

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

УДК 551.581.1

А.С. Саркисян

Институт вычислительной математики Российской академии наук, г. Москва

КРАТКИЙ ОБЗОР НЕКОТОРЫХ ДОСТИЖЕНИЙ И ОСНОВНЫХ НЕДОСТАТКОВ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИРОВОГО ОКЕАНА И МОРЕЙ

В обзоре обсуждаются семь основных направлений, или стадий, развития моделирования характеристик океанов и морей: (1) Модель Экмана. Экман впервые в океанологии представил проблему расчета морских течений в виде задачи теоретической гидродинамики. (2) Динамический метод возник для расчета только одной из трех компонент скорости течения по гидрологическому разрезу. (3) Метод полных потоков оказался моделью однородного океана. (4) Численное прогностическое моделирование – уже реальная ступень в исследовании бароклинного океана с учетом геометрии бассейна. (5) Метод синтеза модели и данных гидрологических наблюдений – важная следующая ступень. Он у нас называется «диагноз-адаптация». (6) Модель К. Брайена. Впервые в океанологии им построена модель категории *3DPEM*. (7) Четырехмерный анализ – самая трудная и самая важная стадия моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *моделирование океана, семь ступеней, диагноз течений, синтез моделей и данных измерений, численные методы.*

Введение. Прежде всего, обращаем внимание читателя на суть названия этой статьи. Мы подчеркиваем таким названием, что есть только небольшое число «некоторых» достижений, заслуживающих изложения, а недостатки – «основные». Легче всего было бы похвалить достижения: многие авторы научных работ были бы довольны, увидев в чужих статьях и книгах хвалебный перечень своих достижений. Можно было остановиться на лучших из них так подробно, что объем этой статьи превысил бы пять других. Но автор этих строк придерживается перефразирования высказывания К. Маркса: чем дальше развивается наша наука, тем больше понимаем, как мало мы знаем. И это естественно, во-первых, потому, что данных глубоководных наблюдений очень мало, во-вторых, потому, что вычислительная техника, несмотря на ее бурное развитие, пока отстает от потребностей вычислительной математики и геофизики. Причем, если возможности суперкомпьютеров очень быстро растут, то этого нельзя сказать про объем массива данных наблюдений. Спутниковая информация относится только к поверхности Мирового океана, а буйковая и дрейферная вряд ли увеличатся на 3 – 5 порядков в обозримом будущем.

Основанная на ограниченной базе данных и неправильной ориентации ученых (об этом будет написано ниже), океанология вообще, и вычисли-

тельная – в частности, развивалась очень медленно и длительное время, отставая от метеорологии. К настоящему времени, в связи с переходом к численным методам, разрыв между ними сократился, но, до тех пор пока мало данных по глубоководной части океана, отставание останется. И здесь дело ни в каком-нибудь соревновании между метеорологами и океанологами. Дело в том, что долгосрочный прогноз погоды, прогноз изменений климата невозможен без высокого уровня модели взаимодействия Глобальной Атмосферы и Мирового океана. После того, как почти столетие не наблюдалось быстрого развития термогидродинамики океана (а химия, биология, акустика океана зависят от динамики) в последние десятилетия вычислительная океанология растет достаточно быстро, появляются даже хорошо развитые работы по оперативной океанологии. Но это только начало.

Эти обстоятельства и диктуют форму изложения данной статьи: перечень основных вех развития за столетие, несколько подробнее о работах этого столетия (но не очень подробно, т.к. достижения быстро устаревают) и подчеркивание основных недостатков каждой ступени развития. Итак, все по порядку.

1. Линейная модель однородного океана. Первой ступенью является линейная модель однородного океана, разработанная В. Экманом в начале прошлого века [1]. Экман первый показывает, что расчет морских течений – это задача гидродинамики. В уравнениях движения Экман сохранил эффекты вертикальной турбулентной вязкости с постоянным коэффициентом, ускорения силы Кориолиса и градиентов давления. Поскольку уравнения линейные, Экман делит течения на две части – чисто дрейфовую, возникающую исключительно влекущим действием ветра и градиентную, возникающую в баротропном океане вследствие неравномерности ветра. Определение градиентной части было, конечно, затруднительно – для того времени нельзя ждать многого, а вот спираль Экмана, имитирующая чисто дрейфовую часть течения, вошла во все учебники по динамике океана. Изображение вертикального распределения дрейфовых течений в виде винтовой затухающей эпюры, конечно эффектно, но рассказывая студентам об этом, нужно честно информировать, что в реальном океане нет ничего подобного, как нет и изолированных друг от друга дрейфовых и градиентных течений. Кроме того, в природе нет однородного океана, есть только верхний перемешанный по высоте, но неоднородный по горизонтали слой океана. В этом противоречии, с одной стороны, видно единство океанологических характеристик, а с другой – желание ученого временно разделить целое на части, чтобы иметь первое представление о динамике.

В дальнейшем, в течение примерно полувека, было много работ развивающих модель Экмана (путем расчета градиентных течений), но они оставались в стороне от реального океана с его переменной плотностью (переменной температурой и соленостью). Все же успех Экмана очевиден, а может и вечен хотя бы для учебных целей.

Итак, запомним основные недостатки модели Экмана:

- морская вода однородна;
- единственной силой, возбуждающей движение, служит касательное трение ветра.

2. Динамический метод. Параллельно с моделью Экмана возник динамический метод (невероятно, но факт, – самый что ни есть консервативный, вечно неизменный метод называется динамическим). В начале прошлого века Сандстрем и Гелланд-Ганзен вряд ли думали о вечности предложенного ими метода расчета скорости течений. Впрочем, динамическим методом называют только те, кто честно называет вещи своими именами. Многие называют это методом расчета геострофических течений, но это уже лукавство: вроде бы нельзя придраться – рассчитанные течения действительно геострофические, но человеку, заявляющему о том, что он рассчитал геострофические течения, нужно сразу задать вопрос, а как вы рассчитали поле давления? Тут и выяснится, что это не просто геострофические течения (что, вообще говоря, является неплохим первым приближением при расчете крупномасштабных течений), а его исключительный, частный, упрощенный случай – случай, который предполагает наличие так называемой «нулевой» поверхности. Это предположение приводит к искусственно быстрому затуханию скорости течения с глубиной и ко многим другим серьезным недостаткам – нарушение закона сохранения массы, отсутствие возможности расчета вертикальной компоненты скорости течения, отсутствие зависимости скорости течения в данной точке от соседних или связи одной компоненты скорости с другой, и т.д. и т.п. Дело в том, что поле давления – это непрерывное поле, его нельзя считать в какой-либо точке вне зависимости от окружающих. Геострофическое приближение приемлемо только в случае, когда поле давления рассчитано правильно.

Для начала 20-го века приближение динамического метода было не только приемлемым, но и прогрессивным. Эта идея Сандстрема и Гелланд-Ганзена в течение многих и многих десятилетий, когда математическое моделирование не было еще развито, сыграло большую роль в океанографии и, даже, в океанологии, т.е. не только в качественном представлении о схеме течений, но и в понимании физики океана по крайне скудным данным измерений температуры и солености.

Чтобы «специалистам», вычисляющим скорости течений по динамическому методу в 21-ом веке, веке суперкомпьютеров, было совсем стыдно, приведем простейшее объяснение. Пусть судно по курсу своему измерило вертикальный профиль T, S всего в двух точках, а участник экспедиции по ним рассчитал вертикальный профиль аномалии плотности. Расчет скорости по данным этих двух вертикалей можно выполнить динамическим методом следующим образом. Сложить аномалию плотности в десятках точек по вертикали в точке № 1, проделать то же самое в точке № 2, совершенно независимо от точки № 1, вычислить разность между этими двумя полученными суммами, помножить эту разность на константу и получить в середине между этими двумя точками компоненту скорости течения перпендикулярную курсу судна. Далее, если продолжались измерения, проделать то же самое со следующей точкой и совершенно независимо от точки № 1, получить ту же компоненту скорости еще в одной точке. Продолжая эту процедуру, можно рассчитать этим «динамическим» методом компоненту скорости течения перпендикулярную курсу судна. Такие расчеты может выполнить любой человек с четырехклассным образованием. Такова суть расчетов скорости течения по динамическому методу.

В последние десятилетия название «динамический» употребляется мало: вместо этого лукаво имеется «геострофическое течение», или жаргонное «геострофика», «метод отсчетного уровня» по аналогии с английским «*reference level method*». Но существо от этого не меняется, ибо это означает вычислить скорость течения данного горизонта относительно неизвестной скорости другого горизонта, а эту неизвестную, и несколько меньшую, величину на большей глубине легче считать равной нулю. Единственным оправданием расчетов по динамическому методу был единичный гидрологический разрез, но и это в прошлом, ибо существует способ обработки такой информации современным методом.

И все же этот метод вечен по двум причинам:

а) несмотря на уйму недостатков, метод в первом приближении качественно правильно отражает схему градиентной части поверхностных (но не средних по высоте, а тем более не глубинных) течений;

б) метод крайне прост.

Ну а ленивым и (или) полуграмотным в математике «ученым»-модельерам давай чего-нибудь попроще. К методу этому еще вернемся ниже.

3. Модель Штокмана. После того, как два совершенно противоречивых метода – модель Экмана и динамический метод (согласно одному из них, $\rho = const$ и единственной движущей силой является ветер, а другой основан исключительно на переменной плотности и обходится без учета прямого воздействия ветра) просуществовали бок о бок около полувека «не замечая друг друга», казалось, что В.Б. Штокман [2, 3] нашел выход, предложив модель, которая учитывает и ветер и, как ему показалось, бароклинность морской воды, но, увы, Штокман просто ошибся. Казалось бы, что тут особенного: ну, подумаешь, один ученый, в одной статье, один раз ошибся. Мало ли было таких ученых и/или таких статей, оставшихся незамеченными. Но курьез в том, что на Штокмана сразу «напали» двое: Манк [4] и Свердруп [5] (какие имена!), которые сами допустили ту же ошибку, за которую критиковали Штокмана. Почему? Зачем? Стоило на этом остановиться во второй половине прошлого века одному из учеников Штокмана – автору этих строк [6], т.к. «наука – история науки, а история науки – наука». Поэтому на такой ошибке стоит остановиться даже в настоящее время подробнее.

Как известно Штокман придавал большое значение наличию аналогии между уравнениями полного потока в море и изгибом закрепленной пластины. Сам по себе любопытен тот факт, что еще в конце сороковых годов прошлого столетия при трудностях обмена информацией в зарубежной печати появилась немедленная реакция на опубликованную в СССР работу В.Б. Штокмана. Немедленная и ... отрицательная.

В самом деле, Свердруп написал: «Теоретические результаты Штокмана не применимы к условиям океана вследствие его предположения об однородности воды». Заметим сразу, что Штокман не сделал такого предположения и даже слово «бароклинность» включил в заглавие своей работы, но почему же Свердруп пишет именно так, увидим ниже. Отношение Манка к работе Штокмана выражено следующим предложением: «Решение уравнения, данное Штокманом, носит формальный характер, поскольку он пре-

небрег таким важным фактором, как планетарная завихренность» (т.е. β -эффект. – *А.С. Саркисян*). Что касается аналогии между уравнениями полного потока и изгиба закрепленной пластины, то по этому поводу Манк справедливо ссылается на работу, изданную в позапрошлом веке, то есть задолго до Штокмана [7]. Но Манк критикует не только Штокмана, но и Экмана [1], и Стоммела [8]. Эта критика заслуживает особого внимания, ибо она является самым полным обоснованием работ, считающихся теорией интегрального потока бароклинного слоя океана. Сущность рассуждений Манка заключается в следующем (перевод цитаты): «Модели Экмана и Стоммела относятся к однородному океану. Это не только противоречит данным наблюдений, согласно которым основной перенос водных масс происходит в верхнем километровом слое океана, но приводит к математическим осложнениям, что вынудило Стоммела прибегнуть к искусственной форме задания трения о дно. Чтобы избежать этих затруднений, мы сохраняем интегральную функцию тока Свердруп. Этот инструмент позволяет исследовать более общий случай, а именно бароклинный океан без задания вертикального распределения плотности и течений. Поскольку течения практически затухают на большой глубине, мы приходим к зависимости от горизонтального перемешивания». Манк этой цитатой четко и подробно объяснил постулат, которого придерживались также Свердруп и Штокман. Обратим внимание на то, что в заглавии работы Свердрупа тоже имеется слово «бароклинность».

Итак, основоположники метода полного потока считали, что таким путем они перешли от нереалистичной однородной модели Экмана, Стоммела к реальному бароклинному океану. Так они считали и, как увидим ниже, ошиблись.

Чтобы облегчить вывод уравнения полных потоков, Штокман, Свердруп и Манк сделали предположение о наличии некоторой поверхности на большой глубине с поистине феноменальными свойствами. А именно, они считали, что на этой глубине затухают и скорости течения, и градиенты давления, и вертикальное трение; кроме того, сама эта глубина бароклинного слоя постоянна во всем океане.

Что правильно в рассуждениях авторов метода полных потоков, это то, что градиенты плотности убывают с глубиной, так же как и вертикальное трение. Однако, они убывают, но вовсе не затухают, а глубина бароклинного слоя вовсе не постоянна. Более того, все трое основоположников так называемой «теории» полных потоков ошиблись, думая, что считают интегральный перенос бароклинного слоя и океана.

На деле их океан баротропен, потому что в их основном уравнении нет градиентов плотности, и единственной движущей силой для функции полного потока у них всех является вихрь от касательного трения ветра, не имеющий никакого отношения к бароклинности воды. Признаться, такую же ошибку совершил в одной из своих работ 1956 г. последователь перечисленных основоположников – автор этих строк [9]. Я считал, что выполнил расчеты для бароклинного слоя океана, на деле, как оказалось, я вычислил интегральные расходы ветровых течений (функцию Ψ) однородного океана. Но уже к концу 50-х и началу 60-х гг. нами были впервые выполне-

ны прогностические расчеты плотности и трехмерной циркуляции действительно бароклинного океана. Сторонники же метода полного потока не отказались от идей Манка и от соотношения Свердрупа. В модели полного потока Штокмана-Манка был еще один неверный постулат – считалось, что изолинии функции полного потока отображают линии тока поверхностного течения. О том, что постулат неверен покажем ниже, а пока отметим, что принятый постулат плюс отсутствие учета рельефа дна (или переменности глубины бароклинного слоя), а также не учет бароклинности морской воды, привели к тому, что изолинии Ψ действительно в общих чертах напоминали глобальные центры действия, а учет β -эффекта (что оказалось важным) привел к западной интенсификации и в результате показалось, что модель Манка реалистична. Это вдохновляло многих ученых и «теория» полных потоков получила широкое распространение.

Авторам этого направления, и многим их последователям, показался прогрессивным переход от уровня однородного океана Экмана к интегральной функции тока бароклинного (как им показалось) океана.

Подчеркну еще раз, что успеху модели Манка содействовали не только учет β -эффекта, но и перечисленные три недостатка – невероятно, но что это так, мы увидим ниже при изложении последующих этапов.

4. Прогностические модели. Наука о расчетах климатических характеристик не могла останавливаться ни на модели однородного океана Экмана, ни тем более на модели Штокмана-Манка с кажущейся бароклинностью. Бароклинность – это горизонтальные градиенты плотности; аномалию плотности либо нужно задавать из данных наблюдений, либо рассчитать математикам самим. Необходимость этого второго подхода очевидна, ибо только путем расчетов можно понять под действием каких именно факторов формируется и трансформируется поле ρ , а, следовательно, и климатическая циркуляция. Расчеты такого рода называются прогностическими в отличие от диагностических, в которых ρ задается.

Прогностическими считаем модели, в которых решаемое уравнение для ρ или T и S обязательно нелинейное, нестационарное, трехмерное и содержит поля u, v, w . Только таким путем составляющие скорости и аномалия плотности становятся взаимозависимыми. Только такая постановка задачи может ответить на вопросы о роли различных внешних и внутренних факторов в формировании и эволюции климатических характеристик океана.

Что касается уравнений движения, то они в первом приближении могут быть и линейными – лишь бы они были трехмерными и содержали все три компоненты скорости в качестве искоемых функций. Это упрощение допустимо вследствие того, что вне экватора основные линейные слагаемые (градиент давления и ускорение силы Кориолиса) почти балансируют друг друга в крупномасштабных движениях и учет нелинейных слагаемых не является таким принципиальным, каким это является в уравнении переноса-диффузии плотности (температуры, солености).

Задача о прогностическом расчете циркуляции и поля плотности впервые была поставлена и численно решена еще в начале 60-х годов прошлого века [10, 11]. Основные достижения этой стадии расчетов заключаются в следующем:

а) главным достижением является выяснение очень важной роли зонального переноса массы бароклинической жидкостью в западной интенсификации и отрыве интенсивных течений (Гольфстрим, Куроисио и т.д.) с западного побережья. Начиная с известной работы Стоммела [8] и продолжая статьями Манка, Свердрупа. Казалось, что β -эффект чуть ли не единственный фактор, вызывающий западную интенсификацию. Но, во-первых, перечисленными моделями получалась лишь одна треть Гольфстрима, во-вторых, нужно объяснить не только западную интенсификацию, но и отрыв этого интенсивного течения с западного берега; в этом, втором вопросе, β -эффект не причем, т.к. этот фактор не меняет своего знака во всем северном полушарии. Более того, если в тропиках бароклинический поток (пассатные течения), направленный на запад содействует β -эффекту «прижимая» течение к меридионально ориентированным материкам, то в средних широтах наоборот – западно-восточный перенос «побеждает» β -эффект и отрывает течение от западного побережья. Учет бароклиничности (адвекции аномалии плотности) привел к термическому варианту объяснения механизма общей циркуляции океана в противоположность механическому, ветровому воздействию на однородный океан;

б) расчеты показали, что рельеф дна играет принципиальную роль и этим фактором никак нельзя пренебречь. Принятие постулата о постоянной глубине океана или неопределенной глубине бароклинического слоя океана было временным явлением; важность учета переменной глубины стала очевидной вскоре после перехода к численным методам с учетом нелинейности уравнения переноса-диффузии плотности;

в) трансформация аномалии плотности оказалась в такой степени важным процессом, что вопрос о том, какова роль того или иного фактора в динамике течений, сводился к тому, какова роль его в трансформации плотности? Иными словами, каковы изолинии аномалии плотности, такова крупномасштабная (стационарная, сезонная) циркуляция. Если у западного (северного, южного) побережья есть сгущение изолинии плотности, то есть и Гольфстрим, есть интенсивное градиентное течение (если нет – то нет). Если у восточного есть сгущение плотности, то есть апвеллинг, если нет – то нет.

Эти три основных результата, естественно, требуют, чтобы модельные плотности поля были близки к данным измерений, ибо только в этом случае модельные поля течений будут правильно имитировать фактическую циркуляцию. Но, вот тут и выявились наши проблемы, а именно – слабость советской вычислительной техники. (О зарубежных работах 60-х и 70-х годов будет сказано ниже в пункте 5.) Эта слабость, точнее – это сильное отставание, заставляло нас решать искомые задачи глобальной циркуляции только с грубым разрешением (двух-пятиградусные шаги по горизонтали), заниматься моделированием только для небольшой части Мирового океана (в основном Северная Атлантика), только для небольшого числа горизонтов и только для непродолжительного модельного времени интегрирования. После стольких «только» мы и получали еще пару «только» – только сильно сглаженные по сравнению с данными наблюдений поля плотности и только для верхних горизонтов. Тогда и возникла идея о расчете циркуляции Мирового океана по заданным из наблюдений полям плотности, т.е. идея диагностических расчетов течений Мирового океана и морей.

5. Диагноз-адаптация как метод восстановления и взаимного приспособления всех климатических характеристик. После расчетов по диагностическим моделям стало ясно, что пользоваться методом полного потока однородного океана абсолютно бессмысленно. Формально диагностические расчеты можно было выполнить с очень высоким разрешением даже на отсталых советских ЭВМ. Но, нижний предел разрешения определяется не мощностью ЭВМ, а масштабом осреднения, которым пользовались при подготовке полей T, S от разрозненных по времени и пространству данных наблюдений. Достаточно, чтобы шаг по горизонтам был, скажем, на порядок меньше шага осреднения. При дальнейшем уменьшении расчетного шага, ЭВМ не принесет новой информации, а грубое разрешение сильно уменьшает точность расчетов.

Итак, каким бы превосходством не обладал диагностический расчет по сравнению с методом полного потока, точность этого метода заранее ограничена точностью данных наблюдений по T, S . Но основной недостаток любой диагностической модели не в этом. Диагностический расчет – метафизика. Прямо по Энгельсу («диалектика природы») – сначала природу убиваем, потом на части разрезаем и затем изучаем. Диагностический расчет – одностороннее движение, при котором учтено только влияние T, S на скорость течения и вовсе не учтено влияние течения на гидрологию. При диагностическом расчете копируются ошибки несоответствия гидрологических полей рельефу дна океана, ибо невозможно было аккуратно учесть влияние рельефа дна при подготовке полей T, S по скудным данным наблюдений. Сильное влияние рельефа дна на поле течений – это «палка о двух концах», оно говорит не только о важности учета рельефа дна, но и о том, что велики последствия погрешностей поля плотности, привнесенные в поле течений СЭБИР'ом (совместный эффект бароклинности и рельефа дна). Это и было основным аргументом оппонентов против диагностических расчетов, отстаивающих отсталые однородные модели полного потока. Но ведь единственная движущая сила – поле ветра однородных моделей тоже не безгрешна, от него тоже надо отказаться? Отказаться от учета бароклинности, т.е. от диагностических расчетов из-за погрешностей, содержащихся в поле плотности, все равно что из ванны вместе с грязной водой выбрасывать ребенка.

Итак, диагностический метод достиг «уровня своей некомпетентности», также как все предыдущие ступени. Что делать? Естественно, вооружившись знаниями, приобретенными при диагностических расчетах, с учетом того, что к тому времени (70-ые годы) не только зарубежная вычислительная техника сильно продвинулась, но даже наша несколько улучшилась, взяться за прогностическое моделирование на основе полной нелинейной системы с учетом СЭБИР, вычисляя не только динамику, но и T, S , т.е. по модели, которая в англоязычной литературе называется *3DPEM – Three dimensional primitive equation model*.

Остановимся вкратце на объяснении сущности СЭБИР'а. Для этой цели выпишем упрощенный вариант нашего уравнения интегральной завихренности

$$\beta S_y + \frac{1}{\rho_0} J(H, P_H) = \frac{1}{\rho_0} \text{rot}_z \bar{\tau} \quad (1)$$

где P_H – аномалия давления на дне океана.

В англоязычной литературе якобиан $J(H, P_H)$ называется «*bottom pressure torque*» – момент кручения придонного давления.

В наших работах уравнение (1) было преобразовано в уравнение для ζ , затем для ψ , но чтобы объяснить суть открытия роли СЭБИР, обратимся еще к уравнению статики

$$P = \rho_0 g \zeta + g \int_0^z \rho dz \quad (2)$$

Вертикальная структура этого уравнения следующая.

На «поверхности» океана, точнее при $z = 0$, (слово «поверхность» взято в кавычки, чтобы не было путаницы с настоящей свободной поверхностью, на которой давлением является атмосферное давление, а поверхность, на которой $z = 0$, виртуальная), аномалия давления $P_0 = \rho_0 g \zeta$ максимальна, с

глубиной интеграл $\int_0^z \rho dz$ возрастает и, имея, как правило, противоположный с $\rho_0 g \zeta$ знак, частично (но не полностью) компенсирует аномалию давления. В результате $P_H \ll P_0$.

Форма записи уравнения (1) такова, что в ней бетта-эффект, βS_y и момент кручения придонного давления, т.е. $\frac{1}{\rho_0} J(H, P_H)$ величины одного

порядка малости. Оба эти члены действительно малы ибо единственной движущей силой в этом уравнении является $rot_z \vec{\tau}$. Именно на малости P_H по сравнению с P_0 построен динамический метод, принимающий $P_H \approx 0$. По существу, на этом же построено соотношение Свердрупа $\beta S_y = \frac{1}{\rho_0} rot_z \vec{\tau}$, которое получается при небольшом значении P_H , т.е. при $J(H, P_H) \approx 0$.

Первое наше предложение заключается в том, что аномалией давления на дне океана

$$P_H = \rho_0 g \zeta + g \int_0^H \rho dz \quad (3)$$

пренебрегать не следует, хотя она и мала по сравнению с P_0 . Дело в том, что два члена правой части (3) находятся в клинче, они как два схватившиеся друг за друга скорпиона, если их расцепить, то получится мощный источник энергии – это накопленная тысячелетиями солнечная энергия.

В преобразованном таким образом уравнении

$$\beta S_y + g J(H, \zeta) = \frac{1}{\rho_0} rot_z \vec{\tau} - \underbrace{g \int_0^H J(H, p) dz}_{\text{СЭБИР}} \quad (4)$$

появился новый источник энергии – СЭБИР, который в несколько раз превосходит энергию ветра. Указанный выше клинч привел к тому, что $J(H, P_H)$ мал по сравнению с каждым из двух порожденных им (за счет расщепления) якобианов – $J(H, \zeta)$ и СЭБИР'ом.

Алгебраическая сумма двух якобианов с противоположными знаками на порядок меньше слагаемых. Этот наш результат эффектно иллюстрировал *Holland* [12] рисунком, который мы и воспроизводим (положение составных частей рисунка в сравнении с оригиналом изменено – *Техн. ред.*).

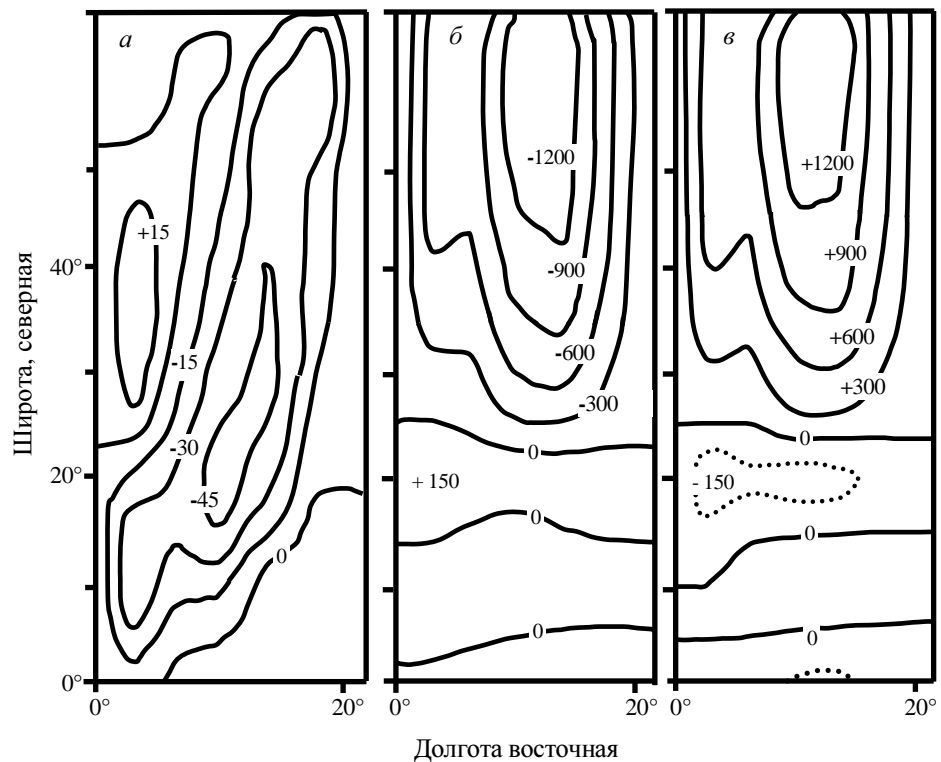


Рис. 1. Значение слагаемых уравнений (1) и (4) на примере Северной Атлантики: значения $\frac{1}{\rho_0} J(H, P_H)$ (рис. 1, а) и порожденные ими поля СЭБИР (рис. 1, б) и $gJ(H, \zeta)$ (рис. 1, в). Значения $\frac{1}{\rho_0} rot_z \bar{\tau}$ и βS_y , так же на порядок меньше основных членов, как и $\frac{1}{\rho_0} J(H, P_H)$.

Если для качественных оценок считать S_y равным $\frac{g}{\beta} \int_0^H J(H, \rho) dz$, то полученный таким образом S_y будет в несколько раз больше того S_y , который получается из соотношения Свердруп.

Наконец, если для качественных оценок приравнять друг к другу два одностепенных члена с правой и левой частями уравнения (4), например, с производными по x , то получится

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^H \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (5)$$

т.е. наклон уровня в динамическом методе.

В районе Гольфстрима за счет сгущения изолиний плотности такой наклон, а, следовательно, и скорость течения уже не в несколько раз, а на порядок больше, чем можно было получить от $rot_z \vec{v}$.

Расщепление правой части формулы (3) с переброской бароклинной части энергии уравнения (1) в его правую часть – полный аналог расщепления атома и получения атомной энергии. Сравнение это не шуточное, ибо никакая атомная энергия не сравнится с энергией течений Мирового океана. Эффект такого расщепления – порождение СЭБИР, играющий определяющую роль в уравнении для ψ , показавший несостоятельность моделей Штокмана, Свердрупа и Манка, и является причиной многочисленных работ, учитывающих СЭБИР, зачастую ссылающихся на нашу с Ивановым статью 1971 года [13]. Научных статей и книг такого рода всегда было и будет очень много.

Но вернемся к прогностическому моделированию. Если при этом не придавать значения начальным полям T, S , задавая их, чисто идеализированно, в виде вертикальных профилей, не зависящих от горизонтальных координат, и интегрировать настолько долго, чтобы возникали аномалии T, S во всей толще океана за счет граничных условий, то это будет задача на «сотворение мира».

Так и поступил К. Брайен в 1969 г. [14]. Но к нему вернемся ниже. А пока исходим из другой идеологии, обусловленной отчасти ограниченными возможностями наших ЭВМ, по принципу «голь на выдумки хитра». Метод следующий. Стартуем с $3DPEM$ ¹, а в качестве начальных избираем поля T, S как в диагностических расчетах, но с неподвижного океана. Что творит при этом модель? Сначала очень быстро «устраняет неисправность», т.е. то неадекватное предположение будто аномалии T, S существуют, а скорость течения всюду отсутствует (начальных полей течений, построенных по скудным измерениям, нет и может никогда не будет). Модель очень быстро восстанавливает течение, соответствующее заданным полям T, S . Но это не все. Нужно приспособить заданные T, S модели к рельефу дна, к форме берегового очертания, к уравнениям системы. Полная модель с высоким разрешением сравнительно быстро справляется с этой задачей для верхних слоев океана. Более того, модель усиливает прибрежную (не только западную, но и любую) интенсификацию градиентов T, S и скорости течений.

¹ $3DPEM$ – three-dimensional ocean circulation model based on the solution of the system of primitive equations of thermohydrodynamics, – трехмерная модель океанической циркуляции, основанная на решении примитивных уравнений термогидродинамики.

Все это хорошо, но многие, естественно, считают что этого мало, продолжают процесс интегрирования, желая воссоздать аномалии на больших глубинах и в тех районах, где, из-за скудости данных наблюдений, поля T , S малоградиентны, а модельные значения скорости течений занижены.

А что происходит при слишком длительном интегрировании? Отвлекаемся от варианта, когда модель расходится. Это не имеет отношения к физике и модельер должен справиться с этим чисто схоластическим процессом. Во всех остальных случаях из-за недостатков модели, начальных и граничных условий происходит фильтрация, сглаживание исходных полей T , S . Мы тут и говорим: стоп! не навреди! Модельер должен внимательно заниматься мониторингом энергетики, ну, хотя бы следить за изменением кинетической энергии каждого горизонта в отдельности, а не средним для всей толщи энергии, как это делается многими. Полная, высокого разрешения модель, лучший интерполянт, но, создавая или усиливая градиенты в одном месте, она начинает сглаживать, портить в другом – получается «нос вытащил – хвост увяз». Мы и предлагаем остановиться. Вместо «сотворения мира» сделаем синтез модели и данных наблюдений. Это интерактивное действие человека и машины называем диагност-адаптацией. Результат стоит на двух ногах: модель и вся доступная информация, их синтез, сделанный опытным специалистом.

6. Кирк Брайен. Он заслуживает того, чтобы этот пункт назвать его именем. Более того, по сравнению с пятью предыдущими, это самая высокая ступень. Шутка ли сказать – это $3DPEM$ для всего Мирового океана с учетом рельефа дна в 1969 году! Мы в СССР, с нашими отсталыми ЭВМ, об этом и мечтать не могли, но без этого любые расчеты обладают существенными недостатками. Например, хоть и прогностические расчеты мы начали на 8 – 9 лет раньше Брайена, но из-за строго ограниченной «памяти» наших ЭВМ (а это был их основной недостаток) вместо двух уравнений для T и S , нам приходилось довольствоваться одним – для ρ , вместо Мирового океана – в основном, Северной Атлантикой.

После пяти-шести лет, необходимых для «разгона», все серьезные модельеры перешли на $3DPEM$, правда далеко не все имели возможность пользоваться ЭВМ, близкой по возможностям к имеющейся в распоряжении Брайена, в *GFDL (The Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* – лаборатория гидрофизической гидродинамики), и, поэтому выполняли расчеты для ограниченных бассейнов, но игра шла всегда на платформе, построенной Брайеном. Разное разрешение, разные граничные условия, разные масштабы бассейнов, учет или не учет ледовитости самых северных (южных) широт и т.д., разные численные методы расчета, но теперь уже есть стандартный минимум – $3DPEM$, меньше которого нельзя, если вы хотите решить какую-либо задачу по физике океана на современном уровне. Это относится теперь и к Российским ученым, наши ЭВМ уже не такие слабые. Поэтому любой, кто претендует на физику океана (моря), должен отдавать себе отчет – какую систему уравнений он решает? Если упрощенную, по сравнению с $3DPEM$, то спрашивается – зачем? Нужно ведь сделать следующие шаги после Брайена, но уже никак не упрощать модель. Не следует также длительно интегрировать даже лучшую модель без мониторинга хода расчетов.

Исходные уравнения – это определенный минимум, но для старта нужны начальные условия. Брайен принял за начальные T, S идеализированные вертикальные профили, не зависящие от горизонтальных координат, т.е. взялся за задачу о «сотворении мира» для Мирового океана. Для первых пробных оценок это было полезно, но никто не мог тогда знать, что это полезно лишь качественно – и только. Даже с сегодняшними возможностями ЭВМ все сначала решают задачу инициализации, исходя из трехмерных осредненных данных измерений T, S (сезонных, среднемноголетних, месячных и т.д.) и только после этого переходят к решению конкретных нестационарных задач. Школе Брайена и его лучших учеников последовали многие (в основном на Западе, т.к. компьютерные возможности у них в конце прошлого века росли очень быстро), бессмысленно пытаться сделать их обзор; их работы хорошо известны, статей и книг школы Брайена очень много; некоторых из них коснемся как исключение, но в основном остановимся на недостатках.

К. Брайен, «первопроходец», естественно, не мог избежать ошибки: ни модель, ни возможности ЭВМ не были способны решить задачу о «сотворении океана» и длительное интегрирование (тысячелетия модельного времени) было нецелесообразно. На рис. 2 (см. [8]) приводим схематическое изображение временной изменчивости интегрального меридионального переноса массы западными прибрежными течениями.

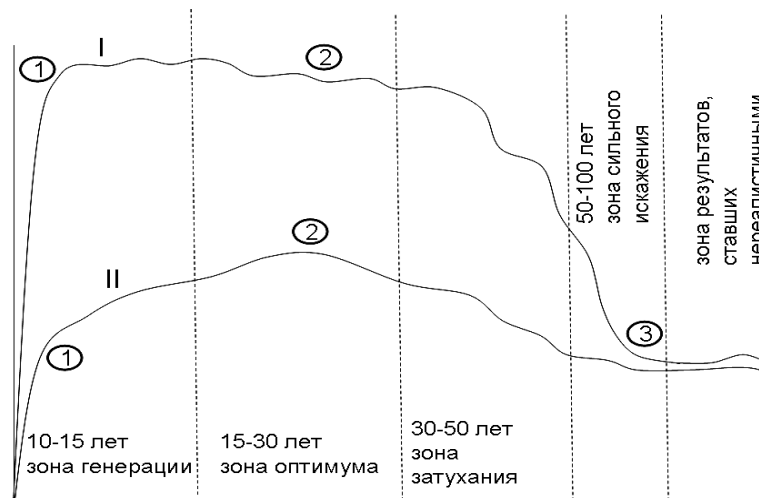


Рис. 2. Схематическое изображение временной изменчивости интегрального меридионального переноса воды течениями западного побережья (типа Гольфстрима, Куроисио и др.) для случаев инициализации с заданными из данных наблюдений начальными полями T и S (кривая I) и с заданием идеальных начальных профилей (кривая II) [8].

Расчеты Брайена относились к стадии 3 кривой № II. К сожалению, Брайен этого не понял и не предупредил своих последователей, в результате было много работ с формальным, длительным интегрированием, что приводило к сильной фильтрации результатов расчетов. Чтобы избежать перегрузки памяти ЭВМ, многие ученые стерли из памяти ЭВМ именно самую интересную часть (стадию 1 кривых I и II). Этим недостатком особенно грешат расчеты по гло-

бальному взаимодействию атмосферы и океана. За такую грандиозную задачу берутся прежде всего метеорологи, которые моделируют океан с большими шагами по горизонтали, чем атмосферу. А должно быть как раз наоборот – вода в океане «зажата» наличием берегов и многочисленных островов, воздух же легко переваливает любые горы. В результате размеры вихрей в океане практически на порядок меньше циклонов и антициклонов атмосферы, а ширина прибрежных апвеллингов и даунвеллингов океана меньше ширины атмосферных фронтов. Далее, скорость течения вод на 2 – 3 порядка меньше скорости ветра, атмосферный воздух за пару недель совершает круговорот вокруг планеты, в то время как воды «глобального конвейера» океана, двигаясь от Тихого океана через Индийский в Атлантический и обратно, проходят, трансформируясь, столетиями и тысячелетиями. Словом, простым формальным совместным решением двух систем уравнений (атмосферы и океана) нельзя прогнозировать изменения климата на десятилетия или столетия. Моделирование всей земной системы (атмосфера, океан, суша, льды, подземный сток, реки и т.д.) очень сложный процесс. Любая, сколь угодно высокоразвитая система уравнений не выдерживает прямой прогноз с неадекватно длительным интегрированием. Любая модель достигнет уровня своей некомпетентности и, что тогда делать? Естественно, останавливать процесс интегрирования и заниматься дальнейшим усовершенствованием. Это обычно и делается, и процесс этот бесконечен. Но существует еще другая возможность, на которой и остановимся в следующем пункте.

7. О четырехмерном анализе. В принципе, четырехмерный анализ – высшая ступень моделирования. Он крайне важен как для моделирования изменений климатических характеристик, так и для оперативной океанологии. В частности, он необходим для решения проблем с обнаружением подводных лодок. Математическая сторона проблемы сложна, но наша цель в этой статье простая – именно дать только общее представление, не более. Четырехмерный анализ, также как и процедура диагноз-адаптация, стоит на двух ногах – модель и данные наблюдений. Но в данном случае, связи между этими двумя аспектами сложнее (см, например, [15 – 23]) и др.).

В четырехмерном анализе помимо данных наблюдений нужны две модели – детерминированная модель термогидродинамики океана и статическая модель усвоения данных наблюдений. Это уже, по существу, тренога, причем имеется тесная взаимосвязь между всеми тремя компонентами. Общие последовательности связей между ними следующие: модель термогидродинамики → статистическая модель → данные наблюдений → уточненная термогидродинамическая модель. Статистическая часть строится на основе динамической. Для подготовки случайных (во времени и в пространстве) данных наблюдений к усвоению (интерполяция в узлы расчетной сетки) нужны обе модели (динамики и статики), а после усвоения, уточняется модель. С одной стороны, основной является модель динамики, с другой – эта модель уточняется, «обучается», впитывая данные наблюдений. Именно четырехмерный анализ позволяет перейти к оперативной океанологии. Работы такого направления были и будут, но из-за крайней сложности и скудости данных наблюдений пока успехи невелики.

Но четырехмерный анализ не панацея от всех бед. В 2011 году, т.е. в период написания этой книги, я слушал доклад одного профессионального

математика-модельера о расчете циркуляции Мирового океана с усвоением данных поверхностных полей температуры и солености. Автор, естественно, доказывал, что результаты его расчета реалистичны. На мое замечание о том, что в его результатах нет Гольфстрима, он ответил: да, Гольфстрима нет и, не оправдываясь, и, вообще, не замечая этот серьезный недостаток, продолжал доклад о достоинствах его работы.

Я невольно вспомнил одну беседу с выдающимся американским метеорологом-модельером Филиппом Томсоном.

Он сказал, что больше любит слушать доклады, чем читать статьи.

На мой вопрос, почему?

Ответил: можно спросить докладчика, зачем вы это сделали?

Никакое усвоение фактических данных не поможет, если с грубым разрешением, да без оглядки на то, куда завел тренд модели от уже полученных реалистичных результатов, проинтегрировать на сотни и тысячи лет модельного времени.

Томсон бы спросил, а зачем это вы сделали?

Какие еще перспективные направления существуют?

Ответ на этот вопрос давно найден и реализуется в виде:

а) *AOMIP (The Arctic Ocean Model Intercomparison Project)* – программа моделирования и интеркалибрации Арктического океана;

б) *CORE's (Common Ocean-ice Reference Experiments)* – координированные эксперименты по взаимоотношению океана и льда;

в) *GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment)* – эксперименты по ассимиляции глобальных океанографических данных и др.

Научные результаты любого специалиста, каким бы высококвалифицированным он ни был – это достижение одного человека или небольшой группы, а результаты перечисленных проектов периодически показывают растущий уровень всего раздела науки. Рост хорошо виден, если учесть, что полвека назад в первой работе решалось только уравнение для плотности вместо двух уравнений – для T и S , шаг по горизонтали равнялся 500 км, по высоте было всего 4 уровня и было сделано всего 5 шагов по времени по 5 суток. В свете сказанного и с учетом того, что ранее мы остановились на программе *AOMIP*, считаем необходимым коротко остановиться только на двух последних коллективных работах по проектам *CORE's* [24] и *GODAE* [25], опуская новые, пусть даже интересные, работы отдельных ученых. *CORE's* поставил себе амбициозный план, который простирается от использования совместных моделей океан-лед для понимания динамики климата до разработки полных моделей земной системы.

Для начала поставлены три цели, которые охватывают проблемы от исследования средних климатических характеристик, до моделирования сильных пресноводных и других аномалий длительных характерных масштабов (от декадных до столетних).

Впечатляет масштабность работы: в расчетах принимали участие 12 научно-исследовательских институтов из 5 стран, было использовано 7 моделей; в представленной в качестве результата статье 24 соавтора.

Разочаровали меня только грубые разрешения: $1 - 2^\circ$ по горизонтали. С таким грубым разрешением трудно ожидать реалистичные результаты. Если по меридиональному переносу тепла большинство моделей показывают близкие

друг к другу, но заниженные значения ($\pm 1,5$ петаватт), то полученный расход воды через пролив Дрейка крайне разнороден: от 20 до 180 свердрупов.

Правда, по ряду характеристик Маямская Изопикническая Модель резко выпадает от остальных, но:

во-первых, и без этой модели отклонения значений по разным моделям велики (70 – 180);

во-вторых, к концу эксперимента модель, показавшая минимальный результат, имеет тренд к дальнейшему уменьшению, в то время как модель с завышенным результатом, наоборот, стремится к дальнейшему росту.

На рис. 3 мы воспроизвели один из результатов авторов – интегральный меридиональный возвратный перенос (*overturning*) Атлантического океана. Расхождение между моделями очевидно. Самым надежным мы считаем величину в 20 свердрупов, полученную по модели *GFDL-MOM*.

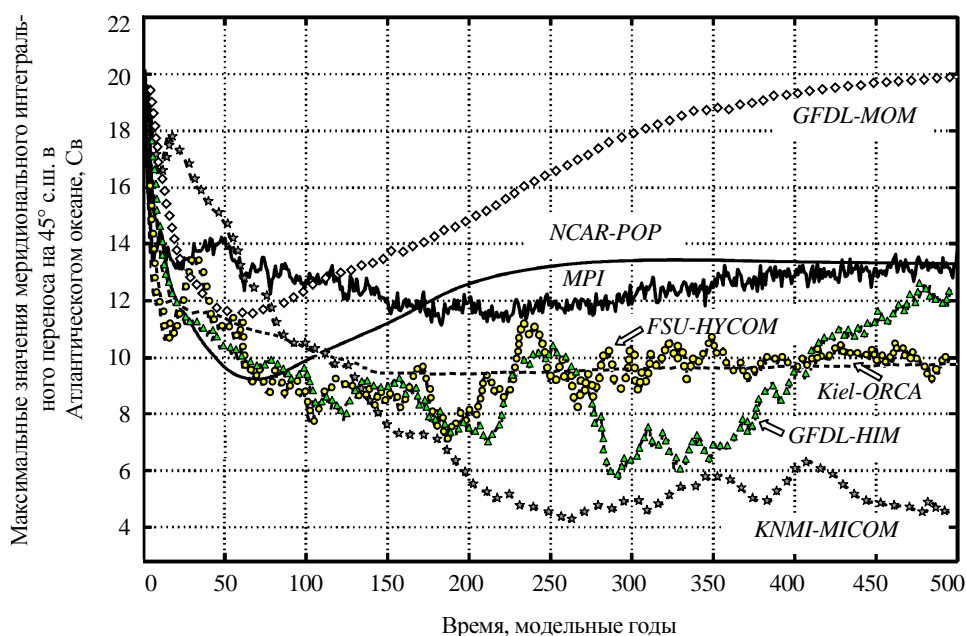


Рис. 3 Временной ход индекса Атлантического среднегодового меридионально-возвратного расхода (*overturning*) для модельных лет (от 1 до 500) в свердрупах. Индекс составлен по максимальному значению переноса на 45° с.ш. для толщи океана от нижней границы поверхностного слоя трения Экмана до дна океана.

В целом, основной причиной недостатков этого весьма интересного эксперимента является грубое разрешение. Но, повторяю, масштабность эксперимента заслуживает самой высокой оценки.

Оперативную систему *GODAE* мы считаем вершиной математического моделирования океанографических характеристик. Эти системы работают вот уже 15 лет. В *GODAE* участвуют 12 моделей из 9 стран. Соавторы работы (а их 11 человек) отмечают, что это является конструктивным соревнованием. К настоящему времени некоторые из этих моделей рутинно, оперативно, выдают пользователям продукт океанографического анализа, прогноза и реанализа.

GODAE основаны на:

- 1) лучших современных моделях общей циркуляции Мирового океана;
- 2) наиболее развитых методах четырехмерной ассимиляции данных.

Эта система моделей ассимилирует альтиметрические данные по аномалии уровня океана, температуре поверхности океана, *in situ* профилям температуры и солёности, включая данные *Argo*. Некоторые из них обладают возможностью инкрустации локальных моделей более высокого разрешения в расчеты глобального или бассейнового масштаба путем обмена данными через открытые границы. Такая процедура особенно нужна в прибрежных районах, где увеличение разрешения до еще более мелкомасштабных процессов (так называемый *downscaling*) имеет прикладное значение. Некоторые из этих уравнений взаимосвязаны с атмосферой и/или морским льдом.

Участие большого числа стран (а из некоторых стран участвуют несколько институтов) и глобальность некоторых моделей впечатляет. Некоторые глобальные модели обладают таким высоким разрешением, как $(1/12)^\circ$, с тридцатью двумя уровнями по глубине. Одни модели ассимиляции основаны на фильтре Калмана (в РСФСР и Украинской ССР это называется динамико-стохастический подход), другие – пользуются вариационным методом.

Должен заметить, что представленные первые результаты такого многолетнего амбициозного проекта, носят весьма скромный характер. Это *больше реклама, чем глубокий анализ* хотя бы части 15-летней работы по такой важной и высококвалифицированной программе. Тот факт, что ни России, ни Украины нет среди 11 стран, участвующих в одной или обеих программах, говорит о нашем серьезном отставании.

В СССР работы по четырехмерному анализу океанографической и метеорологической информации начались на десятилетия раньше других цивилизованных стран, но мы оказались отброшенными назад из-за слишком скромного финансирования фундаментальных исследований после развала СССР. Как отмечено выше, только в этом году появилась одна работа по моделированию циркуляции Мирового океана с разрешением в $(1/10)^\circ$ и 49 уровнями [26]. При таком финансировании нам далеко до оперативного четырехмерного анализа глобальных океанографических данных и, следовательно, время участия российских ученых в международных программах типа *GODAE* пока не назрело.

Одно замечание к рисункам типа 3.

Подчеркиваю, не конкретно к этому рисунку, а ко всем аналогичным, даже не столько к рисункам, сколько к организаторам интеркалибрации, избравшим интегральные характеристики для оценки качества моделей. А чему должна равняться величина *overturning'a* в Северной Атлантике? Я готов считать, что цифра 20, полученная по модели *GFDL-MOM* (*Modular Ocean Model*, модульная модель океана), наилучшая, но не готов считать, что это тот самый ответ, который близок к природе. Считаю, что в качестве характеристик должны быть избраны те, значения которых документированы неплохо по данным измерений. Например, скорость течения и точка отрыва Гольфстрима, Куроисио и т.д. А сравнение по интегральным характеристикам полезно, но оно не количественное, а оценочное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ekman V.W.* Über Horizontalzirkulation bei winderzeugten Meeresströmungen // *Arkiv Mat., Astron., Fysik.* – 1923. – Bd.17, № 26. – P. 77.
2. *Штокман В.Б.* Уравнение полных потоков, возбужденных ветром в неоднородном море // *ДАН СССР.* – 1946. – том 54, № 5. – С. 407-410.
3. *Штокман В.Б.* Использование аналогии между полным потоком в море и изгибом закрепленной пластины для характеристики потоков в некоторых конкретных случаях // *ДАН СССР.* – Новая серия. – 1946. – том. LIV, № 8. – С. 689-692.
4. *Munk W.H.* On the wind-driven ocean circulation // *J. Meteorol.* – 1950. – vol. 7, № 2. – P.79-93.
5. *Sverdrup H.U.* Wind-driven currents in the barotropic ocean with application to the equatorial currents of the Eastern Pacific // *Proc. Nat. Acad. Sci, USA.* – 1947. – № 11. – P. 318-326.
6. *Саркисян А.С.* О некоторых достижениях и основных проблемах математического моделирования климатических характеристик океана (критический анализ) // *Известия РАН: серия Физика атмосферы и океана.* – 2010. – том 46, № 6. – С. 724-733.
7. *Lord Rayleigh.* On the Flow of Viscous Liquids especially in Two Dimensions. // *Philosophical Magazine and Journal of Science.* London, Edinburg and Dublin. – 1893. – vol. XXXVIII. – P. 354-372.
8. *Stommel H.* The westward intensification of the wind-driven ocean currents. // *Trans. Amer. Geophys. Union.* – 1948. – vol. 29, № 2. – P. 202-206.
9. *Саркисян А.С.* К вопросу об определении стационарных ветровых течений в бароклинном слое океана // *Труды геофизического института АН СССР.* – 1956. – том 164, № 37. – С. 50-61.
10. *Саркисян А.С.* О роли чисто дрейфовой адвекции плотности в динамике ветровых течений бароклинного океана. // *Известия АН СССР: серия «Геофизическая».* – 1961. – № 9. – С. 1396-1407.
11. *Саркисян А.С.* О динамике возникновения ветровых течений в бароклинном океане // *Океанология.* – 1962. – том 2, № 3. – С. 393-409.
12. *Holland W.R.* Baroclinic and topographic influences on the transport in western boundary currents // *Geophys. Fluid Dyn.* – 1973. – № 4. – P.187-210.
13. *Саркисян А.С., Иванов В.Ф.* Совместный эффект бароклинности и рельефа дна как важный фактор в динамике морских течений // *Известия АН СССР: серия «Физика атмосферы и океана».* – 1971. – том 7, № 2. – С. 173-188.
14. *Bryan K.* A numerical method for the study of the circulation of the World Ocean // *J. Comput. Phys.* – 1969. – vol. 4, №3. – P. 347-376.
15. *Кныш В.В., Саркисян А.С.* Четырехмерный анализ гидрофизических полей океана и моря: модельные численные эксперименты и результаты реконструкции // *Известия РАН: серия «Физика атмосферы и океана».* – 2003. – том 39, №6. – С. 817-833.
16. *Кортаев Г.К., Саенко О.А., Коблински Ч.Дж., Демьшев С.Г., Кныш В.В.* Оценка точности, методика и некоторые результаты усвоения альтиметрических данных TOPEX/POSEIDON в модели общей циркуляции Черного моря // *Исследование Земли из космоса.* – 1998. – № 3. – С. 3-17.
17. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики. – М: Наука, 1980. – 536 с.
18. *Семенов Е.В., Русецкий К.К.* Численная модель для обработки полигонных термодинамических измерений // *Известия АН СССР: серия «Физика атмосферы и океана».* – 1987. – том 23, № 3. – С. 314-319.
19. *Knysh V.V., Saenko O.A., Sarkisyan A.S.* Method of assimilation of altimeter data and its test in the tropical North Atlantic // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling.* – 1996. – vol. 11, № 5. – P. 333-409.

20. *Le Dimet F.-X., and Talagrand O.* Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical Aspects // *Tellus*. – 1986. – vol. 38A. – P. 97-110.
21. *Marchuk G.I. and Penenko V.V.* Application of optimization methods to the problem of mathematical simulation of atmospheric processes and environment / *Modelling and Optimization of Complex Systems. Proc. IFIP-TC7 Working conf. (Marchuk ed.)*. – New York. Springer. – 1978. – P. 240-252.
22. *Mellor G.L., Ezer T.* A Gulf Stream model and an altimetry assimilation scheme // *J. Geophys. Res.* – 1991. – vol. 96. – P. 8779-8795.
23. *Zalesny V.B. and Rusakov A.S.* Data assimilation numerical algorithm based on splitting and adjoint equation methods // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling*. – 2007. – vol. 22, № 2. – P. 199-219.
24. *Griffies S.M., Biastoch A., Boning C. et al.* Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (COREs) // *Ocean Modelling*. – 2009. – vol. 26, № 1-2. – P.1-46.
25. *Dombrowsky E., Dertino L., Brassington G.B. et al.* GODAE Systems in Operation // *Oceanography*. – 2009. – vol. 22, № 3. – P. 80-95.
26. *Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В.* Вихреразрешающая 1/10° модель Мирового океана // *Известия РАН: серия «Физика атмосферы и океана»*. – 2012. – том 48, №1. – С. 45-55.

Матеріал поступил в редакцію 12.12.2011 г.

АНОТАЦІЯ В огляді обговорюються сім основних напрямів, або стадій, розвитку моделювання характеристик океанів і морів: (1) Модель Екмана. Екман вперше в океанології представив проблему розрахунку морських течій у вигляді завдання теоретичної гідродинаміки. (2) Динамічний метод виник для розрахунку тільки однієї з трьох компонент швидкості течії по гідрологічному розрізу. (3) Метод повних потоків виявився моделлю однорідного океану. (4) Чисельне прогностичне моделювання – вже реальна ступінь в дослідженні бароклінного океану з урахуванням геометрії басейну. (5) Метод синтезу моделі і даних гідрологічних спостережень – важлива наступна ступінь. Він у нас називається «діагноз-адаптація». (6) Модель К. Брайена. Вперше в океанології їм побудована модель категорії 3DPEM. (7) Чотиривимірний аналіз – найважча і найважливіша стадія моделювання.

ABSTRACT Seven main directions or stages of ocean modelling are considered in this survey. (1) The Ekman model. Ekman was the first in oceanography to present the task of flow velocity calculation as a problem of theoretical hydrodynamics. (2) The reference level method appeared for calculation of only one component of the flow velocity by a hydrologic section. (3) The mass transport stream function method appeared to be a model of homogeneous ocean. (4) The prognostic numerical model is already a real stage of baroclinic ocean investigations considering its real geometry. (5) The model-data synthesis is the next necessary stage which is also called as diagnosis-and-adjustment calculation. (6) The K. Bryan model. He was the first in oceanography to develop a model of 3DPEM type. (7) The four-dimensional analysis is the most necessary and difficult stage.