они не являются квадратными и их ранги могут быть меньше их размерности.

Схема (1.1) может рассматриваться как стохастический процесс, зависящий от n . Наблюдаемый вектор Y_n предполагается случайным на каждом шаге по времени n с заданным распределением. Тогда возникает задача определить распределение случайного процесса X_{n+1} как маргинального при заданном n , так и совместного при заданной последовательности времен n_1, \dots, n_k . В общем случае эта задача не решена, только при линейной функции $F(X)$, т.е. ΛX , где Λ — $r \times r$ матрица, возможно получить моменты процесса X_n .

Как видно из (1.1) процесс X_n представляет собой *цепь Маркова* или в *общем случае процесс Маркова* и поэтому здесь применимы стандартные теоремы сходимости к предельным распределениям при $n \rightarrow \infty$. Тем не менее, условия сходимости должны быть проверены и доказаны для каждого конкретного выбора функции F , матриц K и H и внешних векторов Y_n .

Наряду с общей цепью $X_n, n = 1, 2, \dots$ рассматривается также вложенная цепь $X_{2k-1}, X_{2k}, k = 1, 2, \dots$. Далее, изучается вторая часть переходных процессов в (1.1), а именно $X_{2k} = X_{2k-1} + K(Y_{2k} - HX_{2k-1})$. Здесь может быть использована любая функция $F(X)$, поскольку данная формула имеет дело только с результатом моделирования. Другими словами, если вектор X_{2k-1} уже сформирован, по данной схеме строится ассимиляция с использованием вектора наблюдений и готового вектора X_{2k-1} .

Цель данной работы заключается в реализации авторского алгоритма усвоения и сравнения его с известным алгоритмом EnKF [1] (Ensemble Kalman Filter) в совместной модели океан-земля-атмосфера MPI-ESM (Earth system model of Max Planck Institute for Meteorology) института метеорологии имени Макса Планка (Гамбург, Германия), а также анализ результатов применения этих методов и сравнения расчетов с контрольным расчетом модели, т.е. без

усвоения. В частности, в работе показано, что авторский алгоритм является более общим и что алгоритм EnKF следует из него при специальном выборе параметров.

Для организации экспериментов использовались авторские разработки для блока усвоения данных наблюдений для совместной модели MPI_ESM [2,3]. Особое внимание было уделено Арктическому бассейну Российской Федерации.

В работе усваивались данные уровня из архива AVISO (Archiving, Validating and Interpolating Satellite Ocean Data) по всему Мировому Океану. Расчет проводился в течение 15 лет с 2000 г. по 2016 г., при этом данные усваивались каждые 3 месяца с начала 2010 г. по конец 2011 г.

2. Реализация усвоения для Арктического региона

Были проанализированы потоки входных и выходных данных в совместной модели MPI-ESM и выбраны характеристики в заданной расчетной области Арктической зоны. В качестве важных характеристик Арктической зоны рассматривались характеристики ледового покрытия: толщина льда и его концентрация (компактность).

На рис. 1 и 2 показаны характеристики толщины льда в Арктическом регионе. На рис.1 показана разница между контролем и анализом, т.е. расчетом без усвоения и расчетом после усвоения на середину 2011 г.

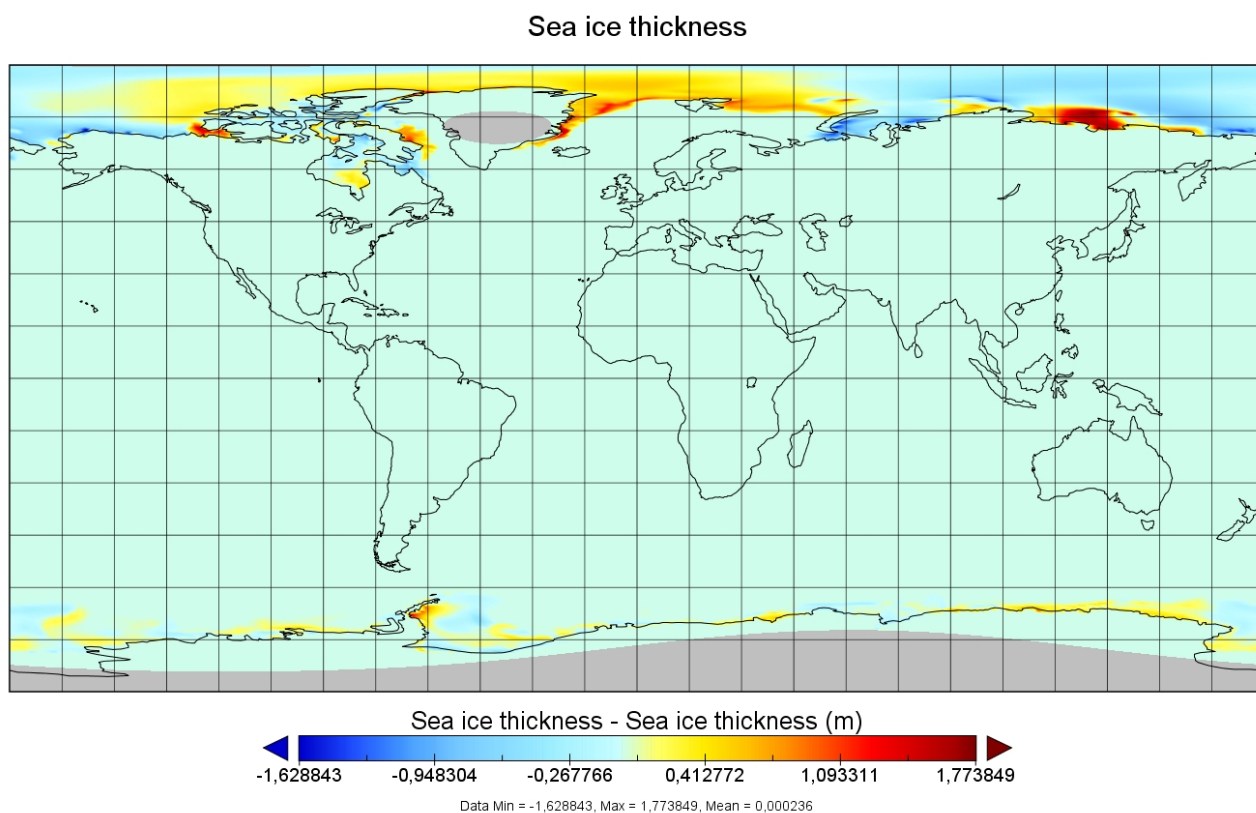


Рис. 1. Разница толщины ледового покрытия (модель-усвоение), 30.06.2011

Из рис. 1 видно, что толщина льда после усвоения заметно уменьшается практически во всем Арктическом бассейне, включая Арктический регион РФ за исключением сравнительно узкой области к северу от Канады. Эти результаты подтверждаются независимыми наблюдениями. Например, в районе Карского моря наблюдаемые значения концентрации льда составляют 70-80%, по данным Канадского института Арктики, в то время как модельные расчеты после усвоения данных в том же районе составляют около 0.7 усл. ед. (около 70%).

Разница толщины льда при расчетах после усвоения в Арктической зоне свидетельствует об увеличении температуры в Арктическом бассейне, что соответствует природным тенденциям.

На рис.2 заметна существенная разница временного хода средней толщины льда контрольного расчета и результатов при усвоении с интервалом 3 месяца. Видно, что модель демонстрирует "переоценку" в прогнозе на период 2010-2011 гг. при сохранении общей тенденции, соответствующей наблюдениям.

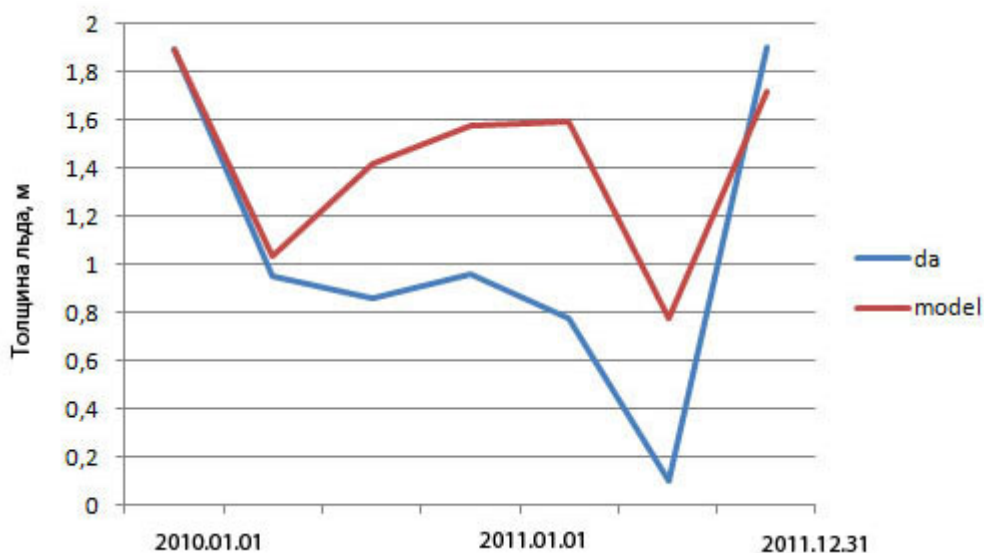


Рис. 2. Изменение средней толщины Арктического льда в период 2010-2011 гг.: модель - красная линия, усвоение каждые 3 месяца - синяя линия

3. Результаты работы и выводы

Проведенные численные эксперименты позволяют сделать вывод, что модельные климатические поля после усвоения данных наблюдений соответствуют природным тенденциям. В дальнейших исследованиях предполагается использовать большее количество данных наблюдений и сравнение результатов на основе их усвоения для различных методов и стратегий усвоения.

Расчетные данные надповерхностного ветра и скоростей течения в выделенной области Арктической зоны подготовлены для дальнейшего расчета

по модели высокого разрешения. Для этого были использованы авторские разработки интерфейса для гидрологических данных модели MPI-ESM. Были проанализированы потоки входных и выходных данных в совместной модели MPI-ESM и выбраны характеристики в заданной расчетной области Арктической зоны. Для дальнейшего использования в модели более высокого разрешения с учетом волнения, прилива, механического воздействия на гидросооружение были подготовлены поля приземного (надповерхностного ветра на уровне 10 м), а также поля скорости и течения воды от поверхности до дна (до 7 расчетных уровней). Для верификации данных проводился контроль качества, проверялось условие стратификации (плотность нижних слоев должна быть выше, чем верхних). В проведенных расчетах нарушения стратификации не наблюдалось. Для подготовки массивов данных, соответствующих выходным характеристикам поля скорости, течения и ветра были разработаны программы интерфейса. Данные приведены в цифровом виде и в виде таблицы.

В заключение отметим важность ансамблевых расчетов при изучении климата. Меняя начальные условия, задавая их с помощью метода усвоения при разных наборах данных, в разных регионах и в различные моменты времени, можно изучать чувствительность модели к возмущению начальных и граничных условий, влияние отдельных регионов и различных характеристик модели на систему в целом, делать внутри и межгодовые прогнозы. При этом важно выдерживать баланс входных начальных параметров, сохранять суммарную массу и энергию. Метод усвоения как раз и служит этой цели.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-07-00037.

Литература

1. Беляев К.П., Тучкова Н.П., Кубаш У. Реакция совместной модели "океан-лед-атмосфера" на усвоение данных наблюдений в тропической зоне Тихого океана // *Океанология*. 2010. т. 50. № 3. С. 334-344.
2. Михайлов Г.М., Беляев К.П., Сальников А.Н., Тучкова Н.П., Кирхнер И. Учет данных наблюдений для анализа динамических процессов в океанской модели циркуляции // *Научный сервис в сети Интернет: труды XVII Всероссийской научной конференции (г. Новороссийск, 21-26 сентября 2015 г.)*. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2015. С. 240-243. URL: <http://keldysh.ru/abrau/2015/proc.pdf#page=267>.
3. Сальников А.Н., Тучкова Н.П., Кирхнер И. Архитектура европейской климатической модели: опыт установки на суперкомпьютерах в России // *Параллельные вычислительные технологии (PaVT2016): труды международной научной конференции (28 марта – 1 апреля 2016 г., г. Архангельск)*. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. 816 с. URL: <http://omega.sp.susu.ru/PaVT2016/> С. 678-684.