



Ионосферный след от землетрясений и цунами

С.Л. ШАЛИМОВ,
доктор физико-математических наук
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Диагностика внешних оболочек Земли, осуществляемая посредством глобальных навигационных спутниковых систем и не менее глобальной сети наземных приемников и передатчиков в сверхдлинно-



волновом радиодиапазоне, позволяет исследовать достаточно сложные процессы литосферно-ионосферных связей, например, воздействия землетрясений и цунами на ионосферу.

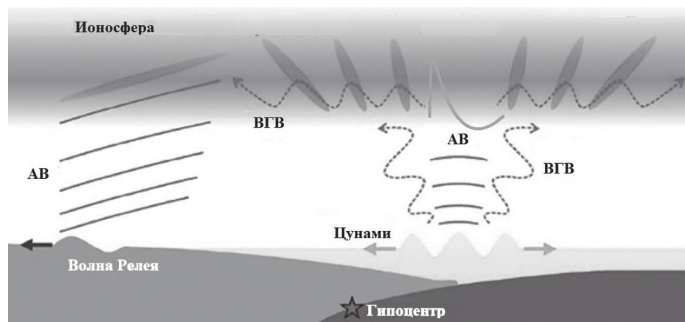
ВОЛНЫ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

В настоящее время дистанционная диагностика внешних оболочек Земли, осуществляемая посредством глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС вместе с широко разветвленной сетью их наземных приемных станций (около 2500 пунктов; но сеть постоянно развивается), а также не менее глобальная сеть наземных приемников и передатчиков

в сверхдлинноволновом радиодиапазоне позволяют исследовать сложные процессы их взаимного влияния. Такая диагностика применяется и в исследованиях литосферно-ионосферных связей. Яркий пример такого исследования – выявление воздействия землетрясений и цунами на ионосферу.

Очаг сильного землетрясения – это довольно мощный источник сейсмических волн; нас будут интересовать сейсмические по-

верхностные волны Релея (распространяются вблизи границы литосферы), включающие вертикальные движения на границе земной поверхности и атмосферы. Поверхностные волны, возбуждаемые при землетрясениях, имеют длины от десятков до многих сотен километров; их фазовая скорость – от 3 до 4 км в секунду; вертикальные смещения почвы достигают нескольких сантиметров. Волны Релея, как и подвижки по линии



Общая схема возбуждения и распространения сейсмических волн Релея в процессе прохождения цунами, а также атмосферных акустических (АВ) и внутренних гравитационных (ВГВ) волн.

разлома земной коры в эпицентре землетрясения приводят к непосредственному воздействию на атмосферу – излучению атмосферных волн.

В отличие от землетрясений с эпицентром на суше аналогичные события на дне океана имеют особенность: они вызывают сейсмические волны не только в земной коре, но и в толще океана (включая разрушительные по воздействиям на инфраструктуру цунами). Эти длинные волны относят к гравитационным поверхностным волнам. Характерная длительность цунами (их период) составляет несколько десятков минут; длины этих волн – несколько сотен километров, скорость их распространения – порядка 200 м/с. Высота волн достигает нескольких метров в океане и нескольких десятков метров по мере приближения к берегу.

Наличие у Земли собственного гравитационного поля (с ускорением свободного падения g), а также способность земной

атмосферы сжиматься создают квазигидростатическое падение плотности атмосферы, с ростом высоты над Землей, называемое стратификацией. Основные типы колебаний такой изотермической атмосферы над плоской землей (без учета ее вращения) таковы: двумерные волны (волны Лэмба); внутренние акустические и внутренние гравитационные волны. Возвращающая сила в продольных акустических волнах – сила упругости, а в вертикально-поперечных гравитационных волнах – сила тяжести (этим обусловлен “запрет” на вертикальное распространение этих волн). Стратификация ограничивает распространение (со скоростью звука) волн Лэмба в горизонтальном направлении и приводит к быстрому (по экспоненте) убыванию их энергии, с удалением от земной поверхности.

Простейшая модель, предложенная еще в 1967 г. сотрудниками ИФА РАН академиком Г.С. Голицыным и доктором физи-

ко-математических наук В.И. Кляцкиным позволяет установить возможные частоты атмосферных волн, возбуждаемые сейсмическими возмущениями, распространяющимися вдоль поверхности земли и океана, а также условия их излучения.

Сейсмические поверхностные волны Релея, скорости которых велики по сравнению со скоростью звука в атмосфере, могут излучать акустические волны. Задача о генерации горизонтально распространяющейся сейсмической волной акустической волны в атмосфере аналогична задаче о генерации электромагнитных волн в среде заряженной частицей, движущейся со скоростью больше фазовой скорости света в среде (эффект Вавилова–Черенкова). Угол, под которым при этом генерируется атмосферная акустическая волна, оценивается из дисперсионного уравнения для атмосферных волн соотношением $\cos\varphi \sim 1/M$, где M – число Маха, равное отношению скорости сейсмической волны к скорости звука.

Морские же волны излучать акустические волны не могут, так как скорость первых гораздо меньше скорости последних. Однако для возбуждения атмосферных внутренних волн необходимо, чтобы их горизонтальная фазовая скорость превышала скорость морских волн на поверхности. Это имеет место только для длинных поверхностных гравитационных волн, к которым относят цунами. Частота атмосферных волн ω может быть разной: от близкой к нулю (когда волновой вектор близок к вертикальному) до $\omega_{\text{Бр}}^{\text{В}}$, называемой частотой Брента–Вяйсяля (когда волновой вектор почти горизонтален). Поскольку групповая скорость в этих волнах перпендикулярна фазовой, то энергия волн распространяется под прямым углом к направлению распространения волнового фронта. Самую быструю групповую скорость имеют низкочастотные волны ($\omega \approx 0$, волновой вектор почти вертикален), причем она направлена практически горизонтально. Такие волновые структуры очень эффективны в распространении энергии по горизонтали.

После генерации в атмосфере акустико-гравитационные волны могут распространяться до высот ионосферы, где посредством столкновений нейтральных и заряжен-

ных частиц приводят в движение ионосферную плазму. Поскольку плотность атмосферы быстро (практически по экспоненте) уменьшается с высотой, то, при сохранении энергии возмущения, амплитуда волн растет по мере ее распространения по направлению вверх. Для поверхностного источника коэффициент усиления амплитуды достигает 10^3 на ионосферных высотах. Это позволяет понять, почему в ионосфере можно зарегистрировать атмосферные возмущения, которые едва различимы на фоне атмосферных шумов в приземном слое. Например, типичные амплитуды смещения поверхности в океане порядка сантиметров (десятков сантиметров) в нижней ионосфере станут десятками (сотнями) метров.

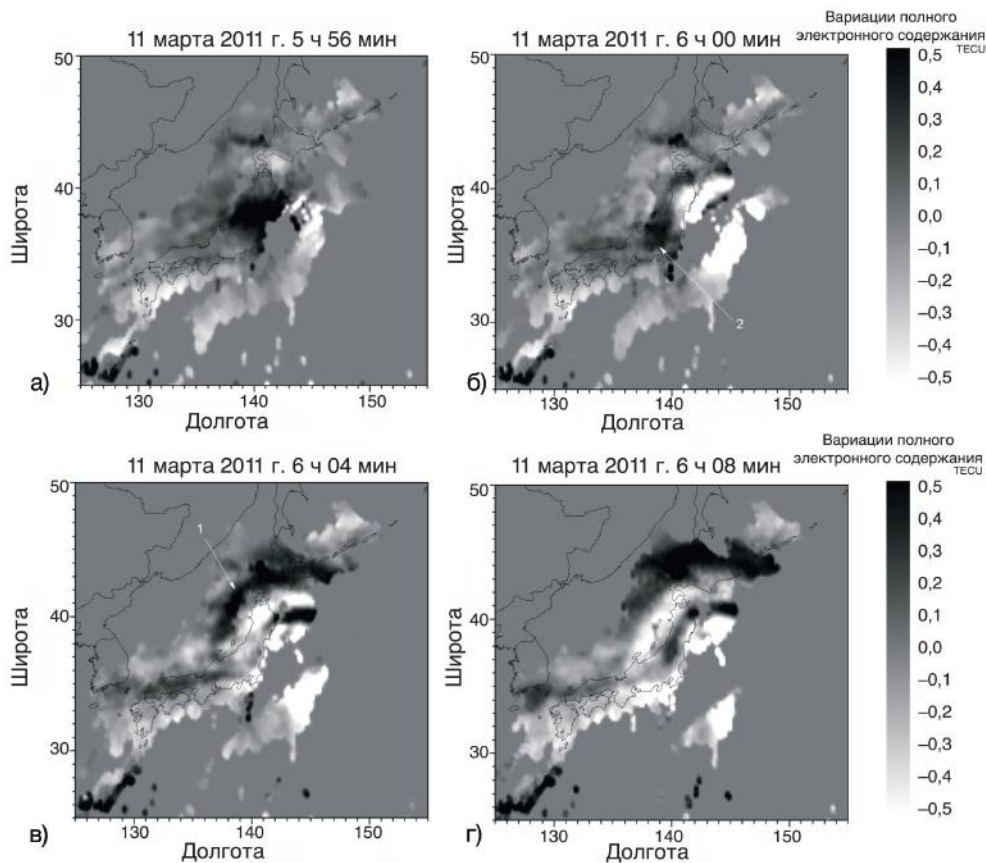
ИОНОСФЕРА НАД ТОХОКУ-ОКИ

Землетрясение, произошедшее 11 марта 2011 года восточнее японского острова Хонсю (с координатами эпицентра в океане $38,32^\circ$ с.ш., $142,37^\circ$ в.д.), имело магнитуду, равную 9,0 (сейсмический момент соответствовал $3,9 \times 10^{22}$ Дж, согласно данным Геологической службы США). После этого землетрясения, получившего название “события в Тохоку-оки”, возникло разрушительное цунами, достигшее вблизи

побережья высоты в несколько десятков метров и приведшее к аварии на атомной станции “Фукусима-1”, что привело к трагедии национального масштаба. Это землетрясение класса мега-события, то есть имеющее глобальное влияние, начиная с 1900 г., было только 5 подобных событий), произошло вблизи от самой плотной сети приемных GPS-станций.

Американская группировка GPS включает не менее 24-х спутников “Навстар”, расположенных на шести 12-часовых круговых орбитах высотой около 20 тыс. км и наклоном 55° ; сигналы от четырех спутников можно принимать из любой точки на земной поверхности. Спутники передают высокостабильные когерентные сигналы на частотах 1575,42 и 1227,6 МГц. Для зондирования ионосферы используют измеряемые фазы радиосигналов, распространяющихся от спутника до наземного приемника. Фазовые данные позволяют вычислить полное электронное содержание ионосферных возмущений (ПЭС): интеграл от плотности электронной концентрации – вдоль луча, соединяющего передатчик и приемник, а также его вариации.

Японская сеть насчитывает более 1200 GPS-приемников, каждый из которых регистрирует одновременно

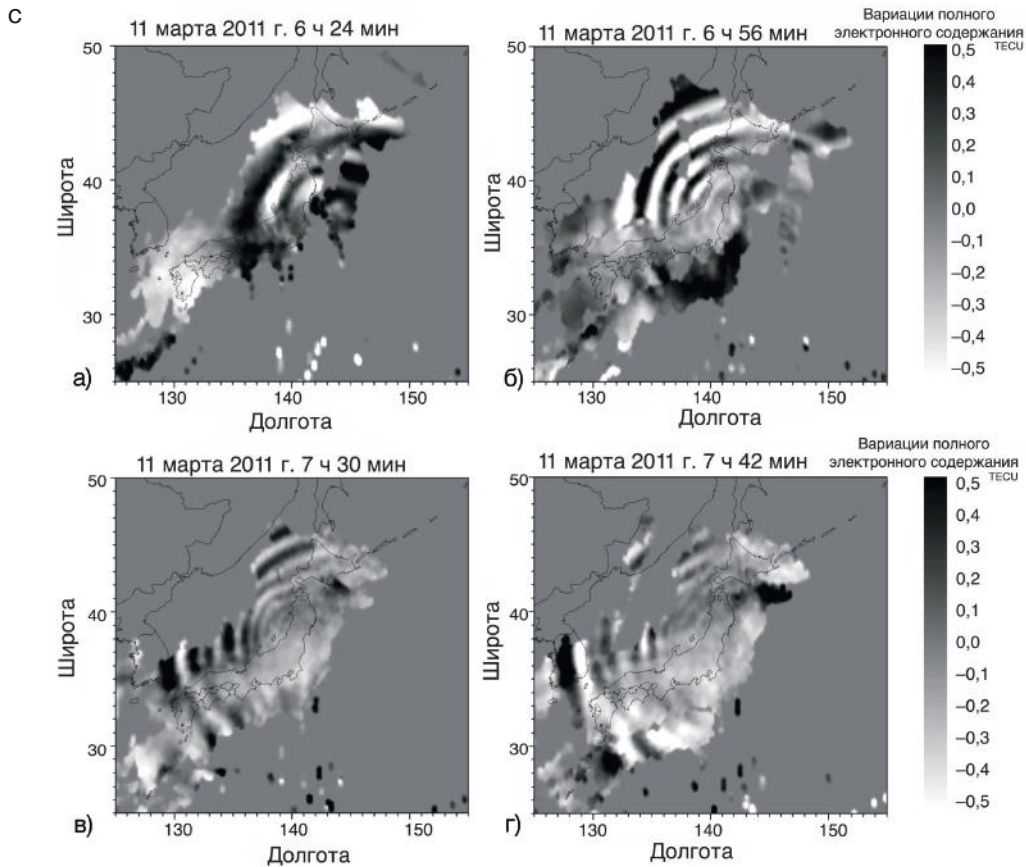


Начало генерации акустическими волнами ионосферных возмущений, вызванных землетрясением (показано стрелкой 1) и сейсмической волной Релея (показано стрелкой 2). Для каждого фрагмента двумерной карты (а), б), в), г)) по вертикальной и горизонтальной осям отложены широта и долгота соответственно; в верхней части каждого фрагмента указаны дата и универсальное время по Гринвичу. Справа приведена шкала вариаций ионосферных возмущений. По данным Куницына и др., 2011 г.

сигналы от примерно 10-ти спутников “Навстар”. Такая сеть GPS-приемников позволяет получать пространственно-временные распределения электронной концентрации с разрешением, достаточным для выявления картины волновых движений. Для

анализа “отклика” ионосферы на возмущения от сейсмических событий производилось разделение “фоновой” (медленно меняющейся) и “волновой” (быстро меняющейся) компонент распределения электронной концентрации. В результате совместной ра-

боты исследователей из МГУ и ИФЗ РАН, принятой сразу после события в Тохоку-оки, были созданы двумерные карты вариаций вертикального содержания ПЭС, измеряемого в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ электронов/м}^3$),



Ионосферные возмущения: эволюция и затухание расходящегося кольцевого возмущения, обусловленного воздействием акустико-гравитационных волн, порождаемых землетрясением. Справа показана шкала вариаций ионосферных возмущений. По данным В.Е. Куницына и др. (2011 г.).

интервалом 2 мин и пространственным разрешением 18,5 км, для региона Японских островов (25–50° с.ш., 125–155° в.д.) на протяжении нескольких дней, приуроченных к указанному землетрясению. Поскольку ионосфера не полностью “просвечивается” радиосигналами, то существуют ее области, которые не

ресекают лучи спутника-приемника; отсюда возникает мозаичность изображений.

Возмущение ионосферы (после рассматриваемого землетрясения в Тохoku-оки) начинается с внезапного увеличения ПЭС (порядка 3 TECU) в области с радиусом около 50 км (сдвинутой восточнее на

200 км от проекции эпицентра на ионосферу) на 6-й минуте после землетрясения; это даже быстрее, чем время, необходимое для распространения акустической ударной волны. Радиус области повышенного ПЭС достигает нескольких сотен километров к 10-й минуте, а за фазой сжатия начинает

формироваться фаза разряжения. В результате профиль ПЭС приобретает характерную для ударной акустической волны, генерируемой в эпицентре в момент землетрясения, форму буквы N. Отметим, что быстрое формирование фронта возмущения ПЭС свидетельствует о внезапном и значительном “поднятии” поверхности океана и, следовательно, – о возникновении цунами. Информация об этом в ПЭС зарегистрирована менее чем через 10 минут после события, тогда как разрушительной волне цунами (учитывая ее скорость – 200 м/с) потребовалось от 20 минут до получаса для того, чтобы достичь побережья. Эта разница во времени может быть использована Службой предупреждения о цунами заранее.

В верхней ионосфере от области, где прошла акустическая волна, начинают распространяться два типа возмущений: вдоль суши, на юго-запад и на север, со скоростью около 3 км/с и в виде кольцевого сегмента (на северо-запад) со скоростью около 1 км/с. Скорости возмущений соответствуют сейсмической волне Релея и акустико-гравитационной волне, распространяющимся вдоль земной поверхности и в верхней атмосфере.

От места “входа” первоначального акустическо-

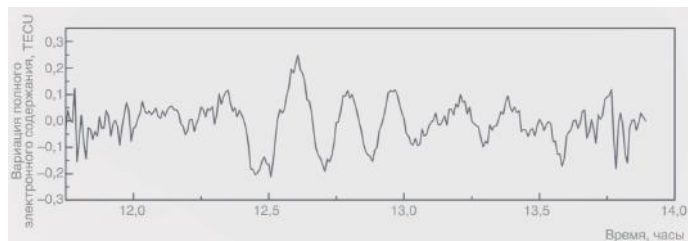
го импульса в ионосферу распространяется отчетливое ионосферное возмущение в виде концентрических кругов, длина волны, амплитуда и скорость которого уменьшаются с течением времени от 1 км/с до 200 м/с, что соответствует скоростям акустико-гравитационных волн на этих высотах. Наблюдения показали, что такое возмущение длится несколько часов (в данном случае около 3-х часов); это трудно объяснить, если, например, предположить относительно “быстрое” возвращение возмущенной поверхности океана к равновесному положению, с последующим формированием цунами в источнике ионосферного возмущения. Такое упрощенное развитие процесса может и не быть, если учесть, что во вращающейся жидкости (или в атмосфере) с исчезновением возмущающей силы имеет место процесс геострофической адаптации, обнаруженный еще в 1941 г. академиком А.М. Обуховым; при этом часть энергии от первоначального возмущения “уносится” акустико-гравитационными волнами, а другая часть остается локализованной в области первоначального возмущения. Соответственно, в месте начального возмущения могут существовать долгоживущие локализованные вихри, исчезающие под

влиянием происходящих сравнительно медленных диссипативных процессов. При этом источник может находиться как на поверхности океана (в области “выхода” акустического импульса, после его распространения в толще океана), так и в атмосфере. Подобные явления наблюдались в ионосфере после проведения наземных взрывов.

ИОНОСФЕРА В ДАЛЬНОЙ ОТ ТОХОКУ-ОКИ ЗОНЕ

Рассмотрим теперь “отклик” ионосферы вдали от эпицентра. Поскольку после землетрясения в Тохоку-оки возникла мощная волна цунами, то справедливо рассматривать ее как источник атмосферных волн, – причем на значительном расстоянии от эпицентра, где фронт возмущения на поверхности океана уже сформировался. Такие условия складываются при распространении цунами на восток, через Тихий океан. Между Японией и Южной Калифорнией, – местом, где сосредоточена еще одна плотная сеть станций GPS, расположены Гавайские острова. С использованием данных этой сети (вместе с данными приемников на Гавайских островах), был реконструирован “отклик” ионосферы на землетрясение в Тохоку-оки, в дальней от эпицентра зоне (по изме-

График вариаций ионосферных возмущений, полученных для GPS-станции (mkea) и спутника (prn05) над Гавайскими островами 11 марта 2011 г. По данным С.Л. Шалимова и др. (2017 г.).

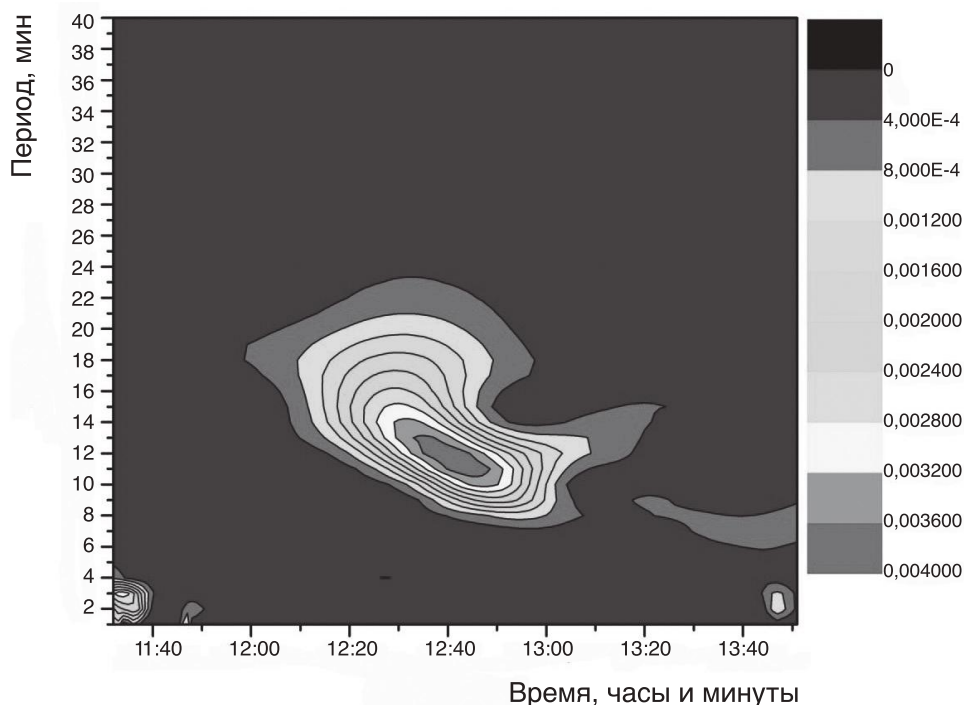


рениям вариаций TEC на одном из гавайских приемников GPS).

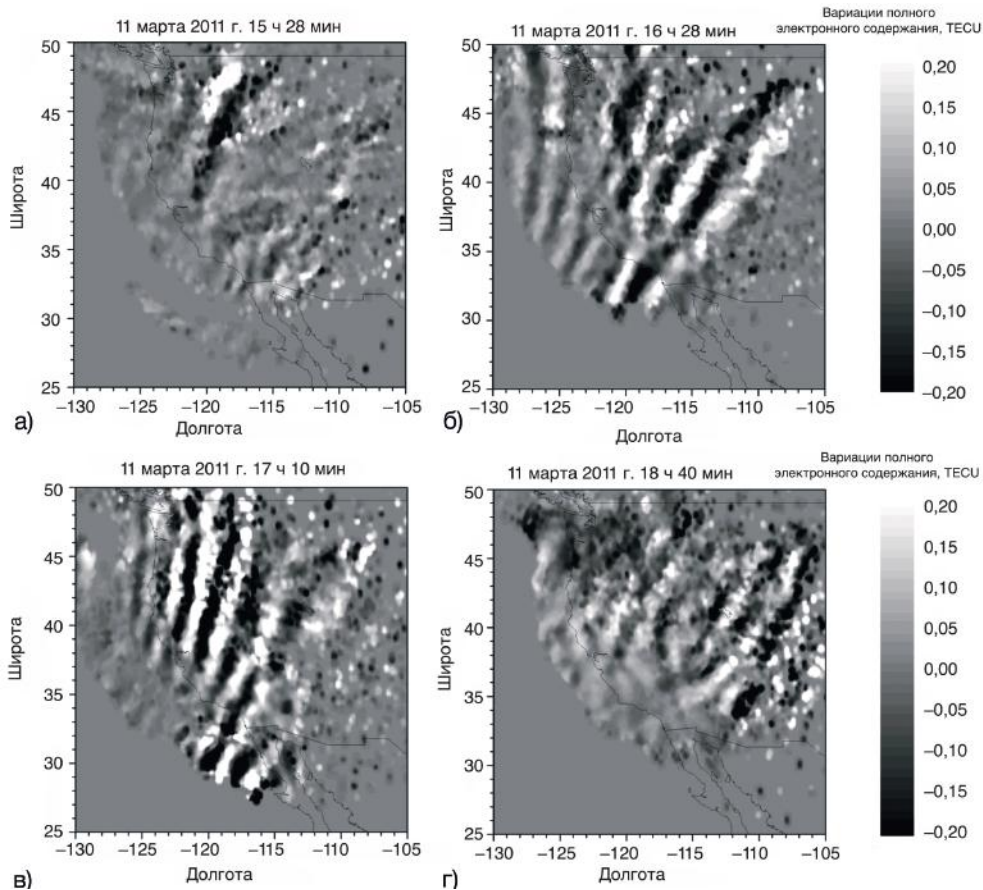
Волновые возмущения в ионосфере опережают цунами приблизительно на 1 час. Это подтверж-

дено регистрацией цунами с помощью системы DART (буй № 51 407 станции NOAA) вблизи о. Big Island, Гавайи (19,6° с.ш., 203.5° в.д.). При этом обнаруженные вариации плотности ионосферы на-

ходятся в диапазоне от 10 до 20 минут; это соответствует диапазону внутренних гравитационных волн, а низкочастотная часть возмущения приходит раньше, как и ожидалось.



"Отклик" ионосферы на землетрясение в Тохоку-оки: вейвлет-спектр вариаций. Справа представлена шкала сигнала (темный цвет внизу шкалы соответствует наибольшей интенсивности сигнала). По данным С.Л. Шалимова и др. (2017 г.).



Двумерные карты вариаций ионосферных возмущений, зафиксированных GPS-станциями над западным побережьем Северной Америки после землетрясения в Тохоку-оки (фрагменты соответствуют определенным моментам времени): а) – в 15 ч 28 мин, б) – в 16 ч 28 мин, в) – в 17 ч 10 мин, г) – в 18 ч 40 мин. По данным С.Л. Шалимова и др. (2017 г.).

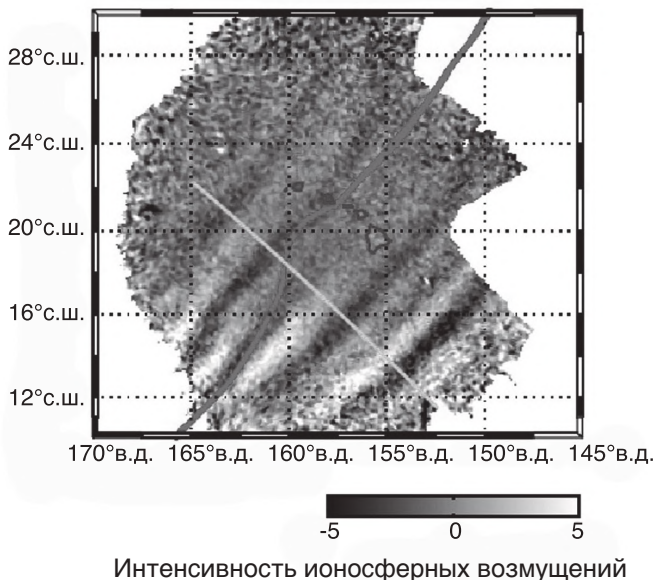
Далее рассмотрим ионосферный отклик, используя данные, полученные от плотной сети GPS-станций на западном побережье Северной Америки. Ионосферные волновые возмущения наблюдают в этом регионе и вне связи с сейсмическими события-

ми; они могут включать, например, ночные среднemasштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (*medium-scale traveling ionospheric disturbances, MSTIDs*) – распространяются на юго-запад, имеют длину волны от 200 до 500 км и протя-

женность по фронту – до 2000 км; а также дневные MSTIDs, обычно наблюдаемые зимой и в равноденствие с длиной волны от 300 до 1000 км и распространяющиеся на юго-восток до полудня и на юго-запад – после полудня. В промежуточные часы

Двумерная карта распределения вариаций свечения атмосферы линии 630,0 нм над районом Гавайских островов в диапазоне от 0,3 до 1,7 МГц, после землетрясения в Тохоку-оки. Жирная кривая соответствует местоположению цунами; в центре контурами очерчены Гавайские острова; прямой линией указано направление распространения цунами. На шкале внизу показана интенсивность ионосферных возмущений (в процентах). Адаптированный рисунок; взят из работы Makela et al. (2011 г.).

11 марта 2011 г. 12 ч 58 мин 01 с по Гринвичу, 0,3–1,7 МГц



наблюдается переход от одного режима распространения к другому, в результате чего хорошо организованные фронтальные структуры разрушаются из-за наложения MSTIDs, распространяющихся в разных направлениях.

Хорошо организованное волновое возмущение, зарегистрированное в ионосфере над западным побережьем Северной Америки, появилось 11 марта 2011 г. и наблюдалось в течение почти четырех часов. Направление распространения волновых цугов не вполне соответствует характерным для этого региона (и упомянутым выше) фоновым дополненным волновым возмущениям, отличаясь от

них временем появления (зима, равноденствие) и длительностью. Оцениваемая из данных скорость распространения волн в атмосфере – около 300 м/с. Они опережают предполагаемый источник (цунами) приблизительно на час, поскольку, по данным Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA), цунами достигло западного побережья США через 10–11 часов после землетрясения, произошедшего в Тохоку-оки.

Обратимся еще к одному экспериментальному подтверждению вывода об опережении ионосферных цунами, полученному группой американских исследователей. Отклик верх-

ней атмосферы на цунами после землетрясения 11 марта 2011 г. был обнаружен в дальней зоне от эпицентра, в красной линии свечения атомного кислорода, концентрация которого пропорциональна плотности ионосферных электронов. Измерения осуществлялись с помощью широкоугольной камеры, расположенной на вулкане Халеакала на о. Мауи (Гавайи), и “показали” наличие волновых возмущений, распространяющихся на высотах около 250 км в сторону от эпицентра, со скоростями, приблизительно равными скорости цунами. Это заключение было основано на совпадении времени появления волновых структур “свечения”, их

направления и скорости распространения с теми же характеристиками цунами. Однако сообщалось также и о появлении волновых возмущений за 1 час до прихода цунами, с вариациями интенсивности свечения в диапазонах фильтров от 0,3 до 1,7 мГц (радиодиапазон внутренних гравитационных волн). Оказалось, что “отклик” ионосферы представлен двумя группами волн – опережающими цунами и отстающими от нее. При этом отстающими оказываются более высокочастотные волны. При сравнении картины возмущений, наблюдаемой в вариациях интенсивности свечения с вариациями ПЭС можно отметить их хорошее соответствие.

Итак, с использованием данных, полученных от плотных сетей, принимающих сигналы GPS-станций в Японии и в Северной Америке, были получены двумерные распределения полного электронного “содержания” ионосферы как в ближней, так и в дальней зоне от эпицент-

Общая схема распространения сверхдлинных волн (от передатчика к приемнику) между океаном и нижней ионосферой, “возмущенной” атмосферной внутренней гравитационной волной, источником которой является цунами.

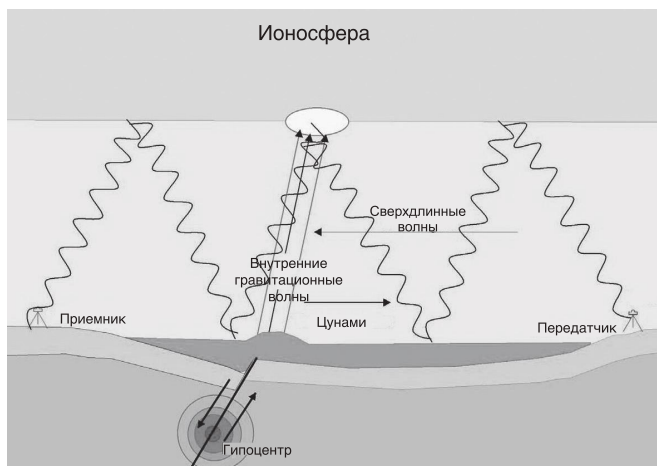
ра подводного землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. Главным результатом стало обнаружение в верхней атмосфере, вдали от эпицентра, волновых цугов, которые соответствуют атмосферным гравитационным волнам, генерируемым цунами. Установлено, что атмосферные волны при распространении могут заметно “опережать” цунами: этот эффект может быть использован в службах раннего предупреждения о цунами. Наличие у цунами предвестника в виде атмосферных внутренних гравитационных волн было подтверждено в численном моделировании и при анализе дисперсионного соотношения для волн в атмосфере.

нижняя ИОНОСФЕРА
НАД ЦУНАМИ

При распространении в атмосфере внутренних гравитационных волн, ге-

нерируемых цунами, в верхнюю ионосферу эти атмосферные волны проходят “через” нижнюю ионосферу. Поэтому должен наблюдаться отклик и в нижних слоях ионосферы.

Специфика эксперимента, предпринятого для проверки этого обстоятельства российскими исследователями из ИФЗ РАН, заключалась в том, что использовался метод дистанционного исследования воздействий снизу на ионосферу, – регистрировались амплитудно-фазовые характеристики сигналов длинных и сверхдлинных волн, получаемых радиостанциями. Частоты этих сигналов (3–30 кГц) таковы, что они способны распространяться на тысячи километров от передатчика до приемника со слабым затуханием (~2 дБ на 1000 км), отражаясь от стенок естественного волновода Земля – ионосферы. Отражение от верхней



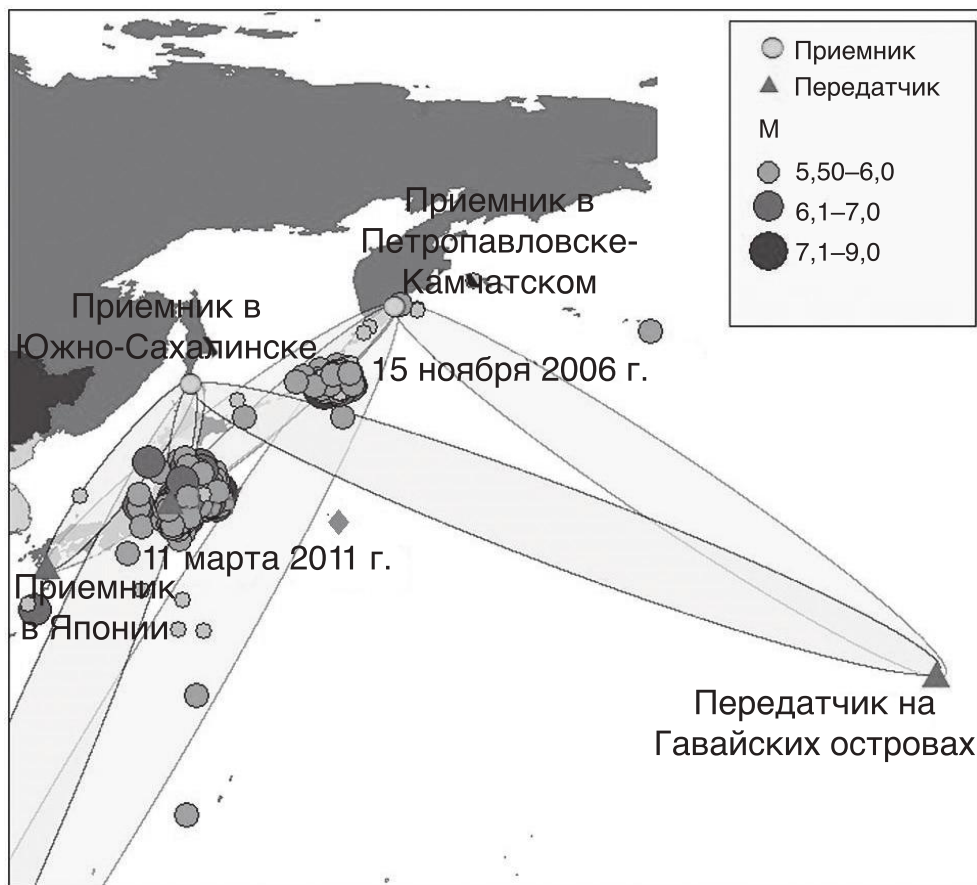


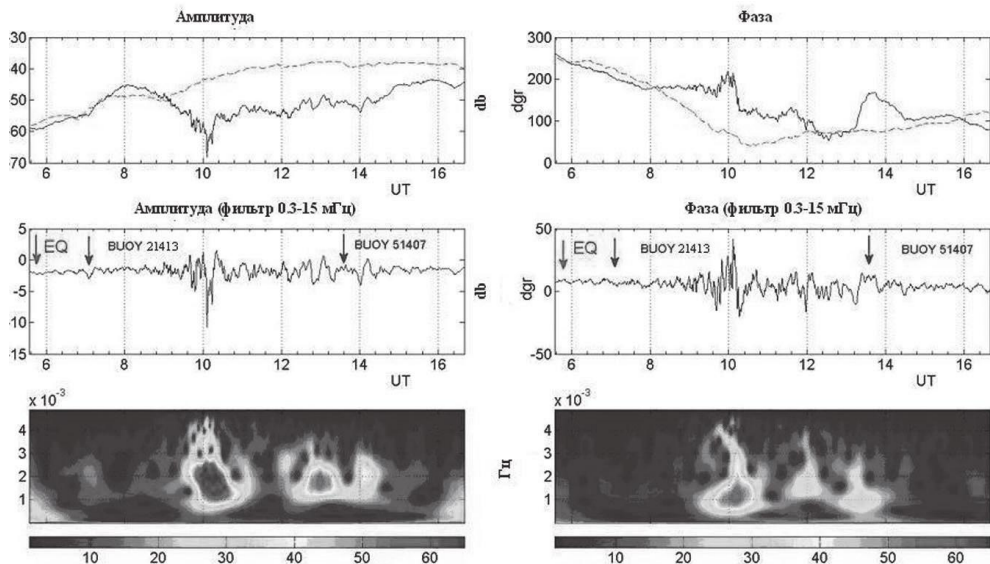
Схема взаимного расположения сверхдлинноволновых приемников и передатчиков, а также эпицентров двух землетрясений (Японского, 11 марта 2011 г. и Курильского, 15 ноября 2006 г.) и положение DART и GPS-станций в исследуемом регионе. Кружками обозначены эпицентры землетрясений разной магнитуды (M) в период с ноября 2006 г. по март 2011 г. Эллипсами показаны зоны наиболее высокой чувствительности сверхдлинноволновых трасс; эллипсами показаны трассы, соединяющие приемники в Петропавловске-Камчатском (РТК) и в Южно-Сахалинске (YSH) с перечисленными выше передатчиками; ромбом в центре – DART 21413. По данным USGS/NEIC.

стенки волновода – ионосферы – происходит на высотах около 60 км днем и около 85 км ночью. Амплитуда и фаза сигналов является чувствительным индикатором состояния ионосферы.

Конечно, при таком методе исследования неизвестно, в какой именно

точке трассы имело место возмущение радиосигнала от сверхдлинных волн. Ясно только, что оно могло быть где-то в зоне чувствительности, между приемником и передатчиком. Несмотря на такой недостаток метода сверхдлинноволнового радиопросвечивания,

вполне возможен мониторинг состояния нижней ионосферы над всем Тихоокеанским регионом. В данном случае исследовали распространение сверхдлинных волн от передатчика к приемнику на трассе между океаном и нижней ионосферой, возмущенной атмосферной



Графики амплитуд и фаз сигнала, полученных с передатчика NPM (21,4 кГц) и зарегистрированного в Южно-Сахалинске 11 марта 2011 г.: верхняя панель – исходный сигнал, средняя – отфильтрованный. Пунктиром на графиках обозначен усредненный сигнал (фон); стрелки указывают на момент землетрясения и на регистрацию прихода цунами на станциях DART. Внизу – вейвлет-спектры отфильтрованного сигнала; шкалы внизу отражают интенсивность сигнала: темный цвет справа соответствует наибольшей интенсивности. По данным Rozhnoi et al. (2012).

внутренней гравитационной волной (источник которой – цунами).

Используемые российскими учеными приемные станции находятся в Петропавловске-Камчатском, Южно-Сахалинске и Мошири (Япония). Приемники измеряют одновременно амплитуду и фазу сигналов от нескольких передатчиков: JJY (40 кГц) и JJI (22,2 кГц) – в Японии, NWC (19,8 кГц) – в Австралии и NPM (21,4 кГц) – на Гавайских островах, с шагом дискретизации в 20 секунд. Для анализа сигналов от сверхдлинных

волн выбирается ночное время, – когда ионосфера наиболее “чувствительна” к внешним воздействиям.

Для того, чтобы представить, как выглядят возмущения амплитуды и фазы от волн на трассах в ночное время, рассмотрим снова пример землетрясения, произошедшего 11 марта 2011 г. в Тохоку-оки. Согласно расчетам, заложенным в программе ТТТ (Tsunami Travel Time), направление распространения цунами после этого события должно было быть приблизительно вдоль трассы, “со-

единяющей” передатчик на Гавайях (NPM) и приемник в Южно-Сахалинске (YSH); другие трассы были контрольными. Было зарегистрировано аномальное уменьшение амплитуды (до порядка 10 Дб) и вариации (отклонения) фазы сигнала до 50° по сравнению с “невозмущенным” периодом. При этом “приход” цунами на глубоководную станцию DART-21413 был зарегистрирован через 1 ч 13 мин после землетрясения (цунами распространилось в юго-восточном направлении на 1224 км со средней

скоростью 284 м/с). Почти одновременная регистрация внутренних гравитационных волн (ВГВ) в ионосфере и цунами в океане указывает на более раннюю генерацию ВГВ и опережение атмосферной волной порождающее ее цунами (необходимо около часа для того, чтобы атмосферная волна достигла нижней ионосферы). Кроме того, необходимо около 30 мин для того, чтобы нейтральные частицы атмосферы перераспределились в процессе их ионизации рассеянным излучением Солнца в линии Лайман- α (главный источник ионизации ночной нижней ионосферы). Значительный подъем высоты ионосферы при прохождении “вечернего терминатора”, по-видимому, временно маскирует развитие возмущения. Отметим почти идентичный спектральный состав цунами и ВГВ в

нижней ионосфере – от 8 до 30 мин. Таким образом, предположение о цунами, как об источнике ВГВ, подтверждается.

Приведенные примеры демонстрируют большие возможности глобальных сетей наблюдения, но далеко не исчерпывают их. Перспективными направлениями в развитии исследований в ближайшее время будет практическое воплощение “ионосферного сейсмометра”, – когда в процессе зондирования ионосферы станет возможным изучение сигнала (возмущение ионосферной плотности), обусловленного прохождением сейсмической волны Рэлея, и соответствующей дисперсии групповой скорости; по этой информации можно восстанавливать модуль упругости литосферы в точке “под ионосферой”. Кроме этого, GPS-сигналы, регистрируемые с помощью се-

ти приемных станций как ионосферный “отклик” на прохождение акустических волн после ряда сильнейших ($M > 8,2$) подводных землетрясений, могут содержать информацию о размерах эпицентра землетрясения и об “энергетических характеристиках” сейсмических событий.

В ИФЗ РАН проведены оценки “сейсмической” энергии от таких событий по форме характерного возмущения полного электронного содержания ионосферы (длительности фазы сжатия ударной волны), которые согласуются с оценками, полученными в результате изучения сейсмических данных. Важно отметить, что такие оценки энергии источника могут быть получены на интервале менее 15 мин после события; это позволяет заблаговременно информировать население о возможности возникновения цунами.

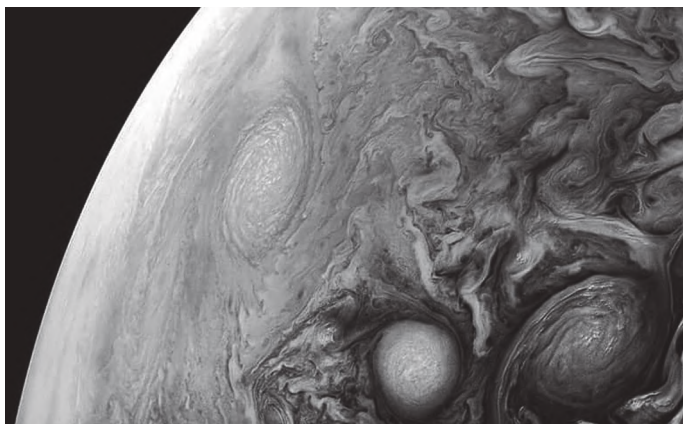
Информация

“Юнона”: Юпитер крупным планом

К июню 2018 г. американская АМС “Юнона” (“Juno”); Земля и Вселенная, 2011, № 6, с. 31) пролетела расстояние 230 млн км на орбите искусственного спутника Юпите-

ра. 24 октября 2017 г. состоялось 9-е по счету сближение станции с Юпитером (Земля и Вселенная, 2018, № 2, с. 103). 10-й пролет был выполнен 16 декабря 2017 г. на минимальном расстоянии (13 345 км) от верхней кромки облаков газового гиганта. 7 февраля 2018 г. “Юнона” совершила 11-й пролет на расстоянии 3,5 тыс. км от вершин облаков планеты.

Напомним, что 27 августа 2016 г. станция пролетела со скоростью 208 тыс. км/ч на минимальной высоте 4200 км от верхней кромки облаков Юпитера и вышла на стабильную орбиту вокруг планеты (Земля и Вселенная, 2017, № 5, с. 76–78). Первые два месяца после выхода на орбиту вокруг Юпитера (4 июля 2016 г.) станция затратила на проверку



Северное полушарие Юпитера на 50,2° широты. Снимок сделан 1 апреля 2018 г. во время пролета АМС «Юнона» около Юпитера на расстоянии 12 326 км – до верхних слоев облачного покрова. Фото NASA/JPL/Caltech/SwRI/MSSS/К. Гилл.

всех научных инструментов, а научные данные от нее были получены только в конце августа 2017 г. Переход на новую, более удобную для ведения исследований орбиту, должен был состояться в середине октября 2016 г., однако буквально перед началом этого маневра NASA зафиксировало неполадки в работе двигателя; поэтому пришлось отложить маневр до даты следующего сближения станции с Юпитером – 11 декабря 2016 г. Впоследствии специалисты отказались от перевода станции на более близкую к Юпитеру орбиту; поэтому она сближается с планетой не раз в две недели, как планировалось, а раз в 53,4 дня. Начиная с 2017 г. исследования Юпитера проводятся - с высокоэллиптической орбиты: высота перигевия – 4700 км, высота в апогее – более 8 млн км (39 R_J), наклонение – 89,8°, период обращения – 53 сут 10 ч 03 мин.

1 апреля 2018 г. произошло 12-е сближение станции с Юпитером. Удаляясь от него, «Юнона» смогла сфото-

графировать с необычного ракурса Большое Красное Пятно (БКП) – «вечный» антициклон на экваторе (направление съемки – вид «снизу», со стороны Южного полушария). Как отмечают в NASA, такие снимки позволяют сравнить этот атмосферный вихрь с другими ураганами, бушующими около южного полюса планеты, которые можно увидеть в нижней части снимков (см. стр. 2 обложки). Исследование структуры, динамики и химического состава БКП – главная задача программы АМС.

Причина, по которой антициклон в БКП продолжает существовать столь долгое время, связана с физической природой Юпитера: у планеты нет твердой поверхности, поэтому циркулирующие в атмосфере вихри сохраняются в течение всего времени его наблюдения – более 350 лет. У астрономов пока нет точного объяснения столь яркой окраски шторма, но предполагается, что это могут быть либо сложные органические молекулы,

либо красный фосфор; либо полирадикалы серы, возникающие в результате химической реакции при ультрафиолетовом облучении и термическом воздействии на гидросульфиды аммония (входящие в состав облаков).

По данным «Юноны» оказалось, что вихрь в БКП уменьшается в размерах, приобретая при этом более круглую форму и растягиваясь по высоте (Земля и Вселенная, 2015, № 1, с. 86). Начиная с 2005 г., скорость дрейфа урагана на запад по отношению к скорости вращения планеты неуклонно возрастала. БКП становится темнее (с 2014 г.) на длинах волн короче 650 нм, то есть вихрь стал более оранжевым, при этом его ядро уменьшилось в размерах. Это может быть связано с увеличением потока ультрафиолетового излучения на больших высотах; взаимодействуя с химическими веществами в облаках, он делает более насыщенным цвет. Скорости ветров внутри бури увеличивались на его восточном и западном краях и уменьшались на севере и на юге, что приводило к уменьшению относительной завихренности циркуляционных

процессов. Предполагается, что размер и скорость дрейфа БКП тесно коррелируют с его местоположением и, возможно, с изменениями окружающих его атмосферных потоков. Изменения структуры и цвета урагана, наблюдавшиеся в 2014–2017 гг., могут быть вызваны изменениями во внутренней динамике ветров (но не связью со скоростью дрейфа). Дальнейший анализ вертикальной структуры вихря, профиля температуры и ветровой динамики даст более ясное понимание процессов его эволюции.

Во время 10–12-го пролетов около Юпитера с помощью АМС “Юнона” получены новые данные о структуре и химическом составе его атмосферы. Анализ ее динамики показал, что гравитационное поле планеты ассиметрично в направлении север–юг. Ученые связывают этот факт с движением конвективных газовых потоков, выносящих внутреннее тепло в верхние слои атмосферы; оно проявляется в виде светлых зон и темных поясов. В области светлых зон отмечается повышенное давление, соответствующее восходящим потокам. Облака, образующие зоны, располагаются на более высоком уровне, а их светлая окраска объясняется, видимо, повышенной концентрацией яркочерных кристаллов аммиака. Располагающиеся ниже темные облака поясов представляют собой области нисходящих потоков, предположительно состоящих из красно-коричневых кристаллов гидросульфида аммония и имеющих более высокую температу-

ру. Потоки на северном и южном полюсе Юпитера могут переносить разную массу вещества, что объясняет неравномерность влияния гравитационного поля. Удалось измерить массу (около 1% М_J; что составляет 3 М₃) и глубину знаменитых облачных поясов (их толщина составляет около 3000 км); ниже атмосферные потоки теряют скорость (возможно, их “замедляет” сильное магнитное поле Юпитера) и разрушаются. Для сравнения: на земную атмосферу приходится лишь 10⁻⁶ массы нашей планеты. Из-за быстрого периода вращения Юпитера (около 10 часов) облачные пояса планеты имеют форму вложенных цилиндров. Данные, полученные с помощью “Юноны”, говорят о том, что ниже 3000 км характер вращения вещества планеты уже соответствует характеристикам твердого тела.

С помощью инструмента JIRAM получены инфракрасные изображения атмосферных образований, находящихся на расстоянии 50–70 км ниже облачного покрова планеты. Оказалось, что на северном полюсе Юпитера доминирует центральный циклон, окруженный восемью меньшими циклонами диаметрами от 4000 до 4600 км. Вместе они образуют фигуру, похожую на восьмиугольник. На южном полюсе тоже есть доминирующий, центральный, циклон: вокруг него расположено пять циклонов пентагональной формы диаметром от 5600 до 7000 км. Циклоны очень медленно дрейфуют вокруг полюсов и, несмотря на близкое расположение друг к другу, сохраняют удивительную стабильность, не распадаясь и

не сливаясь в одно целое. Ничего подобного нет ни на одной другой планете Солнечной системы.

NASA опубликовало захватывающие видео движущихся облаков Юпитера из снимков, сделанных с помощью АМС “Юнона”. Экспертам теперь будет легче определить траекторию и скорость движения облаков; благодаря этим параметрам можно изучать погодные условия на планете.

24 мая 2018 г. “Юнона” выполнила очередной, 13-й, пролет около Юпитера. Атмосфера планеты на снимках, сделанных “Юноной”, похожа на огромный кипящий котел: в ней можно найти вихри и облака, созданные атмосферными течениями самых разных форм и размеров. Обнаружено больше антициклонов (центров высокого давления), чем циклонов (центров низкого давления), причем первые обычно выглядят яркими, имеют овальную (или круглую) форму и “живут” гораздо дольше циклонов. Эти вихри существуют в определенных зонах, где есть благоприятные условия для их образования, и могут расти путем слияния с другими штормами.

Следующее сближение с планетой-гигантом запланировано на 16 июля 2018 г. По его результатам специалисты оценят состояние всех систем аппарата и примут решение о продлении (или же прекращении) миссии.

*Пресс-релизы NASA,
6 апреля, 19 и 31 мая 2018 г.*