

Уникальное природное явление – термобар

Н.С. БЛОХИНА,
кандидат физико-математических наук
К.В. ПОКАЗЕЕВ,
доктор физико-математических наук
МГУ им. М.В. Ломоносова

Картина видимой природы определяется водой.

В.И. Вернадский

В статье обсуждается необычное природное явление – термобар. Особое внимание, в связи с этим, уделяется наличию максимальной плотности у воды при определенных температурах. Благодаря этому свойству

в пресных и слабосоленых водоемах в периоды весеннего прогрева и осеннего охлаждения возникает фронтальный раздел от поверхности до дна (термобар), ограничивающий обмен энергией и веществом между прибреж-

ными и глубинными водами. Эти факторы оказывают значительное влияние на развитие термогидродинамических, экологических и биологических процессов в весенний и осенний периоды.

Вода на нашей планете – самое распространенное, уникальное по своим свойствам вещество, создавшее нашу планету и уже миллиарды лет поддерживающее на ней жизнь. Она покрывает примерно 3/4 поверхности Земли. В атмосфере вода находится в виде паров; на вершинах высоких гор и материках в полярных широтах – в виде огромных масс снега и льда; в верхней части

земной коры (подземные воды) – в жидком, твердом и парообразном состоянии.

Вода обладает большой теплоемкостью, имеет максимальную плотность при определенных температурах и скачок при переходе от жидкого в твердое состояние. Она хороший растворитель, позволяющий существовать на нашей планете соленым морям и океанам. Эти особенно-

сти называют аномальными, так как большинству других веществ они не свойственны. Температурный коэффициент объемного расширения жидкой воды отрицательный при температурах ниже 4 °С, то есть ее плотность уменьшается вплоть до температуры замерзания. Образование льда сопровождается увеличением его объема и уменьшением плотности, вследствие чего он

плавает на поверхности жидкости. Теплоемкость воды при плавлении льда возрастает почти вдвое при температуре от 0 °С до 100 °С. Ее большая теплоемкость способствует тому, что водные объекты на Земле летом накапливают тепло, а в зимние месяцы отдают его в атмосферу. Тем самым стабилизируется температура вблизи земной поверхности и смягчается климат планеты. Вода обладает и рядом других отличительных свойств, но наличие максимума плотности – это определяющий фактор при формировании течений, термического и экологического состояния пресных и слабосоленых водоемов (до 24,7‰) весной и осенью. Существует девять устойчивых изотопных разновидностей воды. Природная вода может иметь разный изотопный состав.

Может возникнуть вопрос, почему зимой не погибает рыба в пресных водоемах. Почти у всех веществ на Земле при остывании плотность уменьшается в отличие от воды. Плотность пресной воды при постепенном охлаждении возрастает, но при температуре ниже 4 °С (температура максимальной плотности) вода становится легче. Такое свойство приводит к “двойственности”: например, при 0° и 8 °С, 3 °С и 5 °С плотность воды оди-

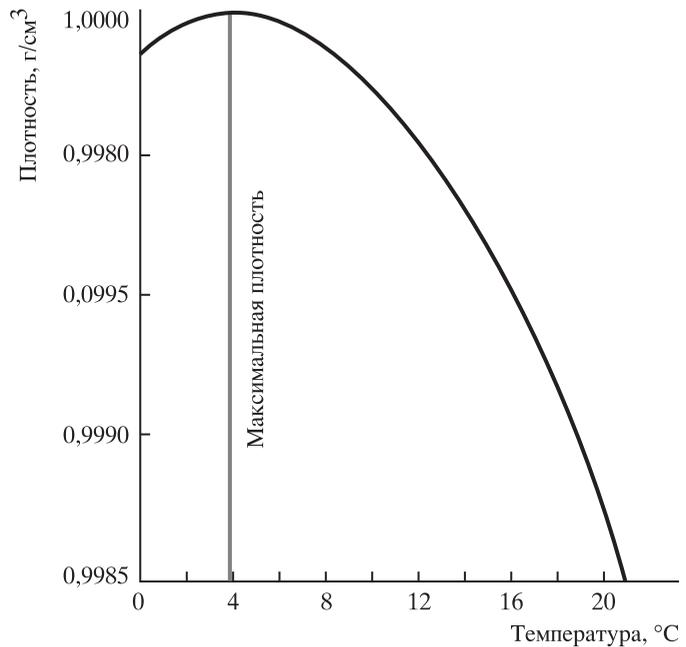


График зависимости плотности пресной воды от температуры.

накова. Объясняется это тем, что структура воды представляет собой трехмерную сетку водородных связей, построенных из тетраэдров с углами вершин многогранника 109°28'. Искривление водородных связей увеличивается с ростом температуры, что способствует возрастанию плотности. С другой стороны, при нагревании средняя длина водородных связей становится больше, в результате чего плотность уменьшается. Совместное действие этих факторов создает условия для существования максимальной плотности пресной воды при 4 °С. Благодаря этому лед плавает

на поверхности, предохраняя от сплошного промерзания озера и пруды зимой и спасая все живое в них. В водоеме формируется устойчивая температурная стратификация (более плотные, но теплые слои жидкости лежат на дне), что препятствует конвективному перемешиванию. Уменьшение плотности воды при температуре более 4 °С также создает устойчивую стратификацию в водоеме летом. На дне находятся более тяжелые холодные воды, на поверхности – легкие и теплые, поэтому плотностная конвекция не наблюдается.

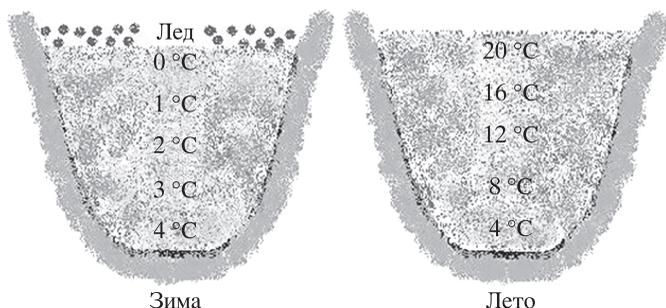


Схема вертикального распределения температуры в пресном водоеме зимой и летом.

Морская же вода, в которой растворено значительное количество солей, при охлаждении ведет себя по-другому. Одновременно с увеличением солёности растёт плотность морской воды и понижается температура, при которой её плотность максимальна. Температура её замерзания с ростом концентрации

растворённых солей постепенно понижается. С увеличением солёности температура наибольшей плотности падает быстрее, чем температура замерзания. Графики зависимостей этих температур от солёности пересекаются при температуре $-1,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и солёности $24,7\text{‰}$. Таким образом, замерзание воды

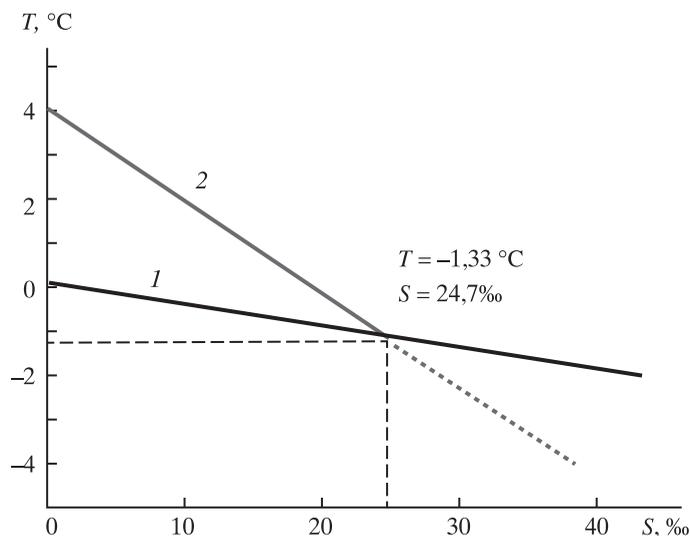


График зависимости между температурой замерзания (1), температурой наибольшей плотности (2) и солёностью S .

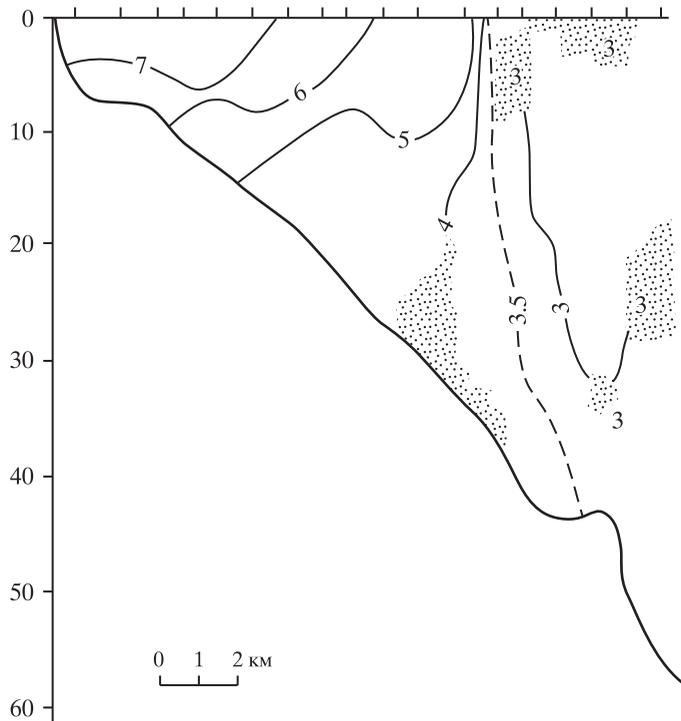
с солёностью выше указанного значения наступает раньше, чем будет достигнута наибольшая её плотность. Из-за этого в большинстве морей на протяжении всего холодного сезона будет непрерывно продолжаться конвекция, даже после начала льдообразования.

Весной поток солнечной радиации увеличивается и, проникая сквозь лёд, нагревает воду подо льдом. Из данных натуральных наблюдений известно, что недалеко от нижней кромки льда температура воды может достигать $4\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Здесь вода становится тёплой, но более тяжёлой. В этом случае подо льдом формируются неустойчивые по плотности слои жидкости, что приводит к возникновению подледной свободной конвекции. С одной стороны, вихревые конвективные структуры подводят тепло к нижней кромке льда, способствуя его таянию снизу. С другой стороны, они проникают в глубь водоема, выравнивая температуру и концентрацию растворимых химических веществ до однородного состояния.

Вся поверхность озера не может одновременно охладиться осенью или нагреться весной до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, и, следовательно, самые плотные воды не могут одновременно опуститься на дно по всей акватории.

рии. За термическое состояние водного объекта в эти периоды отвечает термический бар – природное явление, которое возникает дважды в год – весной и осенью.

В 1899 г. швейцарский ученый, основатель лимнологии Ф.А. Форель впервые наблюдал осенний термобар на Женевском озере. Однако до 1950-х гг. его изучению не уделялось особого внимания, так как считалось, что термобар временно существует в пресных водоемах в штилевую погоду. И лишь в 1958 г. советский лимнолог А.И. Тихомиров впервые провел систематические наблюдения за развитием весеннего и осеннего термобара на Ладожском озере. Ученый понял суть этого феномена и дал ему физическое объяснение. После классических работ А.И. Тихомирова резко возрос интерес специалистов к его изучению. Появилось много данных натуральных наблюдений на различных озерах мира, созданы лабораторные и математические модели, изучающие динамику развития термобара. Особый интерес представляет изучение его влияния на массо- и энергообмен в озерах, их экологическое состояние, термические и динамические процессы в атмосфере над акваторией больших водоемов. На кафедре физики моря и вод суши



Типичный профиль распределения температуры весной в озере Онтарио, по данным наблюдений Г.К. Роджерса. Цифры на рисунке обозначают температуру изотермы в °С. Изотерма 4 °С соответствует положению фронта термобара.

физического факультета МГУ под руководством Н.С. Блохиной проведено лабораторное и теоретическое исследование термобара на основе созданной оригинальной математической модели.

Рассмотрим это явление на примере весеннего термобара. Здесь и далее обсуждаются ситуации в замкнутых пресных водных объектах, связанные лишь с термическими и динамическими процессами, вызванными наличием максимума плотности пресной воды при 4 °С.

После освобождения большей части водоема ото льда увеличивается поступление тепла в его толщу. Поверхностные воды на мелководье быстрее прогреваются и достигают температуры максимальной плотности, чем в центральной части озера. При этом они становятся тяжелее глубинных поверхностных вод и опускаются ко дну. В озере образуется фронтальный раздел от поверхности до дна с температурой максимальной плотности,

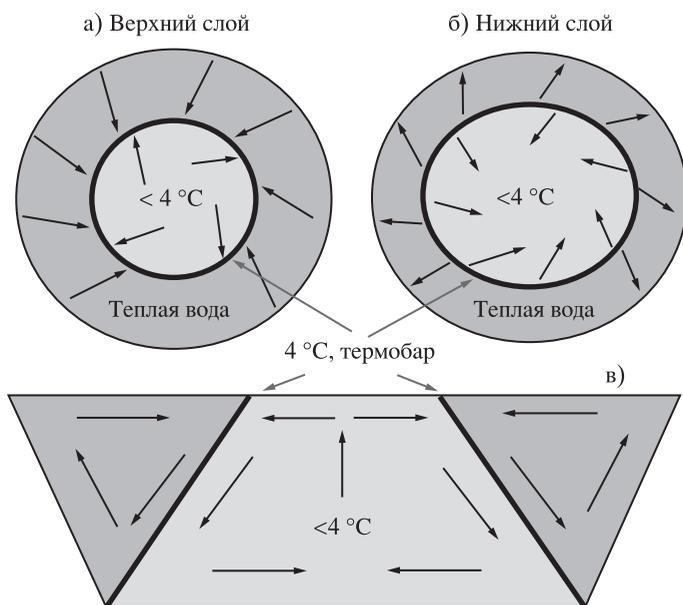


Схема движения воды в озере в период существования термобара: а) вблизи водной поверхности; б) у дна; в) вертикальный разрез.

то есть стена более плотной водной массы – термобар. Типичное распределение температуры в озерах в период развития весеннего термобара получено при натурных наблюдениях на озере Онтарио. Фронт термобара, как правило, не строго вертикальный. В глубоких озерах наблюдали волнообразные движения с горизонтальными масштабами порядка километров. Однажды возникнув, термобар держится очень устойчиво, пока ему не придет время исчезнуть. Он может существовать от нескольких дней и часов в мелких озерах до нескольких месяцев в глубоких. Например, на Ладожском озере термобар

в среднем существует 2,5 месяца.

Термобар делит водный объект на две обособленные зоны – прибрежную и глубинную. Он ограничивает обмен энергией и веществом между ними, но способствует переносу растворенного кислорода и минеральных веществ от поверхности в придонные области, что важно для развития биологических процессов. Все это приводит к различию физических, химических и биологических характеристик по обе стороны от термобара. Справа и слева от фронтального раздела возникают конвективные структуры, сходящиеся в районе термобара. Скорость опус-

кания воды в этой области может достигать нескольких метров в сутки. Приповерхностные слои перемещаются в сторону термобара, придонные оттекают от него, в прибрежной области – к берегу, в глубинной – в открытое озеро.

Термобар возникает по всему периметру озера и по мере его прогрева перемещается к центру. При этом теплые прибрежные воды окружают холодные глубинные. При достижении температуры воды на поверхности в центре водоема 4 °С термобар, возникший в противоположных частях озера, соединяется. При дальнейшем нагревании озерных вод он опускается ко дну, образуя купол с температурой максимальной плотности. Скорость перемещения фронта термобара зависит от глубины водного объекта и может достигать нескольких километров в сутки. Максимальная зарегистрированная скорость его перемещения на Ладожском озере достигает 6 км/сут.

Фронт термобара на поверхности озера можно обнаружить с вышенности, корабля или самолета по полосе пены, мелких плавающих предметов, масла и других веществ в зоне схождения вод, а также по резкому изменению цветности и мутности воды. Во время развития весеннего термобара поверхность воды в глубин-



Термобар на Ладожском озере. Снимок сделан А.И. Тихомировым в мае 1959 г.

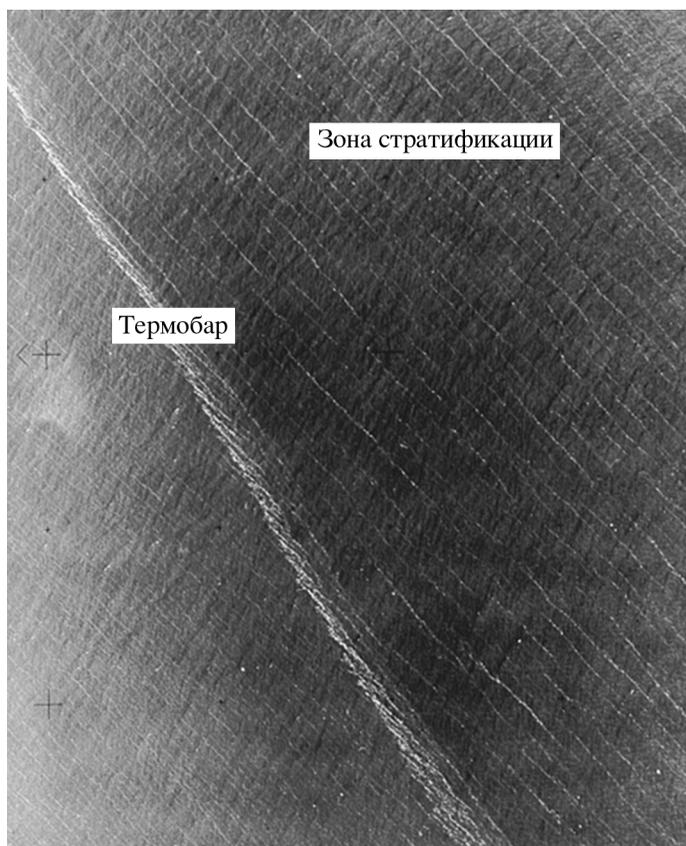
ной части озера выглядит как зеркальная. Она имеет голубоватый цвет с белесым оттенком. По другую сторону от термобара она бывает мутной и различных оттенков. Так, воды Ладожского озера принимали темно-синий оттенок, озеро Онтарио в разные годы наблюдений – зеленый или коричневый.

Термобар наблюдается на снимках, полученных космическими аппаратами, где фиксируется температура поверхности озера. По серии снимков, сделанных в разные годы и периоды времени существования термобара, определяет-

ся среднее многолетнее положение весеннего термобара на его поверхности. При пересечении зоны термобара наблюдается резкое изменение температуры поверхностных вод. Например, в пределах фронтальной зоны шириной лишь около 50 м на озере Камлупс в Канаде наблюдалась разница температур 2°C , то есть горизонтальный градиент температуры достигал большой величины – 40°C на километр. На Ладожском озере зафиксированы его значения примерно 7°C на километр. Отметим, что средний сезонный горизонтальный гради-

ент температуры в крупных озерах умеренных широт составляет $0,05\text{--}0,2^{\circ}\text{C}$ на километр. Ширина фронтальной зоны в крупных озерах может достигать нескольких километров.

Существование во фронтальной зоне озера таких больших горизонтальных градиентов температуры приводит к тому, что вода начинает перемещаться в сторону термобара. На движущуюся частицу жидкости начинает действовать сила Кориолиса, связанная с вращением Земли и отклоняющая направление ее движения вдоль меридиана вправо в Се-



Зона термобара в виде скопления пены на поверхности воды. Снимок с самолета.

верном полушарии и влево – в Южном. В результате у рек подмывается всегда правый берег в Северном полушарии и левый – в Южном. Воды сходятся к фронтальному разделу не перпендикулярно, а под некоторым углом к нему. По обе стороны от термобара возникают составляющие скорости движения жидкости вдоль его фронта, направленные в разные стороны: с внешней стороны – против часовой стрелки, с внутренней – по часо-

вой. Направление и скорость движения воды на поверхности в области фронтального раздела зависят от размера водоема. Чем он больше, тем вращение Земли сильнее влияет на перемещение воды. Вследствие этого в больших озерах с обеих сторон от термобара заметны течения в виде струй. В Онежском и Ладожском озерах вокруг их холодной центральной части наблюдали замкнутые системы течений, направленные против часовой стрел-

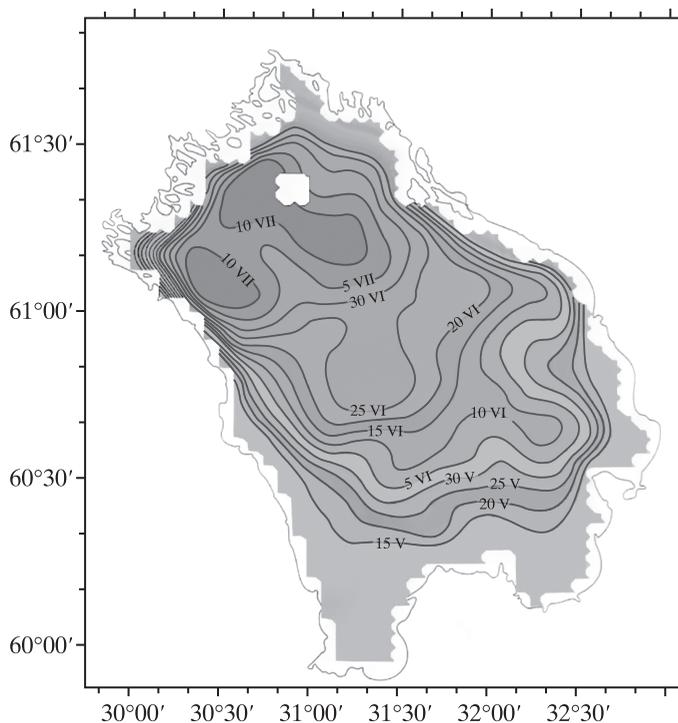
ки. В Петрозаводской губе Онежского озера скорость течения вдоль фронта термобара могла достигать 11,5 см/с в прибрежной области (свыше 25 см/с на Ладожском озере) и не превосходила 4–5 см/с около дна. С увеличением глубины скорость течения вдоль фронтального раздела уменьшается.

На развитие термобара, а следовательно, на термические и динамические процессы в озере, могут существенно повлиять его глубина, сток речных вод, ветер, температура и влажность воздуха в атмосфере, другие гидрометеорологические факторы.

Достаточно большая разница температур в прибрежной и глубинной частях озера может сказаться на процессах в атмосфере над ними. Обмен энергией между водой и атмосферой осуществляется за счет потоков тепла на границе их раздела. Эти потоки зависят от температуры воды, температуры и влажности воздуха, солнечной радиации, ветрового волнения и ряда других факторов. Если весной ближние к берегу воды достаточно теплые, а к центру водоема – холодные, то потоки тепла на границе водоем – атмосфера справа и слева от термобара могут иметь разные направления со сменой знака над линией термобара. При определенных

температурах и влажности воздуха это приводит к возникновению конвекции в атмосфере вблизи берега. Здесь может развиваться кучевая облачность, сопровождающаяся выпадением дождя. Над холодными водами наблюдается устойчивая стратификация воздуха. На границе резкого температурного раздела создаются благоприятные условия для образования озерного бриза, который усиливается в направлении к берегу. В больших озерах вблизи термобара в прибрежной области на воде обычно наблюдается рябь, которая переходит в волнение ближе к берегу. В это же время над центральной областью озера стоит солнечная погода, а на воде наблюдается полный штиль. Разнонаправленность суммарного теплового баланса над акваторией озера способствует горизонтальному переносу воздушных масс над ним. Прохождение над озером различных по температуре воздушных масс может привести к образованию тумана. При вторжении холодного воздуха может образоваться туман над теплыми прибрежными водами, а теплое – над холодными глубинными.

Осенний термобар развивается аналогично весеннему с той лишь разницей, что воды вблизи берега быстрее охлаждаются до температуры



Ладожское озеро весной. Изолинии определяют среднее многолетнее положение весеннего термобара на поверхности озера по снимкам, сделанным из космоса. Цифры на изолиниях соответствуют дате расположения изотермы 4 °С на его поверхности.

максимальной плотности (4 °С), опускаются до дна, образуя фронтальный раздел. При дальнейшем охлаждении акватории более холодные, но более легкие прибрежные воды перемещаются ко дну, располагаясь выше более теплых и плотных придонных. Благодаря именно этому ледостав начинается у берега. По месторасположению термобара на поверхности проходит раздел между более холодной водой мелководья и менее холодной глубинной частью водоема, где проис-

ходит конвективное перемешивание. В то время как в глубоководной части озера наблюдается поверхностная рябь, прибрежные воды могут оставаться совершенно гладкими. Термобар может наблюдаться также в морях при солёности воды до 24,7‰.

Велика роль термобара в формировании экосистем в озерах и водохранилищах. В районе термобара увлекаются ко дну поверхностные воды, богатые кислородом и фитопланктоном, повышающие биопро-

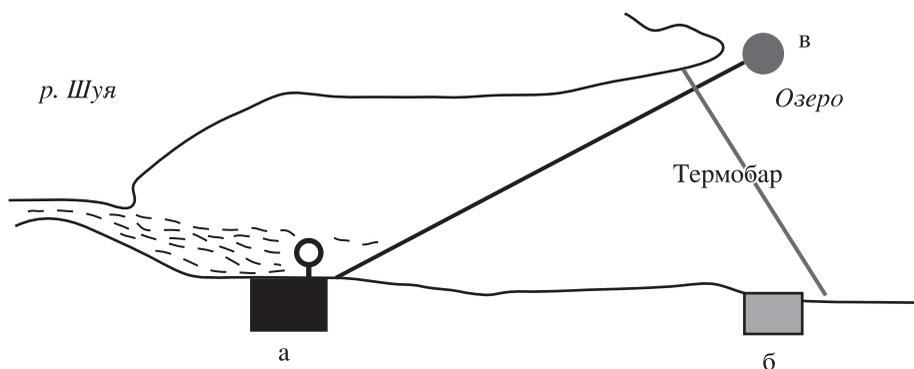


Схема расположения существующего водозабора г. Петрозаводска (а), очистных сооружений (б), фронта термобара и предполагаемое место водозабора (в). Пока термобар существует в Петрозаводской губе Онежского озера, городские отходы не могут попасть в озеро, минуя водозабор. Чтобы избежать такой ситуации, место водозабора должно располагаться за фронтом термобара в открытом озере (в).

дуктивность водоема. В то же время термобар ограничивает горизонтальное перемешивание вод между прибрежной и глубинной областями водоема, что определяет различия планктонных сообществ. Фронтальный раздел влияет на распространение загрязнений. Интенсивные нисходящие течения в области термобара могут привести к быстрому распространению загрязнений из поверхностных слоев до очень больших глубин, а фронтальный раздел к накоплению вблизи берега около населенных пунктов загрязненных вод.

В качестве примера можно описать влияние весеннего и осеннего термобара на состояние вод в Петрозаводской губе Онежского озера – основного источника водоснабжения Петрозаводска. Качество озерной воды резко ухудшается в

периоды существования термобара. Это связано с неудачным выбором места водозабора, который был спланирован и построен без учета особенностей гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов в водоеме весной и осенью. В эти периоды городские отходы, переработанные на городской очистительной станции, будут попадать в водозабор, пока термобар не переместится в озеро. Чтобы избежать такой ситуации, место водозабора должно располагаться в открытом озере за фронтом термобара.

Один из возможных сценариев распространения загрязнений в крупных озерах в период развития термобара связан со струйными течениями вдоль его фронта. Прибрежные воды вместе с загрязнениями, перемещаясь от берега к зоне

фронтального раздела, начинают двигаться вдоль термобара, перенося загрязнения далеко от места возникновения. Например, влияние сточных вод Приозерского целлюлозно-бумажного комбината на Ладожском озере (в настоящее время репрофилированного) прослеживалось на расстоянии нескольких километров от места их выхода в озеро. В отдельных случаях загрязненные воды переносились течением вдоль берега на десятки километров в южном направлении к истоку реки Невы.

Подаренное нам природой аномальное свойство воды, связанное с тем, что она имеет максимальную плотность при температурах выше температуры замерзания, приводит к развитию термобара в пресных и слабосоленых

водоемах весной и осенью. Это природное явление становится одним из ведущих механизмов

обмена и обновления вод, определяет условия формирования термического, динамического и

экологического состояния водных объектов, энергообмен между ними и атмосферой.

Информация

“Спитцер”: землеподобная экзопланета

Космическая обсерватория “Спитцер” транзитным методом обнаружила самую близкую к Земле планету земного типа – HD 219134b. Она скалистая и обладает атмосферой, параметры которой пока неизвестны. Ближе к нам (4,54 пк, или 14,81 св. года) расположен только

“теплый нептун” GJ 674 b массой 12,7 M_3 , открытый в 2007 г. методом лучевых скоростей. Экзопланета HD 219134b массой 4,5 M_3 и диаметром 3,2 R_3 обращается вокруг звезды Глизе 892 за три дня. Так как она соседствует со светилом, то на ней возможна вулканическая и геологическая активность. Система планет у звезды Глизе 892 была открыта ранее тем же методом с помощью спектрографа HARPS-North на итальянском 3,6-м телескопе Галилео на Канарских островах. Кроме HD 1219134b система состоит из газовых планет массой 2, 7, 9 и 62 M_3 ,

которые обращаются вокруг Глизе 892 за 6, 8, 47 и 1190 сут. Звезда относится к классу M (красный карлик), она менее яркая и горячая, чем Солнце. Планетная система Глизе 892 находится в созвездии Кассиопеи на расстоянии около 21 св. года от Солнца.

Наблюдения, сделанные с помощью “Спитцера”, показали, что плотность вещества экзопланеты HD 219134b – 6 г/с m^3 (средняя плотность Земли – 5,5 г/с m^3), что подтверждает ее принадлежность к землеподобным планетам.

Пресс-релиз NASA,
30 июля 2015 г.



Художник изобразил экзопланету HD 219134b в виде разогретого каменного небесного тела. Рисунок NASA.

“Радиоастрон”: четыре года исследований

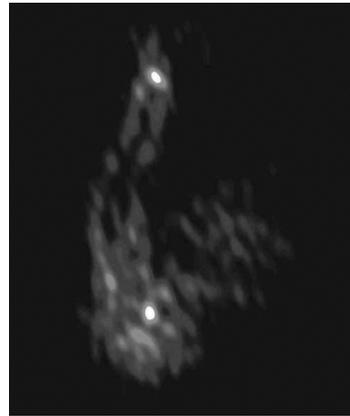
18 июля 2015 г. исполнилось четыре года со дня запуска российского космического радиотелескопа “Спектр-Р” проекта наземно-космического интерферометра “Радиоастрон” (Земля и Вселенная, 2011, № 6). Научные группы проекта поделились новыми результатами исследований галактик, плазмы в нашей Галактике и галактических мазеров водяного пара.

21–22 сентября 2013 г. в течение 22 ч проводилось картографирование радиоисточника 3С84 (Персей А) на частотах 5 и 22 ГГц. Наземный интерферометр состоял из 25 телескопов, в числе которых были европейская РСДБ-сеть, российские “Квazar-КВО” и радиотелескоп в Калязине, немецкий телескоп в Эффельсберге, корейская РСДБ-сеть, американские телескопы GBT, VLBA и фазированная VLA. Данные коррелировались в Институте радиоастрономии Общества Макса Планка (Германия). В результате получено качественное изображение радиоисточника 3С84 в активной эллиптической галактике NGC 1275 диаметром более 100 тыс. св. лет, находящейся на расстоянии 75 Мпк (230 млн св. лет) в скоплении галактик в созвездии Персея. Угловой размер ядра гигантской га-

лактики NGC 1275 – 1 мс дуги, что соответствует 0,3 пк. Благодаря этому объект стал одним из самых подходящих кандидатов для изучения джетов вблизи сверхмассивной черной дыры в центре NGC 1275, что позволит понять процесс формирования струй в галактиках.

На карте центральная область 3С84 – сложная структура размером 0,1 с дуги. Сверху (север) выделяется яркое пятно – ядро галактики, снизу (юг) видна яркая область. На карте четко виден контрджет (выброс на север). Угловое разрешение карты – примерно 50 мс дуги, или 500 радиусов Шварцшильда. Яркость повышается к краям джета и контрджета. Новая информация поможет понять природу такого выброса.

Изучение пульсаров с помощью РСДБ-сети позволяет использовать их при изучении структуры межзвездной среды. 1 августа 2013 г. “Радиоастрон” одновременно в двух диапазонах длин волн наблюдал пульсар В1933+16. На частоте 92 см использовались системы апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT, Нидерланды) и 25-м антенны американской решетки телескопов VLBA в Санта-Крус. На частоте 18 см работали 300-м антенна в Аресибо, 45-м телескоп обсерватории НРАО в Грин Бэнке (США), 32-м антенна в Торуни (Польша) и 32-м телескоп системы “Квazar-КВО” в Светлом. Пульсар В1933+16 расположен в 4 кпк в спиральном рукаве созвездия Стрельца. Луч зрения на пульсар проходит



Карта радиоисточника 3С84 в активной эллиптической галактике NGC 1275 в скоплении галактик созвездия Персея. По данным наземно-космического интерферометра “Радиоастрон”. ФИАН.

вдоль рукава, что позволило ученым изучить сложную структуру неоднородностей плазмы.

27 апреля 2015 г. были выполнены новые наблюдения одного из наиболее удаленных источников мазерного излучения в линии водяного пара в галактике – области звездообразования W49 N, находящейся на расстоянии около 36 тыс. св. лет в спиральном рукаве созвездия Персея. Проекция базы интерферометра во время наблюдений достигала 19,4 R_z, угловое разрешение составляло около 23 мс дуги (величина, рекордная для наблюдений мазеров водяного пара). Проведенные наблюдения позволят измерять яркостные температуры и наиболее компактные детали мазерных источников.

Пресс-релиз ФИАН,
21 июля 2015 г.