

УДК 82-43

DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-2-107-109

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОКЕАНОЛОГИИ ГЛАЗАМИ ФИЗИКА**

Когда Р.И. Нигматулин в 2006 г. встал у руля ИО РАН, он был уже ученым-механиком с мировым именем, выдающимся специалистом в области физики многофазных сред. Но, насколько мне известно, ему никогда ранее не приходилось сталкиваться с особенностями океанологической науки. По собственному опыту знаю, как нелегко приходится в первое время (которое может измеряться годами, а иногда и десятилетиями) сотруднику с физическим образованием и способом мышления, начинающему работать в океанологии без профильной подготовки. И дело тут не только в том, что ему приходится держать в голове много чисто географических сведений, а в нашем междисциплинарном институте – еще и ориентироваться, как минимум на базовом уровне, в биологических и геологических вопросах. Даже когда речь идет о физических процессах в океане, и употребляется, казалось бы, универсальный язык уравнений – быстро выясняется, что и тут океанологи разработали свою собственную терминологию и своего рода жаргон, свои обозначения, а главное – некую собственную систему понятий и допущений, далеко не всегда полностью вписывающихся в представления, привычные для «нормальных» физиков. Конечно, умение видеть физическую суть явлений позволяет в конечном счете во всем разобраться, и успешный опыт Р.И. Нигматулина служит тому хорошей иллюстрацией.

Чтобы придать этой заведомо ненаучной заметке подобие научного содержания, ниже я приведу (без количественных утверждений и формул) несколько примеров тех неожиданностей, которые встречают постороннего при попытке вплотную заняться своеобразной наукой, именуемой физикой океана.

Хорошо помню изумление, которое испытал, узнав впервые, что вода в океане течет во все не вдоль направления градиента давления, а (в так называемом геострофическом приближении) как раз перпендикулярно ему. Это как если бы вы увидели, что камень катится с горы не вниз, а вбок, поперек склона. Воду отклоняет сила Кориолиса – назидательно сказал проводивший со мной ликбез коллега-океанолог,

к слову сказать, не физик, а чистый географ по образованию. Пускай себе отклоняет, но не на прямой же угол, помню, подумал я. Но оказалось, что именно на прямой: в такой и только в такой ситуации достигается баланс между силой градиента давления и силой Кориолиса, перпендикулярной скорости.

Этот пример подчеркивает роль вращения системы отсчета, которое, в отличие от многих задач общей гидродинамики, в задачах океанологии приходится учитывать всегда (если только пространственные масштабы рассматриваемого явления превышают радиус деформации Россби). Первое, о чем подумает физик, столкнувшийся с необходимостью работать во вращающейся системе отсчета – это центробежная сила. Но ни в одной из принятых в океанологии форм уравнений движения центробежная сила не присутствует вовсе! Читатель может сам убедиться в этом, заглянув в соответствующие учебники. А ведь везде, кроме экватора и полюсов, эта сила имеет ненулевые вертикальную и меридиональную проекции, т.е. в системе уравнений Навье–Стокса она должна бы входить не только в третье, но и во второе уравнение для компонент ускорения. Однако ее там нет. Почему? Далеко не каждый океанолог с ходу ответит на этот вопрос – все они привыкли просто воспринимать это как данность. Иногда приходится слышать, что центробежной силой пренебрегают, потому что она много меньше других членов в уравнениях движения. Но это неверно: легко оценить, что центробежная сила в условиях океана Земли как раз на порядки величины превышает силу Кориолиса, тем не менее последняя всегда включается в уравнения движения, а первая – никогда.

Правильный же ответ, как я это понимаю, такой: равновесная отсчетная поверхность для океана имеет форму не сферы, а эллипсоида вращения, чем как раз и обеспечивается баланс центробежной силы и гравитации. Таким образом, центробежная сила, действующая на элемент воды, всегда уравновешивается, так сказать, скатывающей силой градиента давления, возникающей за счет равновесного искривления поверхности геоида. Поэтому можно очень

удобным образом исключить из уравнений и ту, и другую, одновременно приняв два компенсирующих друг друга допущения: что центробежной силы нет (хотя она, конечно, есть), а наклон поверхности океана в равновесном положении соответствует горизонтали (хотя, если понимать под горизонталью эквипотенциальную поверхность гравитационного поля, это не так).

Следует отметить, что сама уже упомянутая выше геострофическая модель, реализующая баланс градиента давления и силы Кориолиса, с точки зрения «нормального» физика вообще выглядит почти издевательством над здравым смыслом. Действительно, она предполагает стационарность движения, полное отсутствие всякого трения, а также отсутствие нелинейных членов, отражающих адвекцию импульса. Между тем разве не очевидно, что стационарных движений в океане не бывает, импульс, набранный от удаленных источников, всегда передается вниз по течению, а трение крайне существенно во многих случаях? И остается лишь удивляться тому, что при всем этом геострофическое приближение успешно описывает процентов на девяносто все наблюдаемые движения в океане, а в толще воды, вдалеке от поверхности и дна – практически на все сто процентов. С этим фактом трудно поспорить, потому что он подтвержден многочисленными измерениями. Такое неожиданное соответствие устройства природы самой физически примитивной модели стало для меня одним из важных уроков, полученных на ранних стадиях знакомства с океанологией.

Внутри у геострофического приближения есть и еще один термин, которого нельзя не коснуться, говоря о странных, с точки зрения физика, понятиях океанологии: нулевая, или отсчетная поверхность, она же *reference level*, или *level of no motion*. Дело тут в том, что геострофическая модель позволяет рассчитать так называемым динамическим методом компоненты скорости течения, однако не полностью, а лишь с точностью до неопределенного слагаемого. Физический смысл этого слагаемого состоит в той не зависящей от вертикальной координаты части скорости, которая связана не с неоднородностью поля плотности, а с наклоном поверхности океана. В наши дни можно непосредственно измерить этот наклон с помощью спутниковой альтиметрии и получить в итоге полную геострофическую скорость, но когда теория создавалась, подобных возможностей не было и в помине. Итак, скорость, рассчитанная динамическим методом, всегда определена лишь с точностью до константы. И вот вместо того чтобы прямо об

этом объявить, океанологи придумали следующий фокус. Они ввели понятие нулевой поверхности, т.е. такого уровня глубины, на котором геострофическая скорость гипотетически обращается в нуль. На какой глубине такая поверхность находится и почему она вообще обязана существовать в природе – непонятно, но если допустить, что она действительно есть, и глубина выбрана правильно, то тогда наши неопределенные константы в выражениях для скорости немедленно определяются, и решение задачи волшебным образом начинает выглядеть полным. Но не все понимают, что речь здесь идет не более чем о замене одной неопределенности на другую, эквивалентную первой – вместо неизвестной константы мы теперь имеем неизвестную глубину залегания этой самой нулевой поверхности и должны выбирать ее по собственному экспертному усмотрению. Кстати, я не раз слышал от впервые столкнувшихся с этой проблемой студентов предложение выбрать нулевую поверхность на дне, что на первый взгляд кажется разумным – уж там-то скорость точно равна нулю. Но не тут-то было: на дне скорость равна нулю лишь благодаря трению, а трение в геострофической модели непозволительно. Поэтому необходимо выбирать нулевой уровень из других соображений.

Справедливости ради нужно сказать, что, как это ни удивительно, в большинстве случаев расчеты, выполненные динамическим методом – строго говоря, физически не обоснованным! – дают достаточно близкие к измерениям результаты, а поля динамической топографии, построенные с использованием произвольно выбранной нулевой поверхности, обычно на удивление хорошо совпадают с топографией фактической, которую можно увидеть с помощью спутниковой альтиметрии.

Одним из часто использовавшихся в классической океанологии способов выбора нулевой поверхности был следующий: предполагалось, что она должна совпадать с поверхностью раздела между двумя водными массами, залегающими одна над другой и движущимися в противоположные стороны (если, конечно, таковые найдутся). Это дает нам повод критически обсудить еще одну исторически очень важную и результативную, но не вполне физически обоснованную концепцию океанологии, а именно – понятие о водных массах. В кратком и упрощенном изложении суть этой концепции сводится примерно к следующему: в океане существует некоторое конечное число «первичных», базисных типов воды, свойства которых определяются их физическими источниками и характеризуются теми

или иными значениями – ну или достаточно узкими интервалами значений – температуры и солености. Все остальные виды воды в океане и весь его термохалинный континуум объявляются продуктами смешивания этих базисных типов (для конкретного элемента воды обычно не всех сразу, а двух или трех близлежащих). Если предположить, что это действительно так, то, зная температуру и соленость какого-либо образца воды и порождающих его базовых типов, легко вычислить относительное содержание в нем вод каждого из этих типов. На графиках в координатах соленость – температура точки будут ложиться внутри «треугольников смешивания» и образовывать линии, прямые участки которых соответствуют смешению двух водных типов. Все это вместе взятое и называется теорией водных масс.

В ювенильную эпоху океанологии, когда натурные данные по температуре и солености были в остром дефиците, а по скорости течений их почти совсем не было, эта теория сыграла положительную роль, поскольку дала возможность как-то систематизировать и осмыслить немногие имеющиеся сведения по термохалинной структуре океана, а главное – получить хотя бы начальные представления о циркуляции, ибо, анализируя описанным выше способом водные массы, можно было гипотетически судить о том, откуда те или иные воды пришли. Однако, с физической точки зрения, концепция водных масс едва ли может считаться корректной. Справедливо то, что значения температуры и солености базовых водных типов и пропорции, в которых они смешиваются между собой, полностью определяют свойства той воды, которая получается в результате смешения. Но вот в обратную сторону утверждение не работает: обнаружение нами в исследуемом образце тех свойств, которые могут быть результатом смешивания определенных базовых типов, вовсе не гарантирует того, что происхождение этого образца в действительности было именно таким. Есть бесконечное число других способов получить воду с такими же свойствами даже за

счет одного только перемешивания, просто выбирая исходные типы с другими характеристиками и смешивая их в других пропорциях. К тому же перемешивание – не единственный процесс, влияющий на термохалинные свойства вод, а температура и соленость не являются консервативными трассерами. Первая меняется и за счет тепловых потоков на поверхности океана, вторая тоже испытывает (хотя и в меньшей степени) влияние таких внешних факторов, как испарение и атмосферные осадки. Классическая теория водных масс всем этим пренебрегает.

Можно было бы привести и другие примеры особенностей подхода океанологов к физическим вопросам, но, наверное, достаточно и сказанного выше. При подготовке этой заметки я думал о трудностях восприятия новой для него науки, наверняка испытанных Р.И. Нигматулиным в первые годы его работы в нашем институте. Надо отдать должное Роберту Искандеровичу – он сразу очень активно включился в научные обсуждения на заседаниях Ученого совета и семинарах. Не стесняясь иногда обнаруживать недостаточную осведомленность в каких-то частных проблемах или терминологических тонкостях, он умел задавать очень точно поставленные вопросы и высказывать порой неожиданные, но всегда содержательные соображения по физической сути обсуждаемых явлений. Именно безошибочная интуиция физика позволила ему довольно быстро сориентироваться во всем круге очень разных задач, решаемых институтом. За десять лет работы в качестве заместителя Р.И. Нигматулина по физическому направлению ИО РАН я узнал от него много нового для себя.

Пользуюсь этим случаем, чтобы сердечно поздравить Роберта Искандеровича с юбилеем и пожелать ему здоровья, творческого долголетия и новых научных достижений.

*П.О. ЗАВЬЯЛОВ,  
чл.-корр. РАН*

---

## **SOME ISSUES OF OCEANOLOGY THROUGH THE EYES OF A PHYSICIST**

**© P.O. Zavyalov**

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997, Russian Federation