© Чубаренко Б. В., 2026, Океанологические исследования, 2026, Том 54, № 3, С. 3–23

УДК 551.46(092) DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).1

ДАР УВИДЕТЬ ФИЗИКУ ПРИРОДНОГО ЯВЛЕНИЯ: ИЗБРАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И. П. ЧУБАРЕНКО

Б. В. Чубаренко

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: boris.chubarenko@atlantic.ocean.ru, chuboris@mail.ru

В статье представлен обзор основных научных результатов **И. П. Чубаренко** в области физики природных водоёмов. Разнообразные направления её исследований – горизонтальная конвекция над подводными склонами, каскадинг, конвективный апвеллинг и сезонный термический фронт Балтийского моря, формирование холодного промежуточного слоя, гидродинамика лагун, циркуляция Ленгмюра, транспорт взвешенного вещества и влияние льдообразования на водообмен – рассматриваются как взаимосвязанные проявления единого физического подхода. Его основой было стремление перейти от наблюдаемого природного явления к выявлению определяющего его механизма, проверить предложенное объяснение натурными и лабораторными экспериментами и численным моделированием, а затем проследить действие механизма в природных системах более крупных пространственно-временных масштабов. Особое внимание уделено исследованиям горизонтального конвективного водообмена, возникающего вследствие пространственно неоднородного теплообмена с поверхностью, и его проявлениям в виде каскадинга, конвективного апвеллинга и термических фронтов. Рассмотрены результаты лабораторного моделирования термобара и горизонтального обмена через его фронт, а также применение концепции склоновой конвекции к формированию холодного промежуточного слоя Балтийского моря. На примере лагун показано, как особенности мелководной гидродинамики определяют водообмен, циркуляцию Ленгмюра и транспорт взвешенных частиц, включая их взаимодействие с внутриводным льдом. Обсуждается роль льдообразования в лагунах как источника отрицательной плавучести и фактора сезонной перестройки плотностной структуры и водообмена. Обсуждается методологическое единство исследований И. П. Чубаренко, нацеленных на развитие физического понимания процессов в природных водоёмах.

Ключевые слова: горизонтальный конвективный водообмен, каскадинг, конвективный апвеллинг, термобар, холодный промежуточный слой, лагуна, циркуляция Ленгмюра, транспорт взвешенного вещества, моделирование, натурный эксперимент, лабораторный эксперимент

Введение

13 декабря 2025 г., в возрасте 64 лет, ушла из жизни Ирина Петровна Чубаренко (рисунок 1) – океанолог, гидрофизик, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Атлантического отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, заведующая лабораторией физики моря. Её научный путь (Свиридов, 2026; Чубаренко и др., 2026; Зацепин, 2026) продолжался более четырёх десятилетий и охватывал широкий круг проблем физики природных водоёмов: гидродинамику прибрежных вод и

лагун, конвекцию, процессы перемешивания, взаимодействие шельфовых и открытых вод, физическую лимнологию, а в последние годы – транспорт и накопление частиц с переменными свойствами, прежде всего микропластика. Разнонаправленность этих исследований отражена в её монографиях и вкладах в монографии – по физической лимнологии (Hutter et al., 2011a, 2011b; Hutter et al., 2014), горизонтальной конвекции над подводными склонами (Чубаренко, 2010), физике лагун (Chubarenko, 2007) и динамике микропластика в морской среде (Чубаренко и др., 2021).

Научное наследие Ирины Петровны Чубаренко трудно представить в виде простого перечня исследованных ею объектов и процессов. В разные годы предметом её работ были процессы в лагунах и прибрежных зонах озёр и морей: плотностные течения, горизонтальная конвекция, каскадинг, термобар, холодный промежуточный слой Балтийского моря, циркуляция Ленгмюра, перенос взвешенного вещества и процессы льдообразования. Однако за этим разнообразием просматривается единая черта её научного мышления: **умение за конкретным наблюдаемым явлением увидеть физический механизм, выделить его как самостоятельный объект исследования и затем проследить его проявление в различных пространственно-временных масштабах**.



Рис. 1 – Научный руководитель всегда должен быть позитивно настроен, особенно во время работ! Чубаренко Ирина Петровна (1961–2025). Экспедиция по определению характеристик весеннего прогрева склоновых вод. На борту экспедиционного катера. Юго-Восточная Балтика, прибрежная зона Калининградской области, Балтийская коса, 2010 г. Фото Е. Е. Есюковой

Именно так возникло одно из главных направлений её научного творчества – исследование горизонтальной конвекции над подводными склонами. Отправной точкой стало, казалось бы, частное натурное наблюдение, полученное во время работ (с группой проф. К. Хуттера, Технический университет г. Дармштадт) в прибрежной зоне острова Майнау на Боденском озере (Германия): во время утренних измерений был обнаружен слой холодной воды у дна, хотя первоначальной задачей эксперимента было изучение поверхностного прогрева мелководной зоны. Наблюдение было опубликовано в работе об экспериментальной лимнологической кампании на Майнау (Chubarenko et al., 2003).

Для Ирины Петровны это стало не просто интересным фактом, а поводом искать объяснение и определяющий его физический механизм, который в дальнейшем был сформулирован как горизонтальный конвективный водообмен над подводным склоном и изучен в деталях, что стало заметным вкладом в развитие предшествующих работ российских и зарубежных авторов (Чубаренко, 2010а, 2010б). Пространственно неоднородный теплообмен через поверхность создаёт горизонтальный градиент температуры, который преобразуется в градиент плотности и давления и, в конечном счёте, в циркуляцию воды. Особенно важным оказывается прибрежный рельеф: мелководье реагирует на нагревание и охлаждение быстрее, чем глубоководная часть бассейна, а наклонное дно организует движение вдоль склона. Поэтому один и тот же физический механизм может проявляться как каскадинг, конвективный апвеллинг, двухслойный горизонтальный обмен или формирование термического фронта (рисунок 2).



Рис. 2 – Логическая цепочка взаимодействий, рассматриваемых в работах И. П. Чубаренко по горизонтальной конвекции

Эта концепция постепенно вышла далеко за рамки изучения отдельного озера. На основе своих работ и с использованием работ других авторов Ириной Петровной в 2009 г. была защищена докторская диссертация, в которой Чубаренко И. П. показала,

что в основе рассматриваемых процессов лежит взаимодействие трёх факторов – потока плавучести через границу раздела «вода–воздух», горизонтального градиента плотности, изменяющейся глубины и геометрии бассейна. Существенным результатом было также установление различия временных масштабов – горизонтальный температурный градиент может сформироваться достаточно быстро, тогда как соответствующая циркуляция развивается значительно медленнее. Тем самым, возникновение условий для движения и само движение оказываются различными стадиями единого процесса (Чубаренко, 2010а, 2010б; Чубаренко, Есюкова, 2008).

Важнейшим этапом этой работы стало соединение **натурных наблюдений, лабораторного эксперимента и численного моделирования**. Лабораторные исследования позволили искусственно разделить процессы, которые в природном бассейне действуют одновременно: образование температурного градиента, возникновение плотностного течения вдоль склона, формирование компенсирующей подповерхностной струи и перестройку циркуляции при переходе температуры через температуру максимальной плотности (Чубаренко, Демченко, 2008; Chubarenko, Demchenko, 2007; Chubarenko et al., 2008; Demchenko, Chubarenko, 2012). Численные расчёты (Есюкова, Чубаренко, 2007, 2008; Demchenko, Chubarenko, 2012) позволили проверить развитие этих процессов в пространстве и времени, а сопоставление с натурными наблюдениями показало, что лабораторный механизм имеет непосредственное отношение к реальным озёрным и морским системам.



Рис. 3 – Все доклады Ирины Петровны отличались завораживающей слушателей эмоциональностью и увлечённостью – доклад по горизонтальной конвекции на Международной школе-конференции «Динамика прибрежной зоны бесприливных морей» (Балтийск, 30.06.2008–05.07.2008 г.). Фото Е. Е. Есюковой

Поэтому горизонтальная конвекция в работах И. П. Чубаренко постепенно превратилась из объяснения (рисунок 3) отдельного эффекта в **универсальную физическую схему обмена между мелководной и глубокой частями природного водоёма** (рисунок 2). В дальнейшем эта схема была использована для интерпретации термобара, сезонного водообмена в Балтийском море и формирования холодного промежуточного слоя. Другой важный круг исследований – лагунная гидродинамика, циркуляция Ленгмюра, транспорт взвешенного вещества и влияние льдообразования на гидрологические характеристики – развивался по той же методологии.

Горизонтальная конвекция: от наблюдения к общему физическому механизму

Натурные наблюдения в Боденском озере стали отправной точкой исследований, в которых дифференциальный прогрев и охлаждение мелководной и глубокой частей бассейна рассматривались как источник горизонтального водообмена (Chubarenko et al., 2003). Последующее обобщение было дано в монографии «Горизонтальная конвекция над подводными склонами» и в статье, посвящённой механизму формирования и развитию горизонтального конвективного водообмена (Чубаренко, 2010а, 2010б).

Суть предложенного подхода можно представить в виде последовательности: неоднородный теплообмен через поверхность воды (а) создаёт горизонтальный градиент температуры (б), что выражается в горизонтальных градиентах плотности (в) и давления (г), которые порождают конвективную циркуляцию (д) (рисунок 2).

В прибрежной зоне этот механизм особенно эффективен. Мелководная зона быстрее реагирует на внешний теплообмен, поэтому даже пространственно однородное атмосферное воздействие способно создать неоднородное температурное поле в воде. Если дно наклонено, возникающий горизонтальный градиент плотности проецируется на склон и порождает движение **вдоль склона**. В зависимости от знака теплового воздействия (рисунок 4) это движение может быть направлено: **вниз по склону** (каскадинг); **вверх по склону** (конвективный апвеллинг); в двух направлениях в разных слоях (горизонтальный конвективный обмен); с наличием фронта (термобар) (Чубаренко и др., 2013).

В работах Ирины Петровны: **каскадинг и апвеллинг рассматривались не как два независимых явления, а как различные режимы одного физического механизма**. Изменение знака поверхностного потока плавучести приводит к изменению направления конвективного переноса (Чубаренко и др., 2013).

Особое значение имело установление пространственно-временных масштабов процесса. Развитие горизонтального конвективного обмена проходит три основные стадии: формирование горизонтального градиента плотности; возникновение и развитие циркуляции; переход к квазистационарному состоянию (Чубаренко, 2010а, 2010б). При этом величина результирующего обмена определяется, прежде всего, пространственным масштабом области, в которой формируется горизонтальный температурный градиент. Поэтому даже сравнительно небольшое различие значений температуры по горизонтали

способно обеспечить значительный перенос воды, если оно действует на большом расстоянии. Эти представления были проверены численно. В работе по моделированию выхолаживания над прибрежным склоном (Есюкова, Чубаренко, 2007) исследовалось развитие плотностной циркуляции при охлаждении поверхности. Последующие расчёты перемешивания и транспорта (Есюкова, Чубаренко, 2008) позволили перейти от собственно течения к его последствиям для переноса вещества. Тем самым численное моделирование являлось не самостоятельной ветвью исследований, а способом проверки и развития физической концепции.

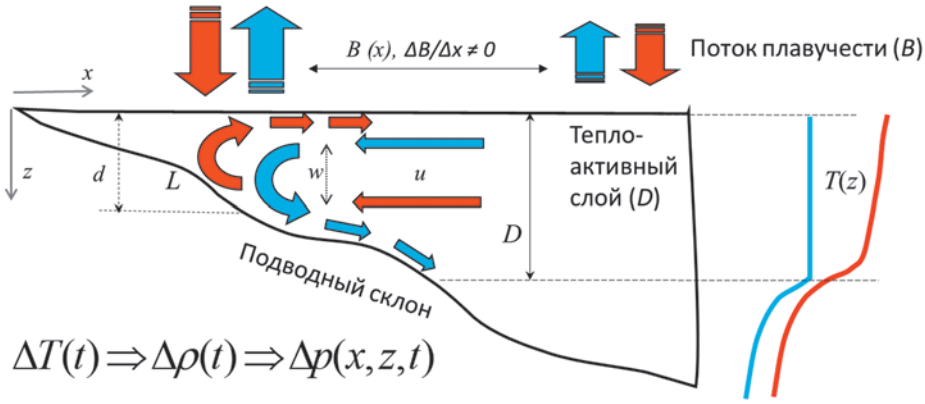


Рис. 4 – Обобщённая схема (поперечный к берегу разрез) каскадинга и дифференциального апвеллинга, возникающих, соответственно, при отрицательном (синий цвет) или положительном (красный цвет) потоке плавучести через поверхность, имеющем горизонтальный градиент. При отрицательном потоке мелководные области охлаждаются быстрее, вызывая каскадинг, а при положительном – нагреваются быстрее, инициируя дифференциальный апвеллинг (оба процесса локализованы на одинаковых глубинах, стрелки на схеме разнесены для лучшей визуализации). При этом в поверхностных и глубинных слоях возникают компенсационные течения. Справа представлены профили температуры в глубокой части бассейна, соответственно, при выхолаживании (B<0) и прогреве (B>0). (Рисунок подготовлен на основе аналогичного из докторской диссертации И. П. Чубаренко)

Каскадинг как проявление горизонтальной конвекции

Особенно ярко сформулированный механизм проявляется в каскадинге. И. П. Чубаренко подчёркивала, что каскадинг над наклонным дном не следует обязательно понимать как результат локального «обрушения» плотной воды. Он может быть непрерывным ответом всей прибрежной системы на пространственно неоднородный поток плавучести через поверхность (Chubarenko, 2008).

При охлаждении мелководная вода становится более плотной и начинает двигаться вниз по склону. Одновременно формируется компенсирующее течение в противоположном направлении в верхней части водной толщи. Поэтому каскадинг является не однонаправленным стоком воды, а частью двухслойного горизонтального обмена. В этом состоит важный физический смысл полученных результатов: движение вдоль

склона сопровождается вертикальной трансформацией профиля плотности и переносом воды из прибрежной зоны в промежуточные и глубокие слои.

Важным оказалось и понимание суточной изменчивости процесса. В работах И. П. Чубаренко, Е. Е. Есюковой (с соавторами) показано, что каскадинг может существенно изменяться в течение суток в соответствии с изменениями условий теплообмена (Чубаренко, Есюкова, 2008; Chubarenko, 2008; Chubarenko et al., 2013). Это позволило связать суточный цикл солнечного прогрева с модуляцией нисходящего потока. Днём – прогрев, а ночью – выхолаживание, которое усиливает плотностной контраст. В результате активность каскадинга может колебаться внутри суток, а эти изменения, в свою очередь, меняются по мере развития сезонного хода. Тем самым маломасштабный по времени процесс оказался связан с динамикой вод в существенно более крупном сезонном масштабе.

Натурные данные и численные эксперименты (Chubarenko et al., 2013) показали, что наиболее интенсивный горизонтальный обмен связан с ситуацией, когда термоклин упирается в склон. Это происходит потому, что одновременно присутствуют: (а) большой вертикальный градиент температуры; (б) существенный горизонтальный градиент плотности; (в) наклонная геометрия; (г) сильный контраст между надсклоновыми и более глубокими водами. Термоклин становиться частью механизма «фокусировки» горизонтальной конвекции.

Лабораторный эксперимент и термобар

Одним из любимых методов исследования И. П. Чубаренко были лабораторные эксперименты. Их принципиальная ценность заключалась в возможности разделить физические процессы, которые в природной системе накладываются друг на друга. В лабораторном бассейне с наклонным дном последовательно наблюдались горизонтальный температурный градиент, плотностное течение вдоль склона, компенсирующая его поверхностная струя и перестройка циркуляции при переходе температуры воды через «точку максимальной плотности» – температуру, при которой плотность воды максимальна (Чубаренко, Демченко, 2008; Chubarenko, Demchenko, 2007; Chubarenko et al., 2008).

Из вышеперечисленного особый интерес представлял термобар: при переходе воды через температуру максимальной плотности при охлаждении обычная связь «теплее–легче, холоднее–тяжелее» меняется на обратную. В лабораторном эксперименте было показано, что развитие циркуляции в таких условиях сопровождается последовательной перестройкой течений (Чубаренко, Демченко, 2008). Полученный результат позволил рассматривать термобар не как непроницаемую границу между водными массами, а как динамический фронт, через который возможен горизонтальный обмен.

Этот вывод получил развитие и дальше – в исследованиях структуры и обмена через этот термальный фронт (Демченко, Чубаренко, 2008; Демченко, Чубаренко, 2012;

Demchenko, Chubarenko, 2012). В частности, было показано, что «граница» термобара имеет собственную тонкую структуру и что через неё может осуществляться заметный горизонтальный перенос. Для Балтийского моря это имело принципиальное значение: сезонный термический фронт оказался не просто диагностическим признаком температурной структуры, а элементом общей системы водообмена (Демченко, Чубаренко, 2008; Демченко, Чубаренко, 2012).

Тем самым, лабораторный эксперимент выполнял в исследованиях Ирины Петровны особую функцию: он не только иллюстрировал природный процесс, но и позволял **проверить физическую причинность**. Наблюдаемый в природе эффект сначала воспроизводился в контролируемых условиях, затем описывался численно, и после этого к нему возвращались для интерпретации натурных данных.

От склонового обмена к холодному промежуточному слою Балтийского моря

Важным шагом исследований Ирины Петровны стало применение концепции горизонтальной конвекции к крупному морскому бассейну. В традиционной схеме холодный промежуточный слой в большом озере или шельфовом море рассматривается главным образом как результат зимнего вертикального перемешивания. И. П. Чубаренко вместе со своей аспиранткой Н. Ю. Демченко предложили дополнить эту картину механизмом формирования холодной воды на обширных мелководных и промежуточных глубинах и её последующим переносом в более глубокие районы посредством каскадинга (Chubarenko, Demchenko, 2010).

В этой схеме (Chubarenko, Demchenko, 2010) прибрежный шельф, имеющийся и в Балтийском, и в Каспийском морях (рисунок 5), выступает как своеобразный генератор холодной и более плотной воды. В процессе сезонного выхолаживания мелководье реагирует быстрее глубокой части моря; образовавшаяся плотная вода начинает двигаться по склону и, достигнув соответствующей изопикны, распространяется в промежуточном слое. Таким образом, источник холодной воды и место её последующего накопления разделены пространственно.

Работы по сезонному термическому фронту Балтийского моря (Демченко, Чубаренко, 2008; Демченко, Чубаренко, 2012) дополняют эту картину, показывая, что температурная структура моря формируется взаимодействием процессов различного масштаба. При этом сами авторы подчёркивали, что для сложного бассейна Балтийского моря нельзя свести образование холодного промежуточного слоя к одному механизму. Горизонтальная конвекция является частью совокупности процессов, в которую ещё входят и вертикальная конвекция, и ветровое воздействие, и бассейновая циркуляция (Chubarenko, Drmchenko, 2010). Именно поэтому, а также из-за сложности конфигурации и структуры глубин Балтийского моря, вопрос о механизмах формирования холодного промежуточного слоя в Балтике пока ещё остаётся дискуссионным.

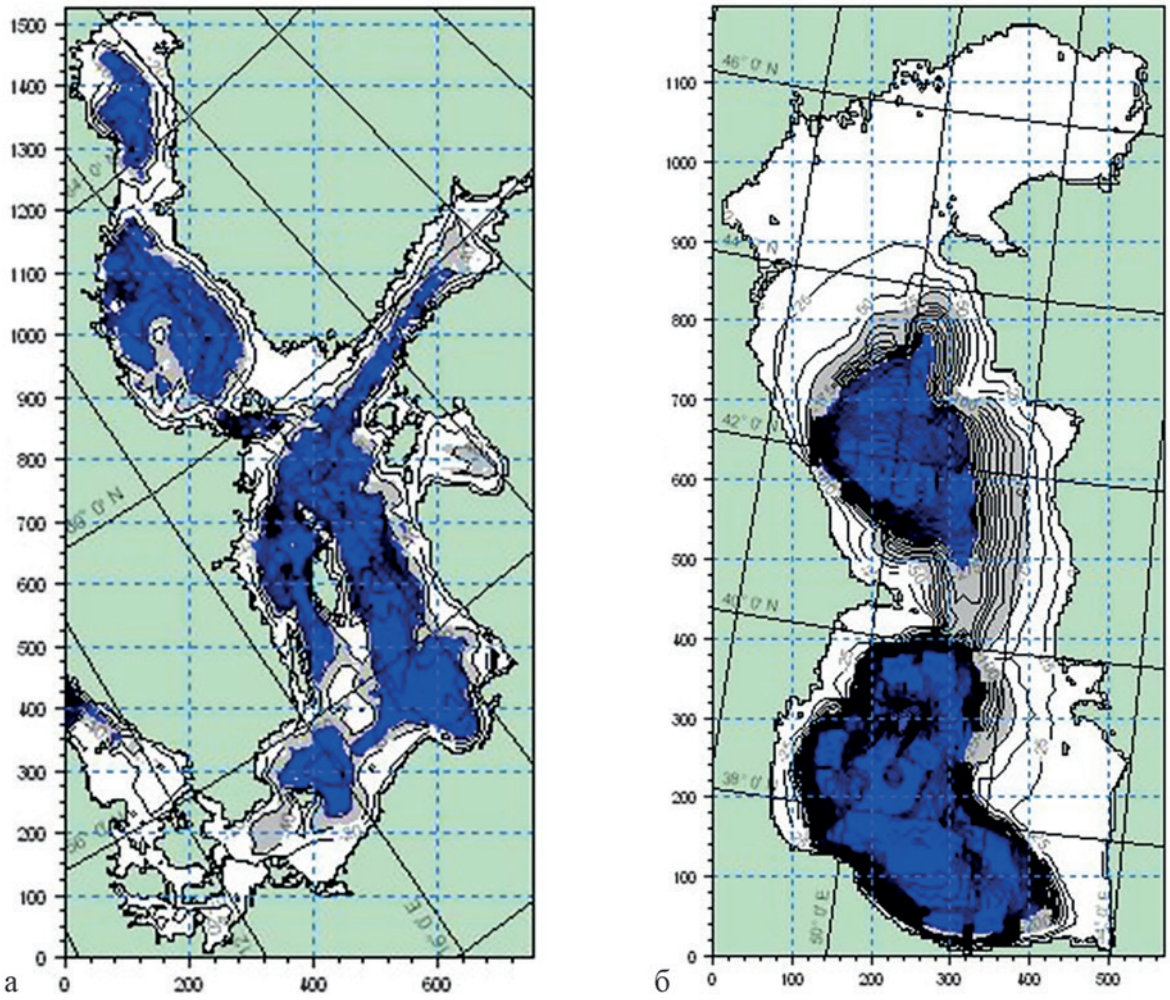


Рис. 5 – Поля глубин Балтийского (**а**) и Каспийского (**б**) морей: белым цветом показаны области, где осеннее-зимняя вертикальная конвекция достигает дна и формируются горизонтальные градиенты температуры (т. е. возникают условия образования холодных вод, которые стекают со склонов); тёмной заливкой – области, где вертикальное перемешивание не достигает дна (более 60 и 300 м, соответственно); светло-серой – глубины (40–60 м и 80–300 м), захватываемые вертикальной конвекцией только в северной части морей. (Рисунок взят из докторской диссертации И. П. Чубаренко)

Это особенно характерный пример реалистичного подхода Ирины Петровны – предложенный механизм не превращался в универсальное объяснение «всего». Напротив, его роль определялась в системе взаимодействующих процессов.

Лагуна как физическая система

До того, как углублённо заниматься горизонтальной конвекцией как физическим механизмом, Ирина Петровна активно работала по лагунной тематике. И здесь в её работах явно прослеживается путь от задач конкретного водоёма к общей физической картине.

В работе по моделированию антропогенного изменения солёности Калининградского-Вислинского залива Балтийского моря канал, связывающий залив с морем, рассматривался как гидравлический регулятор водообмена (Chubarenko, Tchepikova, 2001). Численные расчёты показали, что умеренное изменение поперечного сечения входного канала (пролива) оказывает сравнительно небольшой эффект на среднюю солёность лагуны, тогда как изменение общей схемы связности бассейна – например, появление второго пролива – способно радикально перестроить циркуляцию. Эта задача о втором выходе из лагуны стала в 2000-х актуальной в связи с появившимися планам властей Польши перерезать Вислинскую косу искусственным каналом и организовать второй проход между Калининградским–Вислинским заливом и Балтийским морем.

При создании второго пролива между лагуной и Балтикой возникает фактически новая схема циркуляции: вода получает возможность проходить через лагуну между двумя разнесёнными проливами. Модель показывает, что среднегодовая солёность всего залива может возрасти примерно на 40 %, а в отдельных южных районах – более чем вдвое. В центральной части увеличение достигает 40–60 %, а в юго-западной – порядка 125 %. Особенно важен физический смысл результата: при двух входных каналах залив лагунного типа начинает вести себя уже не как относительно изолированный водоём, а как система, сильно управляемая проточно-обменным режимом между двумя проливами, связывающими её с морем.

В последующих исследованиях был сделан шаг к систематическому рассмотрению этих процессов, и лагуна понималась уже как сложная природная система, в которой одновременно действуют ветер, волны, фоновые течения, водообмен с морем, плотностные интрузии, теплообмен через поверхность и процессы льдообразования (Chubarenko, 2007). Ирина Петровна относилась к лагунам как к естественным лабораториям для исследования процессов перемешивания и транспорта вещества. Здесь ограничения, создаваемые мелководьем и берегами, позволяют наблюдать физические эффекты, которые в открытом море могли быть скрыты более сложной динамикой.

Циркуляция Ленгмюра в мелководной лагуне

Одним из наиболее оригинальных результатов этого направления стало исследование циркуляции Ленгмюра в мелководных лагунах (Chubarenko et al., 2010), классическая картина которой представляется обычно для глубокого и практически неограниченного бассейна. В лагуне к ветровому воздействию добавляются дно, берега и фоновые течения, вследствие чего структура циркуляции существенно изменяется.

Натурные наблюдения в Калининградском–Вислинском заливе и лагуне Дарсс–Цингст показали, что при скоростях ветра порядка 5–6 м/с на поверхности возникают хорошо различимые пенные полосы – зоны конвергенции, где скапливается пена и плавающий мусор. Поперечный размер циркуляционных ячеек (ролов) составлял примерно 0,65–1,5 местной глубины, с наиболее выраженным максимумом около

отношения 1:1 (Chubarenko et al., 2010). Т. е. ролы при развитом ветре захватывали всю глубину лагуны.

Важным результатом оказалось, что на поверхности не наблюдается пространственно однородная картина пенных полос (зоны конвергенции) и сликов (зоны дивергенции). Они сливаются или раздваиваются – возникают так называемые Y-слияния, ориентированные как по направлению ветра, так и против него, индикатирующие слияние либо раздваивание ролов. Причём эта картина настолько «живая», что за короткий промежуток времени (5–10 минут) видимая картина полос перестраивается полностью, что является отражением хаотичного процесса формирования–распада–слияния циркуляционных валов в толще воды. Т. е. циркуляция Ленгмюра в мелководных водоёмах не является статичной, а представляет собой динамически перестраивающуюся пространственную структуру, что обеспечивает один из внутренних механизмов горизонтальной дисперсии любой примеси. Однажды соседствующие частицы, попадая то в один, то в другой рол, в итоге удаляются друг от друга.

Таким образом, было показано (Chubarenko et al., 2010), что мелководная циркуляция Ленгмюра представляет собой особый гидродинамический режим, а не просто уменьшенную копию океанического варианта. В ограниченном бассейне она становится элементом сложной трёхмерной системы движения воды, захватывающего всю толщу до дна.

От перемешивания воды к транспорту частиц

Важным шагом стал анализ влияния циркуляции Ленгмюра на поведение примесей. Ирина Петровна рассматривала её уже не только как механизм перемешивания воды, но и как механизм **организации траекторий взвешенных частиц** (Chubarenko et al., 2010; Dethleff et al., 2009).

Различные частицы обладают разной плавучестью и разным временем пребывания в циркуляционной ячейке (Chubarenko et al., 2010). Циркуляция Ленгмюра эффективно перемешивает частицы различной крупности и плавучести именно потому, что разные частицы следуют различным траекториям внутри циркуляционных валов (рисунок 6). Это создаёт зоны повышенной вероятности встречи частиц различного происхождения и размера.

Именно такой эффект возможен при взаимодействии минеральной взвеси и внутриводного льда. В лабораторных экспериментах с циркуляцией Ленгмюра была исследована винтовая структура течения и движение ледяных кристаллов (Dethleff et al., 2009). Экспериментальные данные показали, что концентрация осадочного материала в ледяном сале может существенно превышать его концентрацию в окружающей воде: в рассматриваемом эксперименте – 29,3 против 13,4 мг/л. При этом преимущественно захватывались тонкодисперсные частицы.

Предложенное Ириной Петровной объяснение (Dethleff et al., 2009) **гидродинамически обусловленного отбора частиц по размеру** заключалось в том, что циркуляция Ленгмюра вызывает взвешивание донного материала; внутриводный лёд и частицы

донного осадка вовлекаются в движение по циркуляционным ячейкам (рисунок 6); лёд и минеральные частицы многократно сближаются; растущие ледяные агрегаты захватывают часть взвеси. Таким образом, гидродинамика непосредственно влияет на формирование осадочно-насыщенного льда.

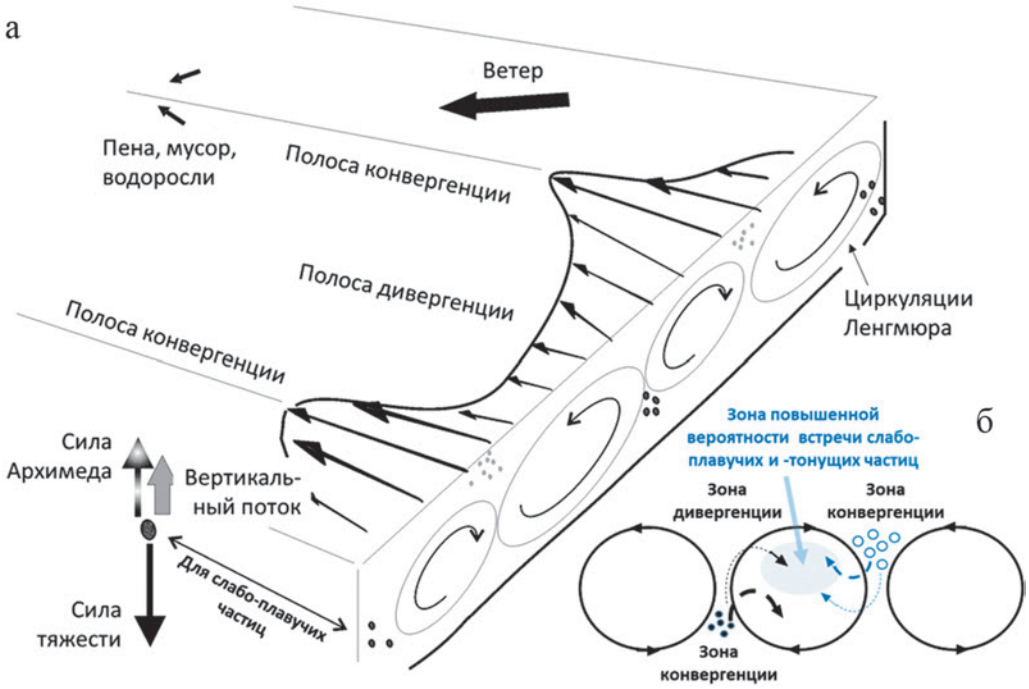


Рис. 6 – Идеализированное изображение циркуляций Ленгмюра (**а**) с указанием сил, действующих на частички в придонном слое в зоне придонной конвергенции, и схема (**б**), иллюстрирующая идею возникновения зоны повышенной вероятности встречи кристаллов льда и частиц осадка (чёрные стрелки пунктиром – возможные траектории частиц осадка, голубые стрелки – частиц льда, толщина голубых стрелок пропорциональна степени плавучести частиц, толщина чёрных стрелок – наоборот).
Рисунок подготовлен на основе (Chubarenko et al., 2010)

Эти работы иллюстрируют эволюцию интереса Ирины Петровны от чистой гидродинамики в сторону изучения поведения **вещества, переносимого водой**. В дальнейшем этот интерес трансформировался в целое направление – рассмотрение физических свойств частиц микропластика и переноса этих частиц в морской среде (см. выпуск № 4 настоящего журнала за 2026 г.).

Льдообразование как источник конвекции

Ещё один пример интереса Ирины Петровны к динамике **вещества, переносимого водой,** связан с процессами замерзания. На первый взгляд образование льда в природном водоёме должно снижать его динамический отклик за счёт экранирования водной толщи от атмосферного воздействия. Однако при замерзании солоноватой

воды часть соли не включается в кристаллическую решётку льда, а выделяется в воду. Возникает более солёная и, следовательно, более плотная вода, которая начинает опускаться вниз.

Для мелководной лагуны этот механизм особенно важен. В Калининградском–Вислинском заливе со средней глубиной порядка 2,7 м даже сравнительно небольшое количество соли, вытесняемой при замерзании обширной поверхности залива, может изменить солёность воды в объёме неглубокого залива. Оценки, приведённые И. П. Чубаренко, показывают, что в характерной зимней ситуации увеличение средней солёности вследствие льдообразования может достигать примерно 9–11 %, а в экстремальном случае – около 18 % (Chubarenko et al., 2004).

Тем самым ледяной покров оказывается не просто твёрдой границей, а **активным источником отрицательной плавучести**. В определённых условиях это способно изменить даже направление придонного обмена лагуны с морем. То есть зимой лагуна потенциально может стать источником более плотной воды для моря.

Таким образом, и здесь исходный природный эффект – изменение солёности при замерзании – был рассмотрен как более широкая задача: каким образом фазовый переход на поверхности изменяет плотностную структуру и запускает циркуляцию всей мелководной системы.

Что объединяет представленные направления исследований?

Если рассматривать результаты И. П. Чубаренко не по отдельным публикациям, а как единую научную траекторию, становится заметна последовательность, проходящая через практически все рассмотренные здесь темы.

Отправной точкой был результат **наблюдений**: холодная вода у дна, изменение температуры у берега, каскадирующее течение, необычная структура поверхностных полос, повышенная концентрация взвеси во льду.

Затем следовал поиск **физического механизма**: горизонтальная конвекция, плотностной поток по склону, перестройка циркуляции около температуры максимальной плотности, взаимодействие ветровой циркуляции с мелководьем, селективное движение частиц или солевая конвекция при замерзании.

Следующим этапом во многих задачах была – **экспериментальная проверка**. Использовались и лабораторный бассейн с наклонным дном, и натурные CTD-измерения, и наблюдения поверхностных структур (рисунок 7); эксперименты с частицами и льдом позволяли проверить, действительно ли предполагаемый механизм способен воспроизвести наблюдаемый эффект.

Затем следовало **численное моделирование**, позволявшее изменить масштаб и параметры задачи, проследить её развитие во времени и определить роль отдельных факторов.

И наконец, идея о локальном механизме помогала осознанию эффекта в природной системе, рассматривалась как возможный фактор формирования промежуточных

вод, водообмена лагуны с морем, вертикального транспорта вещества, перестройки солёности или сезонной динамики бассейна.

В этом смысле очень важно подчеркнуть не только конкретный набор результатов, но и методический подход, которому следовала Ирина Петровна: **от наблюдения – к механизму, от механизма – к эксперименту, от эксперимента – к модели и от модели – к пониманию работы природного бассейна в целом**.



Рис. 7 – В поисках интересных явлений на поверхности моря – границы уходящей в море тёплой поверхностной струи. Экспедиция по определению характеристик весеннего прогрева склоновых вод (Юго-Восточная Балтика, прибрежная зона Калининградской области, Балтийская коса, 2010 г.). Фото Е. Е. Есюковой

Представленный выше пересказ никак не может претендовать на исчерпывающее изложение. Все работы Ирины Петровны нужно читать в подлиннике независимо от того, написаны ли они на русском или английском языке[1]. Её оригинальные рассуждения гораздо глубже и богаче, они, кроме числовых оценок, которых я совсем не касался, содержат множество комментариев по принципиальным вопросам и отдельным моментам физики процессов.

[1] Кстати, работы на английском языке по горизонтальной конвекции и гидродинамике лагун Ирина Петровна писала самостоятельно, т. к. развитых автоматических переводчиков ещё не было. Учитывая, что в школе она учила немецкий, а английский ей пришлось осваивать с нуля, то те справедливые комплименты, которые давали наши зарубежные коллеги, что у неё самый грамотный английский в нашей научной группе, дорогого стоят. И она их справедливо заслужила.

Заключение

Работы Ирины Петровны Чубаренко показывают, насколько плодотворным может быть физический взгляд на природный водоём. Озеро, море или лагуна в её работах никогда не выступали просто местом, где измеряются температура и скорость течения. Это была динамическая система, в которой особенности рельефа, теплообмен с атмосферой, ветер, свойства воды, лёд и перенос вещества взаимодействуют и порождают наблюдаемые структуры.

Главным примером такого подхода стала горизонтальная конвекция над подводными склонами. Начавшись с наблюдения в Боденском озере, эта задача привела к формированию общего представления о дифференциальном теплообмене как источнике горизонтального водообмена, к объяснению каскадинга и конвективного апвеллинга, к лабораторному и численному исследованию термобара и далее – к интерпретации формирования холодных промежуточных вод Балтийского моря.

Не менее характерны её интересы к гидродинамике лагун. Здесь от конкретной задачи отдельного водоёма (Калининградского-Вислинского залива Балтийского моря) Ирина Петровна перешла к рассмотрению лагуны как сложной физической системы. Исследования циркуляции Ленгмюра показали самостоятельность мелководного режима; исследования взвешенных частиц – способность циркуляции организовывать их трёхмерные траектории; исследования льдообразования – способность фазового перехода непосредственно запускать конвективный обмен.

Во всех этих случаях проявлялась одна и та же черта её научного таланта: **умение увидеть в частном природном явлении физический закон или механизм, который работает на более широком классе систем**. Именно поэтому результаты И. П. Чубаренко сохраняют значение не только как описание отдельных процессов в Балтийском море, озёрах или лагунах, но и как элементы общей физики природных водоёмов.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность редакции и анонимным рецензентам за ценные советы, позволившие существенно улучшить рукопись. Отдельная искренняя благодарность соратникам Ирины Петровны, сотрудникам лаборатории физики моря – Есюковой Е. Е. и Лобчук О. И. за помощь с материалом, а также нашим дочерям, Голубевой О. Б. и Степановой Н. Б. за ценные советы – как в едином стиле представить подход, которому всегда следовала Ирина Петровна в свой работе и обучении других.

Список литературы

1. *Демченко Н. Ю., Чубаренко И. П.* О сезонном термическом структурном фронте в Балтийском море // Естественные и технические науки. 2008. № 5. С. 319–321. EDN: JWWVQT
2. *Демченко Н. Ю., Чубаренко И. П.* Пространственно-временная изменчивость характеристик термического фронта в Балтийском море в 2010–2011 гг. // Океанология. 2012. Т. 52. № 6. С. 790–797. EDN: PNPNBH
3. *Есюкова Е. Е., Чубаренко И. П.* Выхолаживание над прибрежным склоном: результаты численного моделирования // Физические проблемы экологии (экологическая физика). 2007. № 14. С. 143–152.
4. *Есюкова Е. Е., Чубаренко И. П.* Результаты численного моделирования перемешивания и транспорта над прибрежным склоном при сезонном выхолаживании с поверхности // Известия КГТУ. 2008. № 13. С. 51–54. EDN: OBFVAX
5. *Зацепин А. Г.* Ученый, определивший путь развития новой области // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 1. С. 182–188. EDN: VARHGS. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).11
6. *Свиридов С. А.* Памяти Ирины Петровны Чубаренко // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 1. С. 163. EDN: KVUWUC
7. *Чубаренко Б. В., Есюкова Е. Е., Степанова Н. Б.* Ирина Петровна Чубаренко – океанолог, человек, учитель // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 1. С. 164–181. EDN: SZSIXB. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).10
8. *Чубаренко И. П., Афон В. В., Демченко Н. Ю.* О гипотезе конвективного формирования летнего прибрежного апвеллинга // Физические проблемы экологии (экологическая физика): Сб. науч. тр. М.: МАКС Пресс, 2007. № 14. С. 402–410.
9. *Чубаренко И. П., Демченко Н. Ю.* Лабораторное моделирование структуры термобара и связанной с ним циркуляции в бассейне с наклонным дном // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 349–361. EDN: ILAIMF
10. *Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е.* Каскадинг в прибрежной зоне озера при суточных колебаниях условий теплообмена // Естественные и технические науки. 2008. № 4. С. 206–211. EDN: JUZBIV
11. *Чубаренко И. П.* Горизонтальная конвекция над подводными склонами. Калининград: Терра Балтика, 2010а. 256 с. EDN: UBCINF
12. *Чубаренко И. П.* Горизонтальный конвективный водообмен над подводным склоном: механизм формирования и анализ развития // Океанология. 2010б. Т. 50. № 2. С. 184–193. EDN: LOJDNJ
13. *Чубаренко И. П., Афон В. В., Чугаевич В. Я., Кречик В. А.* Динамика вод над склоном при интенсивном летнем прогреве // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 66–78. EDN: PUJIDJ
14. *Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И., Лобчук О. И., Исаченко И. А., Буканова Т. В.* Микропластик в морской среде. Москва: Научный мир, 2021. 520 с. EDN: ROUYQE
15. *Chubarenko I., Tchepikova I.* Modelling of man-made contribution to salinity increase into the Vistula Lagoon (Baltic Sea) // Ecological Modelling. 2001. Vol. 138. P. 87–100. EDN: LGTPVR. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00395-1
16. *Chubarenko I., Chubarenko B., Bauerle E., Wang Y., Hutter K.* Autumn physical limnological experimental campaign in the Island Mainau littoral zone of Lake Constance // J. Limnol. 2003. Vol. 62. No. 1. P. 115–119. EDN: RNQYQX. https://doi.org/10.4081/jlimnol.2003.115

17. *Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Hutter K.* Impact of the ice formation on seasonal salinity increasing the Vistula Lagoon // Proceedings of the VI Scientific Workshop on High Resolution Operational Model of the Baltic Sea. St. Petersburg, 2004. P. 58–68.
18. *Chubarenko I., Demchenko N., Hutter K.* Horizontal convection induced by surface cooling over incline: laboratory experiments. In: Selected Papers of International Conference “Fluxes and Structures in Fluids”. Moscow: Institute for Problems in Mechanics of the RAS, 2006. P. 89–96.
19. *Chubarenko I., Demchenko N.* Coastal cooling/heating events based on laboratory experiments // Acta Geophysica. 2007. Vol. 55. No. 1. P. 56–64. EDN: LKQZIJ. https://doi.org/10.2478/s11600-006-0038-3
20. *Chubarenko I.* Physical Processes in Lagoons. In: Assessment of the Fate and Effects of Toxic Agents on Water Resources / Eds. I. E. Gönenç, V. G. Koutitonsky, B. Rashleigh. Springer, 2007. P. 55–81. EDN: UJTXLH
21. *Chubarenko I.* Cascading considered as the result of horizontal convection above sloping bottom. In: Selected Papers of International Conference “Fluxes and Structures in Fluids”. St. Petersburg, 2008. P. 59–64.
22. *Chubarenko I., Chubarenko B., Esiukova E., Baudler H.* Mixing by Langmuir circulation in shallow lagoons // Baltica. 2010. Vol. 23. No. 1. P. 13–24. EDN: MXPCMP
23. *Chubarenko I., Demchenko N.* On contribution of horizontal and intra-layer convection to the formation of the Baltic Sea cold intermediate layer // Ocean Science. 2010. Vol. 6. P. 285–299. EDN: MXPHYN. https://doi.org/10.5194/os-6-285-2010
24. *Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Stepanova N. B., Chubarenko B. V., Baudler H.* Down-slope cascading modulated by day/night variations of solar heating // Journal of Limnology. 2013. Vol. 72 (2). P. 240–252. EDN: RFGEMP. https://doi.org/10.4081/jlimnol.2013.e19
25. *Demchenko N., Chubarenko I.* Horizontal exchange across the thermal bar front: laboratory and numerical modeling // Water Quality Research Journal. 2012. Vol. 47. No. 3–4. P. 436–450. EDN: RGGGDB. https://doi.org/10.2166/wqrjc.2012.037
26. *Dethleff D., Kempema E. W., Koch R., Chubarenko I.* On the helical flow of Langmuir circulation – approaching the process of suspension freezing // Cold Regions Science and Technology. 2009. Vol. 56. P. 50–57. EDN: LLVFJR. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.10.002
27. *Hutter K., Wang Y., Chubarenko I.* Physics of lakes. Vol. 1: Foundation of the mathematical and physical background. Publisher: Springer Berlin Heidelberg, 2011a. 434 p. ISBN 978-3-642-15177-4. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15178-1
28. *Hutter K., Wang Y., Chubarenko I.* Physics of lakes. Vol. 2: Lakes as oscillators. Springer Berlin Heidelberg, 2011b. 646 p. ISBN 978-3-642-19111-4. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19112-1
29. *Hutter K., Wang Y., Chubarenko I.* Physics of lakes. Vol. 3: Methods of understanding lakes as components of the geophysical environment. Springer Berlin Heidelberg, 2014. 605 p. ISBN: 978-3-319-00472-3. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00473-0

Статья поступила в редакцию 20.08.2026, одобрена к печати 22.09.2026.
Для цитирования: *Чубаренко Б. В.* Дар увидеть физику природного явления: избранные результаты И. П. Чубаренко // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 3. С. 3–23. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).1

THE GIFT OF PERCEIVING THE PHYSICS OF A NATURAL PHENOMENON: SELECTED FINDINGS OF IRINA CHUBARENKO

B. V. Chubarenko

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: boris.chubarenko@atlantic.ocean.ru, chuboris@mail.ru

The paper reviews the principal scientific results of **Irina Chubarenko** in the field of the physics of natural water bodies. Her studies of horizontal convection over underwater slopes, cascading and convective upwelling, the seasonal thermal front of the Baltic Sea, formation of the cold intermediate layer, lagoon hydrodynamics, Langmuir circulation, suspended-particle transport, and the effects of ice formation on water exchange are considered as interconnected manifestations of a common physical approach. Its central feature was the transition from an observed natural phenomenon to identification of the physical mechanism responsible for it, followed by verification using field observations, laboratory experiments, and numerical modelling, and finally by analysis of the consequences of this mechanism at larger spatial and temporal scales. Particular attention is given to horizontal convective water exchange generated by spatially heterogeneous surface heat fluxes and manifested as downslope cascading, convective upwelling, and thermal fronts. Laboratory studies of the thermal bar and horizontal exchange across its front are considered together with the application of the slope-convection concept to the formation of the Baltic Sea cold intermediate layer. Lagoon studies demonstrate how shallow-water dynamics controls water exchange, Langmuir circulation, and suspended-particle transport, including interactions between particles and frazil ice. The role of ice formation as a source of negative buoyancy and a factor controlling seasonal changes in density structure and water exchange is also discussed. The methodological unity of Irina Chubarenko's research, aimed at developing a physical understanding of processes in natural water bodies, is discussed.

Keywords: horizontal convective water exchange, cascading, convective upwelling, thermobar, cold intermediate layer, lagoon, Langmuir circulation, suspended matter transport, modeling, field experiment, laboratory experiment

Acknowledgements: The author wishes to express deep gratitude to the editorial team and the anonymous reviewers for their valuable advice, which significantly improved the manuscript. Special and sincere thanks go to Irina's colleagues at the Laboratory of Marine Physics – Elena Esiukova and Olga Lobchuk – for their assistance with the material, as well as to our daughters, Olga Golubeva and Natalya Stepanova, for their valuable advice on how to present, in a unified style, the approach that Irina Chubarenko always followed in her own work and in teaching others.

References

1. Chubarenko, B. V., E. E. Esiukova, and N. B. Stepanova, 2026: Irina Petrovna Chubarenko – okeanolog, chelovek, uchitel' (Irina Petrovna Chubarenko – oceanologist, person, teacher). *Journal of Oceanological Research*, **54** (1), 164–181, EDN: SZSIXB, https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).10

2. Chubarenko, I. and I. Tchepikova, 2001: Modelling of man-made contribution to salinity increase into the Vistula Lagoon (Baltic Sea). *Ecological Modelling*, **138**, 87–100, EDN: LGTPVR, https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00395-1
3. Chubarenko, I., B. Chubarenko, E. Bäuerle, Y. Wang, and K. Hutter, 2003: Autumn physical limnological experimental campaign in the Island Mainau littoral zone of Lake Constance. *Journal of Limnology*, **62** (1), 115–119, EDN: RNQYQX, https://doi.org/10.4081/jlimnol.2003.115
4. Chubarenko, I. P., E. E. Esiukova, and K. Hutter, 2004: Impact of the ice formation on seasonal salinity increasing the Vistula Lagoon. *Proceedings of the VI Scientific Workshop on High Resolution Operational Model of the Baltic Sea*, St. Petersburg, 58–68.
5. Chubarenko, I., N. Demchenko, and K. Hutter, 2006: Horizontal convection induced by surface cooling over incline: laboratory experiments. *Selected Papers of International Conference "Fluxes and Structures in Fluids*", Moscow, Institute for Problems in Mechanics of the RAS, 89–96.
6. Chubarenko, I., 2007: Physical Processes in Lagoons. In: *Assessment of the Fate and Effects of Toxic Agents on Water Resources*. Gönenç, I. E., V. G. Koutitonsky, and B. Rashleigh, [Eds]. Springer, 55–81, EDN: UJTXLH
7. Chubarenko, I. and N. Demchenko, 2007: Coastal cooling/heating events based on laboratory experiments. *Acta Geophysica*, **55** (1), 56–64, EDN: LKQZIJ, https://doi.org/10.2478/s11600-006-0038-3
8. Chubarenko, I. P., V. V. Afon, and N. Yu. Demchenko, 2007: O gipoteze konvektivnogo formirovaniya letnego pribrezhnygo apvellenga (On the hypothesis of convective formation of summer coastal upwelling). *Fizicheskie problemy ekologii (ekologicheskaya fizika)*, **14**, 402–410.
9. Chubarenko, I., 2008: Cascading rassmatrivaemyi kak rezultat gorizontalnoi konvektsii nad naklonnym dnom (Cascading considered as the result of horizontal convection above sloping bottom). *Selected Papers of International Conference "Fluxes and Structures in Fluids"*, St. Petersburg, 59–64.
10. Chubarenko, I. P. and N. Yu. Demchenko, 2008: Laboratornoe modelirovanie struktury termobara i svyazannoi s nim tsirkulyatsii v basseine s naklonnym dnom (Laboratory modelling of the thermal bar structure and associated circulation in a basin with an inclined bottom). *Oceanology*, **48** (3), 349–361, EDN: ILAIMF
11. Chubarenko, I. P. and E. E. Esiukova, 2008: Kaskading v pribrezhnoi zone ozera pri sutochnyh kolebaniyah uslovii teploobmena (Cascading in the coastal zone of a lake under diurnal variations in heat-exchange conditions). *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, **4**, 206–212, EDN: JUZBIV
12. Chubarenko, I. P., 2010a: *Gorizontalnaya konvektsiya nad podvodnymi sklonami (Horizontal convection above underwater slopes)*. Kaliningrad, Terra Baltica, 256 p., EDN: UBCINF
13. Chubarenko, I. P., 2010b: Gorizontalnyi konvektivnyi vodoobmen nad podvodnym sklonom: mekhanizm formirovaniya i analiz razvitiya (Horizontal convective water exchange above an underwater slope: mechanism of formation and analysis of development). *Oceanology*, **50** (2), 184–193, EDN: LOJDNJ
14. Chubarenko, I., B. Chubarenko, E. Esiukova, and H. Baudler, 2010: Mixing by Langmuir circulation in shallow lagoons. *Baltica*, **23** (1), 13–24, EDN: MXPCMP
15. Chubarenko, I., and N. Demchenko, 2010: On contribution of horizontal and intra-layer convection to the formation of the Baltic Sea cold intermediate layer. *Ocean Science*, **6**, 285–299, EDN: MXPHYN, https://doi.org/10.5194/os-6-285-2010
16. Chubarenko, I. P., E. E. Esiukova, N. B. Stepanova, B. V. Chubarenko, and H. Baudler, 2013: Down-slope cascading modulated by day/night variations of solar heating. *Journal of Limnology*, **72** (2), 240–252, EDN: RFGEMP, https://doi.org/10.4081/jlimnol.2013.e19

17. Chubarenko, I. P., V. V. Afom, E. Chugaevich, and V. A. Krecik, 2013: Dinamika vod nad sklonom pri intensivnom letnem progreve (Water dynamics above a slope under intensive summer heating). *Meteorologiya i gidrologiya*, **1**, 66–78, EDN: PUJIDJ
18. Chubarenko, B. V., E. E. Esiukova, T. V. Hatmullina, O. I. Lobchuk, I. A. Isachenko, and T. V. Bukanova, 2021: Mikroplastik v morskoi srede (Microplastics in the marine environment). Moscow, Nauchnyi Mir, 520 p., EDN: ROUYQE
19. Demchenko, N. Yu. and I. P. Chubarenko, 2008: O sezonnom termicheskom strukturnom fronte v Baltiiskom more (On the seasonal thermal structural front in the Baltic Sea). *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, **5**, 195–197, 319–321, EDN: JWWVQT
20. Demchenko, N. Yu. and I. P. Chubarenko, 2012: Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost kharakteristik termicheskogo fronta v Baltiiskom more v 2010–2011 gg. (Spatiotemporal variability of thermal front characteristics in the Baltic Sea in 2010–2011). *Oceanology*, **52** (6), 790–797, EDN: PNPNBH
21. Demchenko, N. and I. Chubarenko, 2012: Horizontal exchange across the thermal bar front: laboratory and numerical modeling. *Water Quality Research Journal*, **47** (3–4), 436–450, EDN: RGGGDB, https://doi.org/10.2166/wqrjc.2012.037
22. Dethleff, D., E. W. Kempema, R. Koch, and I. Chubarenko, 2009: On the helical flow of Langmuir circulation – approaching the process of suspension freezing. *Cold Regions Science and Technology*, **56**, 50–57, EDN: LLVFJR, https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.10.002
23. Esiukova, E. E. and I. P. Chubarenko, 2007: Vykholazhivanie nad pribrezhnum sklonom: rezultaty chislennogo modelirovaniya (Cooling over a coastal slope: results of numerical modelling). *Fizicheskie problemy ekologii (ekologicheskaya fizika)*, **14**, 143–152.
24. Esiukova, E. E. and I. P. Chubarenko, 2008: Rezultaty chislennogo modelirovaniya peremeshivaniya i transporta nad pribrezhnum sklonom pri sezonnom vykholazhivanii s poverkhnosti (Results of numerical modelling of mixing and transport over a coastal slope under seasonal surface cooling). *Izvestiya KGTU*, **13**, 51–54, EDN: OBFVAX
25. Hutter, K., Y. Wang, and I. Chubarenko, 2011: *Physics of Lakes. Vol. 1: Foundation of the Mathematical and Physical Background*. Springer Berlin Heidelberg, 434 p., https://doi.org/10.1007/978-3-642-15178-1
26. Hutter, K., Y. Wang, and I. Chubarenko, 2011: *Physics of Lakes. Vol. 2: Lakes as Oscillators*. Springer Berlin Heidelberg, 646 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19112-1
27. Hutter, K., Y. Wang, and I. Chubarenko, 2014: *Physics of Lakes. Vol. 3: Methods of Understanding Lakes as Components of the Geophysical Environment*. Springer Berlin Heidelberg, 605 p., https://doi.org/10.1007/978-3-319-00473-0
28. Sviridov, S. A., 2026: Pamyati Iriny Petrovny Chubarenko (In memory of Irina Petrovna Chubarenko). *Journal of Oceanological Research*, **54** (1), 163, EDN: KVUWUC
29. Zatsepin, A. G., 2026: Uchenyi, opredelivshii put razvitiya novoi oblasti issledovanii (A scientist who determined the development of a new field of research). *Journal of Oceanological Research*, **54** (1), 182–188, EDN: VARHGS, https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).11

Subbmitted 20.08.2026, accepted 22.09.2026.
For citations: Chubarenko, B. V., 2026: The gift of perceiving the physics of a natural phenomenon: selected findings of Irina Chubarenko. *Journal of Oceanological Research*, **54** (3), 3–23, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).1

ISSN (online): 2587-9634 / ISSN (print): 1564-2291
Океанологические исследования. 2026. Том 54. № 3. С. 3–23

洞察自然现象物理本质的天赋：I. P. CHUBARENKO 的主要研究成果

B. V. Chubarenko

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编：*117997, Russia,*
电子邮件：*boris.chubarenko@atlantic.ocean.ru, chuboris@mail.ru*

本文综述了 I. P. Chubarenko 在天然水体物理学领域的主要科研成果。她的研究方向多样 - 水下斜坡上方的水平对流、级联过程、对流上升流与波罗的海季节性温度锋、冷中间层的形成、潟湖水动力学、朗缪尔环流、悬浮物输运以及结冰对水体交换的影响 - 这些研究被视为统一物理方法的相互关联体现。该方法的核心在于：从观察到的自然现象出发，揭示其主导机制，通过现场实验、实验室实验和数值模拟验证所提出的解释，进而将机制的作用追溯至更大时空尺度的自然系统。研究特别关注由与表面热交换的空间非均一性引起的水平对流水体交换，及其以级联过程、对流上升流和温度锋形式的表现。文中还探讨了温度壁及其锋面水平交换的实验室模拟结果，以及斜坡对流概念在波罗的海冷中间层形成中的应用。以潟湖为例，展示了浅水动力学特征如何决定水体交换、朗缪尔环流和悬浮颗粒输运，包括其与水下冰的相互作用。讨论了结冰作为负浮力来源及密度结构和交换季节性重构因素的作用。研究表明了这些研究在方法论上的统一性，以及 I. P. Chubarenko 对深化天然水体过程物理认识所作出的贡献。

关键词： 水平对流水体交换，级联过程，对流上升流，温度壁，冷中间层，潟湖，朗缪尔环流，悬浮物输运，数值模拟，现场实验，实验室实验

致谢： 作者对编辑部和匿名审稿人提出的宝贵建议表示深切感谢，这些建议使手稿质量得到显著提升。特别衷心感谢 Irina Petrovna 的同事、海洋物理实验室的 E. E. Yesiukova 和 O. I. Lobchuk 在材料方面的帮助，以及我们的女儿 O. B. Golubeva 和 N. B. Stepanova 就如何以统一风格呈现 Irina Petrovna 在工作和培养学生中始终遵循的方法所提出的宝贵建议。