



КЛИМАТ

Повышенная  
влажность  
в теплеющей  
атмосфере  
подпитывает  
сильные ураганы  
и ливневые дожди

# Паровые бури

*Дженнифер Фрэнсис*



## ОБ АВТОРЕ

Дженнифер Фрэнсис (Jennifer A. Francis) — старший научный сотрудник и исполняющая обязанности заместителя директора Центра климатических исследований Вудвелла. Она провела обширные исследования потепления в Арктике, а также роли пара и передачи энергии в атмосфере. Член консультационного совета *Scientific American*.



**Л**ето 2021 г. стало ярким примером разрушений, которые может принести непогода в теплеющем мире. В середине июля во время бурь в Западной Германии и Бельгии за два дня выпало до 20 см дождевых осадков. Ливневые воды разламывали здания на части и несли их по улицам. Неделю спустя в китайской провинции Хэнань всего за три дня выпало годовое количество осадков — более 60 см. Сотни тысяч людей спасались бегством от вышедших из берегов рек. Жители города Чжэнчжоу, административного центра провинции, публиковали видео, как пассажиры, оказавшись в ловушке затопляемых вагонов метро, тянулись к потолку, чтобы глотнуть воздуха, оставшегося над быстро прибывающей водой.

В середине августа в результате резкого изгиба струйного течения стремительные бури прошли над штатом Теннесси, всего за 24 часа выпало невероятное количество осадков — 43 см, а катастрофическое наводнение унесло жизни не менее 20 человек. Ни одна из этих погодных систем не имела статуса урагана или тропической депрессии.

Однако довольно скоро в Мексиканский залив вихрем внедрился ураган «Ида», девятый по счету поименованный тропический шторм в напряженном североатлантическом сезоне этого года. 28 августа он был причислен к категории 1 с устойчивым ветром 137 км/ч. Менее чем через 24 часа «Ида» взорвалась до категории 4, разгоняясь почти с двойной скоростью, которую Национальный центр по слежению за ураганами США обычно отмечает при определении быстро нарастающего шторма. Обрушившись на побережье Луизианы с порывами ветра 241 км/ч, ураган оставил более 1 млн человек без электричества и более 600 тыс. человек без воды на несколько дней. Ярость «Иды» распространилась на северо-восток, где в Нью-Йорке за час

выпали рекордные 8 см осадков. В этой стихии погибли не менее 80 человек и был опустошен ряд населенных пунктов на востоке США.

Все эти разрушительные события объединяет водяной пар — газообразная форма  $H_2O$ , играющая колоссальную роль в разжигании разрушительных штормов и ускорении изменения климата. По мере того как океаны и атмосфера нагреваются, в воздух испаряется дополнительное количество воды. Более теплый воздух, в свою очередь, может удерживать больше пара, прежде чем он конденсируется в капли облаков, которые могут превратиться в проливные дожди.

Только с середины 1990-х гг. во всем мире содержание пара в атмосфере увеличилось примерно на 4%. Может показаться, что это не так уж много, но для климатической системы это имеет большое значение. Увлажненная атмосфера обеспечивает повышенной энергией и влагой бури всех видов, включая летние грозы, северо-восточные внетропические циклоны на восточном побережье США, ураганы и даже метели. Дополнительный пар помогает тропическим

штормам, таким как «Ида», усиливаться быстрее, оставляя очень мало драгоценного времени для официального оповещения населения об опасном положении.

Ученые давно предвидели, что изменение климата повлечет увеличение пара, переносимого по воздуху, который подпитывает так называемые паровые бури, выдающие большее количество дождя и снега, чем это делали бури всего несколько десятилетий назад. Измерения подтверждают, что удары интенсивных осадков становятся все жестче и все чаще происходят в США и во всем мире. С конца 1980-х гг. около одной трети материального ущерба Соединенных Штатов на сумму \$73 млрд, нанесенного наводнениями, объяснялось увеличением обильных осадков.

Например, когда в августе 2017 г. ураган «Харви» слил на некоторые кварталы Хьюстона уму непостижимые 152 см дождевых осадков за пять дней, на которые он задержался в этом районе, даже выдавшие виды метеорологи потеряли дар речи. Временами дождевые полосы поражали осадками, достигающими 15 см/ч. В одном анализе содержался вывод, что сокрушительные осадки стали в три раза вероятнее и на 15% интенсивнее по причине изменения климата, в частности из-за насыщенного влагой воздуха, который подпитывал «Харви» из аномально теплого Мексиканского залива.

В отличие от большинства газов, составляющих атмосферу, водяной пар неравномерно распределен по земному шару. Влажные зоны тропического пояса, расположенные по обе стороны экватора, богаты паром. Длинные изгибы тропической влаги могут простираться к более прохладным и сухим полюсам дорогами штормов и бурь, омывая территории в средних и высоких широтах в периоды интенсивных и продолжительных дождей. Эти реки тепла и влаги помогают выровнять распределение энергии в атмосфере Земли и создают мощные паровые бури на своем пути.

### Энергетический насос

Когда мы потеем под жарким солнцем или ставим кипятить чайник на кухонную плиту, мы превращаем жидкую воду в водяной пар. Необходимый ингредиент — тепло. Аналогичным образом тепло в климатической системе заставляет воду из влажной почвы, растений, океанов, озер и ручьев испаряться в воздух. Пар несет с собой энергию в виде скрытой теплоты. Если позже

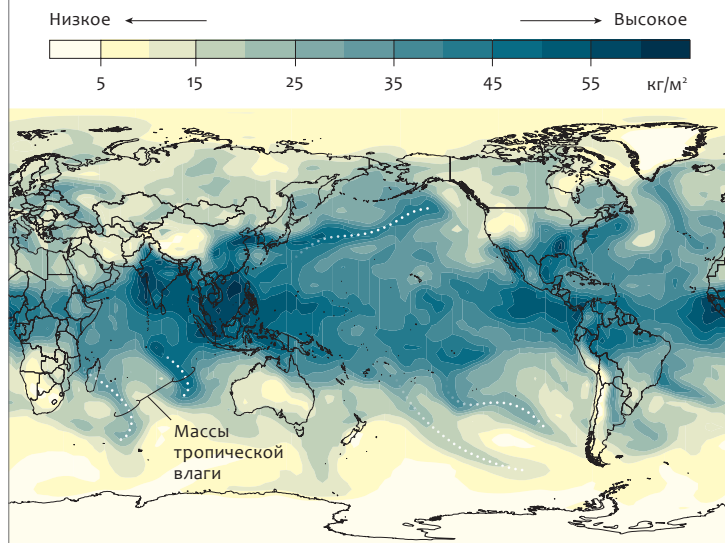
пар снова переходит в жидкое состояние, образуя облако в небе или росу на лужайке, то тепло выделяется в атмосферу. Так как образовавшийся пузырек теплого воздуха легче воздуха вокруг него, он поднимается

## Влажнеющий мир

Водяной пар неравномерно распределяется в атмосфере земного шара. В экваториальных широтах он обычно в изобилии, а к полюсам его становится меньше, но штормы и ветры могут также переносить в этих направлениях массы тропической влаги. Общее количество переносимого по воздуху пара увеличивается по мере того, как мир теплеет и над океанами, и тем более над сушей.

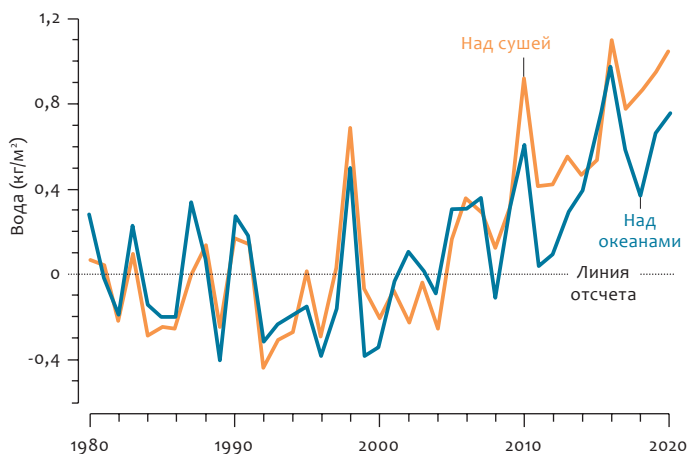
### Содержание воды в атмосфере на 31 августа 2021 г.

Цвет обозначает килограммы воды в вертикальном столбе атмосферы из расчета на квадратный метр поверхности Земли при условии полной конденсации и выпадения осадков. Ураган «Ида» в форме темного круглого пятна виден на юго-востоке США.



### Рост объема водяного пара, переносимого по воздуху

В последние годы количество пара увеличилось над океанами и сушей во всем мире по сравнению со среднегодовым или базовым уровнем 1981–2010 гг.





29 августа 2021 г. ураган «Ида» принес 43 см дождевых осадков в Лаплас, штат Луизиана. Местный житель идет по затопленному району.

вверх. На больших высотах температура обычно ниже, поэтому пузырек может продолжать подниматься и расти, все время конденсируя дополнительный водяной пар в капли облаков и высвобождая еще больше скрытого тепла. Если вы пролетите на самолете сквозь большое облако, то почувствуете турбулентность, создаваемую столбами поднимающегося воздуха.

Скрытое тепло служит основным топливом, питающим ураганы, грозы и обычные периоды плохой погоды. Энергия, содержащаяся в скрытом тепле, значительна; количество тепловой энергии типичного урагана, выделяемое за один день, более чем в 200 раз превышает всю электроэнергию, производимую в мире за день. Ураган

может высвобождать взрывную силу десятимегадонной ядерной бомбы примерно каждые 20 минут.

Больше всего тревоги вызывает то обстоятельство, что последующее увеличение объема водяного пара в атмосфере может сыграть немалую роль в быстром усилении тропических штормов. Метеорологи говорят, что шторм быстро усиливается, когда либо максимальная скорость ветра увеличивается по крайней мере на 30 узлов (56,3 км/ч) за 24 часа, либо атмосферное давление в центре шторма падает как минимум на 42 миллибара за 24 часа. В последние 40 лет вероятность того, что шторм может быстро набрать силу, выросла в пять раз. Только в 2020 г. именно таким образом

раскрутились десять атлантических ураганов: «Ханна», «Лаура», «Салли», «Тедди», «Гамма», «Дельта», «Эпсилон», «Зета», «Эта» и «Йота». В 2021 г. пять из шести атлантических ураганов, образовавшихся к середине сентября, подверглись быстрому усилению, в том числе «Ида» и «Николаас». Недавние исследования подтверждают очевидную истину: быстрое усиление становится все более вероятным по мере того, как океаны нагреваются, испаряя больше воды и поставляя больше скрытого тепла в атмосферу. Океаны поглощают около 90% тепла, удерживаемого парниковыми газами, приносимыми антропогенными выбросами. Это тепло повышает температуру воды как на поверхности, так и на некоторой глубине; теплая вода действует как мощный аккумулятор, из которого штормы могут черпать энергию.

Надо сказать, что повышение содержания водяного пара — не единственное влияние изменения климата на тропические штормы. Уменьшение ветрового сдвига, то есть разницы в скорости или направлении между ветрами, ближе к земной поверхности и высоко в атмосфере также способствует штормовому развитию, потому что столбы поднимающегося воздуха с меньшей вероятностью будут разорваны на части. К другим изучаемым переменным показателям относятся изменение количества пыли и загрязняющих частиц в воздухе, а также различия в потеплении атмосферы в нижних слоях и на больших высотах, что влияет на скорость подъема пузырьков теплого воздуха.

На протяжении более двух десятилетий преобладающая площадь тропической зоны северной части Атлантического океана была аномально теплой, создавая избыточное испарение, которое способствует усилению ураганов. Нетропические штормы жадно поглощают избыточный пар и энергию атмосферы, что приводит к более интенсивным осадкам и, возможно, даже к более мощным снегопадам.

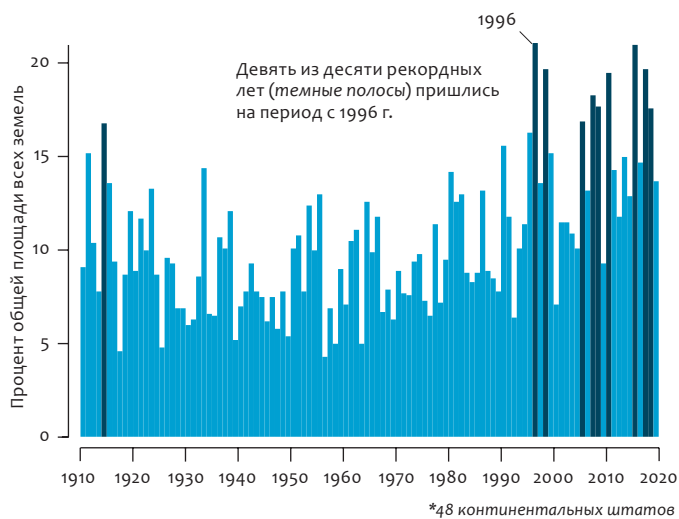
### Смертельная жара

Угроза бедствий вследствие увеличения содержания водяного пара выходит далеко за рамки нагнетания штормов. Летние ночи становятся невыносимо душными, причем все чаще и во все большем количестве регионов. С середины 1990-х гг. по всему земному шару летние ночные минимальные температуры повышаются быстрее, чем дневные максимумы. Это связано с тем, что пар входит в состав

## Усиливающиеся дожди

Исключительно обильные дожди и снегопады происходят все чаще, так как подогретые океаны и воздух увеличивают содержание пара в атмосфере. Один из ряда вон выходящий шторм приносит больше осадков, чем 90% обычных штормов в году. В последние десятилетия стихийные бедствия участились во многих городских и сельских районах и неуклонно становятся нормой.

Процент площади США\*, где дожди или снегопады в один день принесли гораздо больше осадков, чем в среднем за год

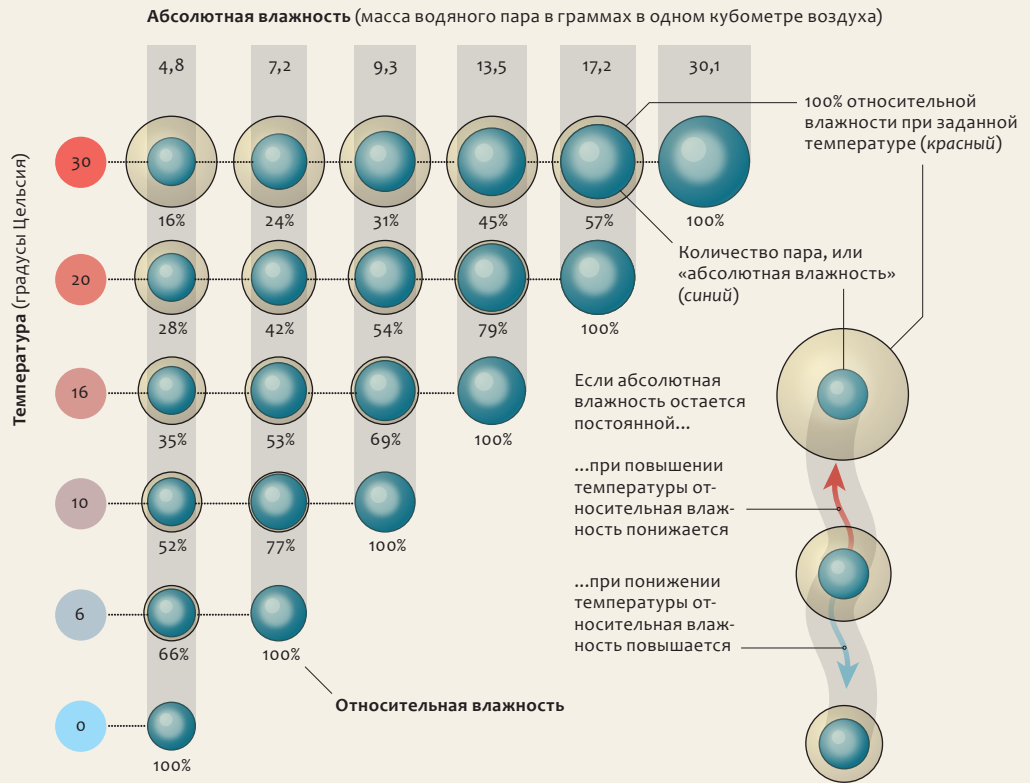


парниковых газов и повышение его содержания означает большее нагревание: тепло, вместо того чтобы, как обычно, уходить в космос ночью, задерживается, препятствуя охлаждению поверхности Земли. И в отличие от углекислого газа, который распространяется по всему миру независимо от того, где произошли его выбросы, пар, как правило, остается локализованным.

Жаркие ночи становятся губительными в условиях избытка испарений. Повышенная влажность в ночное время задерживает пототделение, работу естественной системы охлаждения тела, что вынуждает вас перегреваться и мешает спать. Этот дискомфорт измеряется тепловым индексом, который объединяет влияние температуры и влажности и отображает настоящий стресс, который испытывает тело. Индекс выше примерно 38° C считается опасным; длительное воздействие может быть фатальным, особенно для пожилых людей и детей младшего возраста. Жара поражает также домашних животных и скот, а животные в дикой природе приспосабливаются, перемещаясь в более высокие широты или на высокие места, если у них есть возможность. Без периода ночного охлаждения тепло может накапливаться в почве,

## Что такое влажность? Это относительная величина

Кажется ли воздух в данный день липким или сухим, зависит от относительной влажности. В воздухе при 0°С водяной пар может достигать максимальной концентрации около 0,6%. При температуре 30°С воздух может удерживать гораздо больше пара — примерно до 4,2%. Когда воздух определенной температуры содержит максимальное количество пара, которое он может удерживать, его относительная влажность (RH) составляет 100%.



убивая некоторые растения и насекомых и позволяя процветать другим, любящим тепло видам. Согласно Декларации об изменении климата и охране здоровья на 2021 г. (*A Declaration on Climate Change and Health 2021*), опубликованной в августе группой из 32 организаций здравоохранения, ночная жара также повышает риск заражения болезнями, переносимыми насекомыми, которые угрожают людям, животным и сельскохозяйственным культурам.

Опасность, которую представляет ночная жара, возрастает не только в жарких тропических странах, но и в тех, что расположены дальше к северу и югу от экватора. Города на побережье Мексиканского залива США уже многократно превышали порог опасности для жизни и здоровья. С 1970 г. потепление в Хьюстоне выросло более чем на 2°С из-за близости города к Мексиканскому заливу и его беспрестанно расширяющегося освоения, что усиливает эффект городского острова тепла. В июле 2020 г. тепловой индекс в Хьюстоне превысил 43°С, что далеко не малая величина.

Если парниковые газы продолжают накапливаться в атмосфере, подобные условия скоро станут обычными во многих городах

на низких и средних широтах, таких как Атланта и Вашингтон, округ Колумбия. До 2000 г. в столице США в среднем каждые пять лет бывала одна ночь с минимальной температурой выше 27°С. С 2000 г. эти ночи случались примерно два раза в год, то есть наблюдается десятикратное увеличение всего за 20 лет.

Надо отметить, что есть некоторые страны в тропиках, которые пострадают и уже страдают больше всего. В мае 2015 г. жесткая жара, которую можно было бы назвать «паровой волной», поразила Индию и Пакистан. В течение нескольких дней показатели дневной жары превышали 46°С, а высокая влажность препятствовала ночному охлаждению; более 3,5 тыс. человек не выдержали этих удушающих условий. Добавьте еще полградуса глобального потепления — и число людей, атакованных экстремальной жарой, удвоится, достигнув приблизительно 500 млн по всему миру.

### Усилитель глобального потепления

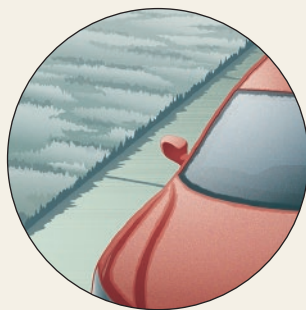
Если сильных бурь и душных ночей недостаточно для серьезного беспокойства, то надо отметить, что водяной пар усугубляет глобальное потепление. Хотя больше



**Облака:** мы не видим водяного пара, но если его добавить в воздух и довести относительную влажность до 100%, образуется облако. Облака — это просто избыточный пар, конденсирующийся в маленькие капельки жидкой воды, которые мы можем видеть. Облако также образуется при охлаждении воздуха со 100% относительной влажности. Облака возникают во многих случаях — например, когда холодный воздух при относительной влажности менее 100% поступает с суши и дует над океаном, где испарение может повысить относительную влажность.



**Туман:** туман — это облако, которое находится на поверхности земли или воды. Когда теплый воздух движется над более прохладной областью, например когда южный ветер дует над холодными прибрежными водами штата Мэн, пар конденсируется, образуя туман. Когда теплый воздух поднимается выше, где прохладнее (скажем, когда ветер поднимается вдоль склона горы), могут образовываться туман или облака. А после теплого дня, когда ночной воздух излучает инфракрасную энергию в космос, его температура понижается и над полями и долинами может образовываться утренний туман.



**Роса и иней:** излучение тепла ясной тихой ночью может привести к образованию росы или инея. Поверхности теряют тепло в инфракрасном излучении быстрее, чем воздух, поэтому они быстрее охлаждаются. Водяной пар в воздухе, который контактирует с более прохладной поверхностью, может конденсироваться в капли на траве или замерзать в виде кристаллов на лужайках и лобовых стеклах автомобилей, если температура достаточно низкая.



**Дыхание:** на выдохе вы добавляете в воздух водяной пар. Если вы выдыхаете достаточно пара, чтобы поднять относительную влажность выше 100%, он временно образует небольшое облачко, которое вскоре рассеивается, так как крошечные капельки испаряются. Поскольку более холодный воздух способен удерживать меньше пара, мы можем видеть свое дыхание в холодные дни.

всего внимания уделяется углекислому газу, водяной пар на сегодня — без всяких сомнений самый влиятельный парниковый газ в атмосфере. Он поглощает гораздо больше инфракрасной энергии, излучаемой с поверхности Земли, чем другие парниковые газы, тем самым удерживая больше тепла. Рассмотрим ситуацию в более широком контексте. Само по себе удвоение концентрации углекислого газа в атмосфере нагреет земной шар примерно на 1° C. Но петля обратной связи — замкнутый круг, приводящий к двойному повышению температуры. Более того, хотя такому виду обратной связи, как исчезновение морского льда, уделяется много внимания, петля обратной связи водяного пара, когда нагревание вызывает испарение, улавливающее тепло, создавая еще большее потепление, — одна из самых мощных в климатической системе.

Возможно, это покажется парадоксальным, но ответное действие водяного пара слабее всего там, где его больше всего. Во влажных областях инфракрасная энергия, поглощаемая водяным паром, уже практически исчерпана, поэтому добавление небольшого количества влаги

производит минимальный эффект. Однако в сухих местах, таких как полярные регионы и пустыни, количество поглощенной инфракрасной энергии намного ниже максимальной возможности, поэтому любое прибавление пара может задержать тепло и увеличить температуру в нижних слоях атмосферы.

Увеличение числа и продолжительности волн арктической жары — явный признак более частых и длительных внедрений теплого и влажного воздуха из более низких широт, тех масс тропической влаги, которые протянулись к северу от тропиков. Например, в январе 2021 г. температура на обширных пространствах над Северным Ледовитым океаном поднялась на 20° C выше нормы. Усиление волн жары в Арктике, особенно зимой, замедляет ежегодное замерзание морского льда и способствует таянию ледяного покрова.

Эффект улавливания тепла дополнительным паром, вероятно, может быть компенсирован увеличением образования облаков. Облака отражают солнечные лучи (приводя к охлаждающему действию), но также и удерживают тепло. Над океанами обычно преобладает охлаждающий

процесс, но в высоких широтах побеждает влияние потепления. Недавние исследования показывают, что в среднем по всему земному шару преобладает нагрев, что создает еще один порочный круг с участием водяного пара.

### Усовершенствование прогнозирования

По мере того как человечество продолжает производить больше теплоулавливающих газов, океаны и атмосфера будут продолжать нагреваться и будет испаряться больше воды, что приведет к более частым паровым бурям и изнуряющим паровым волнам. Ураганы высших категорий будут происходить чаще, как и штормы, быстро набирающие силу. Синоптикам будет трудно предсказывать эти быстрые раскрутки. Когда штормы разгоняются недалеко от берега, как это произошло с ураганом «Ида», у официальных лиц остается мало драгоценного времени, чтобы объявить тревогу, а у людей — всего несколько часов на эвакуацию.

Основное препятствие для прогнозирования этих невероятно разрушительных штормов — нехватка измерений температуры ниже поверхности океана. Толстый слой теплой воды содержит намного больше «штормового топлива», чем тонкий, однако спутники измеряют температуру только поверхностного слоя океана. Ученые пытаются найти методы определения энергии, содержащейся в верхних сотнях метров океанической воды, потому что здесь действительно сосредоточена основная масса, подпитывающая штормы. Они разрабатывают автономные океанские планирующие аппараты, которые передвигаются в верхних слоях океана на разных глубинах, собирая образцы для определения температуры и солености. Они также работают с данными, полученными со спутников, с помощью которых могут обнаруживать изменения высоты морской поверхности: глубокий слой теплой воды расширяется по отношению к соседним, создавая на поверхности океана горб, видимый из космоса.

Спутниковые данные чрезвычайно ценны, но нам также нужны инструменты, для измерений температуры, пара и ветра, действующие в океане. Мы продолжим полагаться на самолеты — «охотники на ураганы», чтобы летать внутри штормов и сбрасывать приборы внутри и вокруг них. Исследователи вводят данные, добытые в этих полетах, в компьютерные модели, которые могут дать подробную

информацию о состоянии атмосферы и силе шторма. Лучшее покрытие данными, быстрые компьютеры и более детальное понимание процессов формирования штормов помогают улучшить прогнозы.

Пар возникает из несметного числа источников и неблагоприятно влияет на многие атмосферные процессы. Ученые не до конца понимают некоторые взаимодействия, и компьютерные модели все еще ищут пути полноценного прогноза влияния водяного пара на изменяющуюся климатическую систему. Даже, казалось бы, несложный расчет, насколько быстро вода испаряется из океана или озера, зависит от очень многих факторов, таких как разница между температурой воды и воздуха над ее поверхностью, содержание пара, уже находящегося в воздухе, и скорость ветра. На суше расчет еще сложнее и включает дополнительные переменные, как, например, насыщенность влагой почвы и состав растительности. Предсказать, что случится с паром, когда он попадет в атмосферу, — еще одна проблема. Превратится ли он в облака, подпитает бурю и выпадет в виде дождя или снега? Будет ли он конденсироваться на поверхностях в виде росы или инея? Продвинется ли он на сотни или, быть может, тысячи километров от тропиков до высоких широт? Ошибки в любом из этих расчетов повлияют на прогнозы будущих изменений температуры и погодных условий.

Повышение содержания водяного пара заслуживает большего внимания. К сожалению, мы не можем непосредственно контролировать его количество в атмосфере. Однако мы можем сократить его косвенным путем, сдерживая потепление, вызванное главным образом осуществляемыми человечеством выбросами углекислого газа и метана, а также вырубкой деревьев, которые помогают поглощать диоксид углерода из воздуха. Уменьшая скорость нагрева, мы можем снизить выброс пара. Если нам это удастся, мы сможем замедлить дальнейшее усиление паровых бурь, а следовательно, и предотвратить тот хаос, который они могут посеять. ■

**Перевод: В.И. Сидорова**

### ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Мирволд К., Сакс Д. Смещение пояса тропических дождей // ВМН, № 5, 2011.