

Н.Г. Яковлев

*Институт вычислительной математики РАН, г. Москва***КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА: БАЛАНС ФИЗИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Современные численные модели достигли замечательных успехов в воспроизведении состояния Северного Ледовитого океана. Иногда создается впечатление, что дальнейший прогресс в решении задачи связан исключительно с совершенствованием вычислительных технологий. Между тем Северный Ледовитый океан имеет ряд физических особенностей, создающих принципиальные трудности при его моделировании: малый радиус деформации Россби, конвекция на открытой воде и подо льдом, сильная стратификация по вертикали, динамика морского льда. В работе обсуждаются некоторые из таких проблем и особенности их описания в современных и перспективных климатических моделях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Северный Ледовитый океан, моделирование, динамика льда, термодинамика льда.*

Введение. Почти десять лет назад стартовал Международный проект по сравнению моделей Северного Ледовитого океана *AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project* [1] – Международный проект по сравнению моделей Северного Ледовитого океана, – см. информацию на сайте <http://www.whoi.edu/page.do?pid=29836>). За это время был достигнут значительный прогресс в описании наблюдаемых особенностей состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана (СЛО) – прежде всего за счет использования моделей высокого пространственного разрешения. Если в начале проекта горизонтальное разрешение порядка 20 км считалось вполне приемлемым, а получаемые результаты – вполне реалистичными, то сейчас некоторые группы исследователей начинают работать уже с разрешениями порядка 5 км. Параллельно с увеличением пространственного разрешения шло и усложнение используемых физических приближений. В основном это касалось описания динамики и термодинамики морского льда. Хотя справедливости ради следует отметить, что за истекшее десятилетие не появилось принципиально новых физических концепций – все внедрявшиеся в широкое использование физические параметризации были сформулированы в конце 1990-х – начале 2000-х годов.

В то же время основные задачи, которые были сформулированы в самом начале проекта, остались во многом нерешенными. Прежде всего, это задача о механизмах формирования узких струй вдоль материкового склона, несущих теплую атлантическую воду, и задача формирования и изменчивости наблюдаемого распределения солености (часто говорят о содержании пресной воды, хотя физически было бы правильнее говорить именно о содержании солей). Собственно говоря, некоторый кажущийся парадокс и состоит как раз в том, что сильное увеличение пространственного разрешения не привело к ожидаемому новому пониманию состояния СЛО и улучшению воспроизведения наблюдаемых характеристик.

© Н.Г. Яковлев, 2011

В связи со сказанным выше возникают вопросы:

– какое пространственное разрешение следует считать достаточным для моделирования СЛО в рамках существующих моделей, использующих так называемые «традиционные» приближения – гидростатики, Буссинеска и несжимаемости?

– какие физические процессы ответственны за формирование наблюдаемого состояния СЛО и как они описаны в современных моделях?

– будут ли справедливы основные предположения о состоянии океана и морского льда, используемые сейчас, при переходе к более высокому пространственному разрешению?

– какие потребуются новые параметризации и какие старые параметризации перестанут работать при переходе к более высокому пространственному разрешению?

– что в данный момент важнее – направлять усилия на увеличение пространственного разрешения (в рамках структурированных и неструктурированных пространственных аппроксимаций) или на улучшение параметризации физических процессов в пределах уже достигнутого разрешения?

1. Наблюдаемые особенности состояния Северного Ледовитого океана. Начнем с того, что при моделировании СЛО нужно учитывать имеющиеся натурные данные, без правильной интерпретации которых невозможно построение адекватной физической модели моделируемого объекта. Количество и качество имеющейся информации будет в значительно мере определять и тот технологический уровень компьютерной модели, который имеет смысл использовать в настоящее время для воспроизведения состояния СЛО.

Прежде всего, можно отметить очевидные географические особенности, такие как:

– существование глубоководных котловин (или бассейнов);

– существование нескольких высоких подводных хребтов, разделяющих бассейны;

– сочетание протяженных шельфов и крутых материковых склонов;

– сочетание широких проливов и сети мелких и узких проливов Канадского Архипелага;

– интенсивный речной сток – как реками Евразии, так и реками Аляски;

– существование довольно толстого слоя теплых атлантических вод с ядром на глубине примерно 500 м, переносящего тепло в СЛО из Атлантики посредством узких струй шириной порядка 30 км, идущих вдоль материкового склона;

– дрейфующий и припайный лед.

Информацию о состоянии Северного Ледовитого океана дают различные спутниковые системы, в основном ориентированные на измерение площади льда. Есть постоянно меняющаяся сеть из довольно большого количества буев, объединенная в рамках Международной Арктической программы буев *IABP – International Arctic Buoy Program* (информацию о работе программы, а также все собранные данные можно получить на сайте <http://iabp.apl.washington.edu/>). Особенность использования буев в Арктике – трудность реализации программы всплывающими буями типа *Argo* (см. сайт

<http://www.argo.ucsd.edu>), так как происходит разрушение буя при его всплытии и столкновении со льдом. Так что буи типа *Argo* могут использоваться только в районах, свободных ото льда. Поэтому в основном используются буи, закрепленные на льду. Если такой буй выносится в область таяния льда – он также теряется. Данные с буев позволяют получать информацию о температуре, солености, о некоторых метеорологических параметрах, и отслеживать положение буя, что позволяет вычислить скорость дрейфа льда. В ключевых проливах устанавливаются заякоренные буи, ориентированные на измерения профилей температуры и солености, и, в меньшей степени – скорости течений.

Данные, получаемые с помощью буев, дополняются данными, полученными с судов (специализированных и случайных), немногочисленными данными, получаемыми с помощью автономных подводных планеров и данными, получаемыми подводными лодками. Прототип интегрированной системы сбора и обработки данных, объединяющей все наблюдательные платформы через системы ассимиляции данных, создан в ходе проекта *DAMOCLES (Developing Arctic Modelling and Observing Capabilities for Long-term Environmental Studies* – Разработка возможностей моделирования и наблюдения Арктики для долгопериодных исследований окружающей среды) – интегрированном европейском вкладе в Международный Полярный год 2007 – 2008 (см. сайт <http://www.damocles-eu.org>).

В целом количество данных, получаемых в настоящее время по СЛЮ, представляется уже достаточно большим для того, чтобы можно было говорить о формировании общей картины среднего состояния и изменчивости характеристик воды и морского льда.

2. Проблемы при моделировании состояния вод океана. Важными физическими особенностями СЛЮ являются маленький бароклинный радиус деформации Россби (порядка 3 – 5 км), маленький масштаб Райнса (также порядка 3 – 5 км на материковом склоне), и сочетание в одном регионе как очень сильно устойчивой стратификации в летний сезон (в связи с формированием теплого и пресного верхнего слоя), так и неустойчивой стратификации с зонами глубокой конвекции, проникающей до дна (в Норвежско-Гренландском море).

Такой маленький горизонтальный масштаб в комбинации с особенностями стратификации приводит к сложностям при моделировании. Это связано с тем, что радиус Россби и масштаб Райнса по порядку величины совпадают с пространственным масштабом, при котором необходимо отказываться от приближения гидростатики (переходная зона в зависимости от особенностей вертикальной структуры находится в диапазоне 1 – 10 км). Попытка описать прямо пространственные масштабы порядка 1 км приводит и к проблеме явного описания конвективного перемешивания, так как в этом случае мы приближаемся к масштабу конвективной ячейки (около 100 м).

Вероятно, что именно с маленькими характерным горизонтальным масштабом вихрей и связан тот факт, что увеличение пространственного разрешения не дает ожидаемого эффекта в плане точности описания интенсивных струй и переноса тепла и солей. При горизонтальном разрешении порядка 5 км спектр модели обрезается на масштабе накачки, и это не позволяет правильно описать переходы энергии по спектру. Таким образом,

переход от разрешения порядка 20 км к разрешению порядка 5 км может сопровождаться даже ухудшением результатов, так как организованные струи распадаются на цепочки вихрей, динамика которых описана неадекватно. В результате струи разрушаются, а потоки тепла и солей резко падают. Это приводит к неверному описанию состояния океана в целом.

При низком пространственном разрешении, когда справедлив статистический подход в описании ансамбля вихрей, существуют параметризации так называемого вихревого переноса скаляра [2, 3]. Пример использования такого рода параметризации в случае СЛО приведен в работе [4], где показано, что при использовании этой параметризации улучшается воспроизведение переноса тепла и солей из Атлантики в Центральную Арктику. Учитывая сказанное выше, можно ожидать, что такая параметризация будет полезна при пространственном разрешении вплоть до 20 км. При более высоком пространственном разрешении мы попадаем в «серую зону», когда в части области СЛО (где радиус деформации достаточно большой в силу особенностей стратификации) вихревые эффекты будут описываться моделью два раза – явно и через параметризацию.

При моделировании СЛО необходимо также помнить о том, что современные модели динамики океана основаны на приближении гидростатики. Негидростатические процессы на самом деле имеют большое значение для формирования крупномасштабного состояния океана, однако обычно описываются неявным образом – как правило, не очень хорошо.

Среди таких процессов можно выделить:

- стекание тяжелой воды вдоль дна («каскадинг»);
- глубокая конвекция в открытом океане;
- распространение и обрушение внутренних волн – в частности – внутреннего прилива, в присутствии реалистичной топографии дна.

Вероятно в настоящее время такое высокое разрешение, чтобы отказаться от гидростатического приближения в моделях Мирового океана или СЛО, недостижимо, однако следует помнить об этом ограничении при применении существующих моделей для ограниченных районов, когда разрешение доходит до 100 м.

Таким образом, можно сделать вывод, что в данное время оптимальным разрешением для воспроизведения состояния вод СЛО является разрешение порядка 15 – 20 км. При этом желательно рассматривать СЛО как часть Мирового океана в глобальной модели, чтобы исключить влияние граничных условий на «открытых» границах. Переход к более высокому пространственному разрешению следует делать крайне осторожно, учитывая особенности физики Северного Ледовитого океана.

3. Проблемы описания динамики ледового покрова. Увеличение пространственного разрешения приводит уже сейчас к ситуации, когда шаг сетки модели становится сравнимым с размером отдельной льдины. Напомним, что средний размер льдины в СЛО оценивается в 300 м. В этой ситуации возникает вопрос о применимости предположений о реологии морского льда, описывающей силы, возникающие в ледовом покрове вследствие взаимодействия отдельных льдин между собой. Напомним, что базовая идея, на которой построены современные модели динамики льда, состоит в

том, что дрейфующий морской лед можно рассматривать как гранулированную (или сыпучую) среду с большим количеством гранул на масштабе пространственного осреднения. В этом случае удастся применить достижения механики сыпучих сред и описать дрейфующий и деформирующийся лед как течение жидкости с вязко-пластичной реологией [5] (часто используется вычислительный прием, преобразующий систему уравнений для компонент тензора скоростей деформации к эволюционному виду, который трактуется как упруго-вязко-пластичная реология [6, 7]).

Современные исследования показывают, что увеличение пространственного разрешения вплоть до 2 км способствует улучшению воспроизведения состояния ледового покрова [8] в рамках различных вариантов вязко-пластичной реологии. Однако можно ли использовать описание ледового покрова как сплошной среды при более высоком пространственном разрешении? По-видимому, нет. Дальнейшее увеличение пространственного разрешения моделей должно сопровождаться переходом к принципиально новым физическим концепциям. Во всяком случае – исследователь должен точно понимать, что такая проблема существует и требует правильной интерпретации результаты расчетов. Поэтому нет смысла вкладывать большие усилия в увеличение пространственного разрешения моделей динамики морского льда.

4. Проблемы описания подледного пограничного слоя. Для того, чтобы проиллюстрировать проблему увеличения пространственного разрешения как по горизонтали, так и по вертикали в верхнем пограничном слое океана подо льдом, на рис. 1 показан фрагмент данных по осадке льда, полученных с сонаров подводных лодок (*SCICEX – Science Ice Exercise*, Научные Ледовые учения, см. сайт <http://www.scicex.org>).

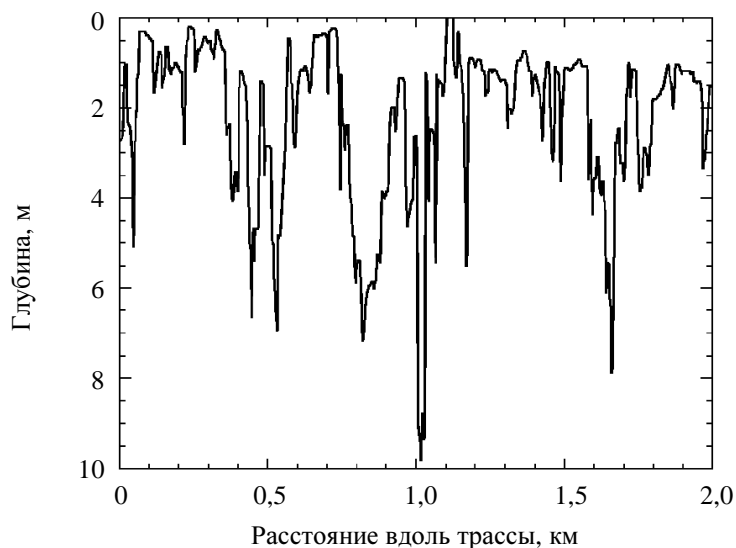


Рис. 1. Пример фрагмента данных по осадке льда, полученных с подводных лодок, *SCICEX*.

Видно, что не только увеличение горизонтального пространственного разрешения создает проблемы описания пограничного слоя. Увеличение вертикального разрешения также наталкивается на проблему построения численной модели – как выбирать вертикальную сетку, если глубина подводной части торосов достигает 10 м и более? По существу, никаких законченных результатов в этой области нет. Неудивительно, что в этом случае относительно грубое пространственное разрешение может оказаться более предпочтительным, чем формально более точное разрешение по вертикали, для которого не существует адекватного описания такого сложного и по существу трехмерного пограничного слоя.

5. Новые вычислительные технологии. Переход к описанию более тонких физических процессов в свою очередь опирается на современные вычислительные технологии. Среди таких технологий можно выделить следующие направления:

- реализация существующих моделей, основанных на структурированных сетках, на массивно-параллельных компьютерах с числом процессоров порядка сотен тысяч. Зачастую такая реализация приводит к необходимости пересмотра используемых вычислительных алгоритмов. Интересно, что в некоторых случаях оказывается выгоднее с вычислительной точки зрения использовать более сложные физические модели, которые, однако, более удобны при реализации на таких параллельных компьютерах. Пример такого усложнения – переход от неявных схем для уровня океана, допускающих только линеаризованное кинематическое условие, к полной нелинейной постановке кинематического условия на свободной верхней поверхности;

- развитие техники сопряженных уравнений для оценки критичных параметров модели и внешнего воздействия. Для сложных нелинейных систем построение сопряженной задачи, которая может быть эффективно решена на ЭВМ, является нетривиальной задачей;

- новые математические методы и вычислительные технологии оценки качества моделей, основанные на последних достижениях математической теории климата;

- разработка принципиально новых численных моделей, основанных на других физических приближениях. Отказ от приближений гидростатики, Буссинеска, несжимаемости. Отказ от приближения тонкого сферического слоя. Разработка глобальных моделей на неструктурированных и адаптивных сетках (конечно-элементных и конечно-объемных), способных давать решения высокой точности в интересующих районах.

Все эти технологии позволяют не только получить непосредственно результат каких-то расчетов (что тоже важно для потребителя), но и способствуют лучшему пониманию физики и более точному описанию этой физики для решения практических задач прогноза состояния океана.

6. Заключение. В свое время тогда еще не академик РАН, а просто профессор Артем Саркисович Саркисян говорил, мне, молодому аспиранту, что в науке теория и натурный эксперимент должны быть как две ноги – человек может двигаться вперед, только взаимосвязано передвигая обе ноги. Бессмысленно и даже опасно слишком широко шагать одной ногой. Такая же история происходит сейчас и в собственно моделировании океана,

где выделились свои специфические области, которые мы условно разделили на «физику» и на «вычислительные технологии».

Задача статьи состояла в том, чтобы на примере Северного Ледовитого океана продемонстрировать необходимость учета баланса между уровнем физической постановки задачи и уровнем технологической реализации. Поскольку в последнее время, говоря о вычислительной технологии, имеется в виду обычно увеличение пространственного разрешения, мы и сосредоточились на проблемах, которые могут появиться на этом пути.

Благодарности.

Автор выражает глубокую благодарность академику РАН Артему Саркисовичу Саркисяну за его чувство юмора, терпение и мудрость, которые позволили нам проработать вместе в течение вот уже 30 лет. Следует заметить, что именно Артем Саркисович инициировал в 1996 году мой интерес к моделированию Северного Ледовитого океана – когда эта тема была еще совершенно новой и непопулярной.

Автор также выражает признательность оргкомитету рабочего семинара по моделированию динамики океана, проводимого в МГИ НАН Украины, и его председателю – члену-корреспонденту НАН Украины, профессору Г.К. Коротаеву.

При написании этой статьи большое влияние на автора оказали дискуссии с С. Даниловым и В. Гряником (Институт морских и полярных исследований им. А. Вегенера, Бремерхафен, ФРГ), которым автор также выражает благодарность.

Участие автора в работе семинара по моделированию динамики Мирового океана было поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 11-05-90587-Укр_з.

В статье представлены результаты, частично полученные в ходе выполнения проекта «Создание вычислительного ядра модели Земной системы нового поколения» в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №14 «Интеллектуальные информационные технологии, математическое моделирование, системный анализ и автоматизация».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Proshutinsky A., Steele M., Zhang J., Holloway G., Steiner N., Häkkinen S., Holland D., Koeberle C., Karcher M., Johnson M., Maslowski W., Walczowski W., Hibler W. and Wang J.* Multinational effort studies differences among Arctic Ocean models // EOS. – 2001. – vol. 82, № 51. – P. 637-644.
2. *Gent P.R. and McWilliams J.C.* Isopycnal mixing in ocean circulation models // J. Phys. Oceanogr. – 1990. – vol. 20, № 1. – P. 150-155.
3. *Visbeck, M., Marshall J., Haine T., and Spall M.* Specification of eddy transfer coefficients in coarse resolution ocean circulation models // J. Phys. Oceanogr. – 1997. – V. 27. – P. 381-402.
4. *Яковлев Н.Г.* К вопросу о воспроизведении полей температуры и солености Северного Ледовитого океана // Известия РАН: серия «Физика атмосферы и океана». – 2012. – том 48, № 1. – С. 1-17.
5. *Hibler W.D., III.* A dynamic-thermodynamic sea ice model // J. Phys. Oceanogr. – 1979. – vol. 9, № 4. – P. 815-846.

6. *Hunke E.C and Dukowicz J.K.* An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* – 1997. – vol. 27, № 9. – P. 1849-1867.
7. *Hunke E.C.* Viscous-plastic sea ice dynamics in the EVP model: Linearization issues // *J. Comput. Phys.* – 2001. – vol. 170, № 1. – P. 18-38.
8. *Wang K. and Wang C.* Modeling linear kinematic features in pack ice // *J. Geophys. Res.* – 2009. – vol. 114. C12011, doi:10.1029/2008JC005217.

Матеріал поступив в редакцію 12.12.2011 г.

АНОТАЦІЯ Сучасні чисельні моделі досягли чудових успіхів у відтворенні стану Північного Льодовитого океану. Іноді створюється враження, що подальший прогрес у вирішенні завдання пов'язаний виключно з удосконаленням обчислювальних технологій. Між тим Північний Льодовитий океан має ряд фізичних особливостей, що створюють принципові труднощі при його моделюванні: малий радіус деформації Росбі, конвекція на відкритій воді і під льодом, сильна стратифікація по вертикалі, динаміка морського льоду. У роботі обговорюються деякі з таких проблем і особливості їх опису в сучасних і перспективних кліматичних моделях.

ABSTRACT Modern numerical models have achieved the remarkable success in Arctic Ocean state simulation. The impression that the further progress in the problem solution is due to numerical technologies perfection only sometimes is formed. Meanwhile, the Arctic Ocean has some physical features, resulting in principal difficulties in numerical modeling: the small Rossby radius, open water and under-ice convection, strong vertical stratification and sea ice dynamics. Some of the problems and distinctive features of their representation in modern and perspective climate models are under discussion in the paper.