

Инфракрасное характеристическое излучение фазовых переходов первого рода и его связь с оптикой атмосферы

В.А. Татарченко*

*Saint-Gobain Crystals,
Residence "Defense 2000"
92800 Puteaux, France*

Поступила в редакцию 13.09.2009 г.

Показано, что основу природы некоторых источников инфракрасного излучения земной атмосферы составляет инфракрасное характеристическое излучение (ИКХИ) фазовых переходов первого рода — конденсации и кристаллизации воды. Приводятся экспериментальные и теоретические доказательства существования ИКХИ. Теория явления основывается на утверждении, что частица (атом, молекула или кластер) в процессе перехода с метастабильного более высокого энергетического уровня (пар или жидкость) на более низкий устойчивый уровень (жидкость или кристалл) испускает один или несколько фотонов, энергия которых определенным образом связана со скрытой энергией фазового перехода. Этот эффект должен играть очень важную роль в атмосферных явлениях: это один из каналов охлаждения земной атмосферы; образование облаков, и в особенности штормовых облаков, должно сопровождаться интенсивным ИКХИ, которое может быть зарегистрировано для определения особенностей процесса и штормовых предупреждений. Эффект может быть использован для аккумулялирования энергии в атмосфере. ИКХИ может объяснить инфракрасное излучение и красный цвет Юпитера.

Ключевые слова: фазовые переходы первого рода для воды: конденсация и кристаллизация; инфракрасное излучение; атмосферные явления; образование облаков; Юпитер; инфракрасный лазер; first order phase transitions of water: condensation and crystallization; infra-red radiation; atmospheric phenomena; formation of hail; Jupiter; infra-red laser.

Введение: формулировка проблемы

Излучение является одним из ключевых элементов физики атмосферы, поэтому неслучайно для решения научных проблем, лежащих в основе глобального изменения климата, создана Международная программа измерения атмосферного излучения (Atmospheric Radiation Measurement Program — ARMP) [1]. Ее деятельность сфокусирована на важнейшей роли облаков в радиационных атмосферных процессах. По нашему мнению, несмотря на большой объем программы (в программе участвуют 50 стран), она могла бы быть значительно углублена включением в нее исследований инфракрасного характеристического излучения (ИКХИ) при фазовых переходах первого рода — нового физического явления, описанного в работах [2–12]. ИКХИ, сопровождающего конденсацию водяного пара и замерзание воды в атмосфере, могло бы дать существенные сведения о процессах образования облаков и общем энергетическом балансе атмосферы. Действительно, 40% солнечной энергии, достигающей поверхности Земли, расходуется на испарение воды, а механизм ИКХИ должен играть важную роль в последующем перераспределении этой энергии через конденсацию и кристаллизацию

воды в атмосфере, включая и переизлучение в космос выделенной при этом энергии.

1. Инфракрасное характеристическое излучение при фазовых переходах первого рода

Общепринятая точка зрения состоит в том, что при кристаллизации и конденсации любых веществ скрытая теплота этих фазовых переходов первого рода выделяется в виде тепла. Это означает, что каждая частица (атом, молекула или кластер) при переходе с более высокого энергетического уровня в метастабильной, неустойчивой для данных условий фазе (пар или расплав) на более низкий уровень в устойчивой фазе (жидкость или кристалл) освобождается от избыточной энергии, равной скрытой теплоте кристаллизации или конденсации, безызлучательным путем, порождая несколько фотонов. Но еще 45 лет назад было сделано предположение [3–5], что частица может освободиться от избытка этой энергии путем излучения одного или нескольких фотонов. При пересчете энергии перехода на одну частицу оказывается, что для всех веществ излучение должно лежать в инфракрасной области. В настоящее время это предположение получило подтверждение. В работах [2–12] и цитируемой там литературе приводятся теория этого

* Виталий Антонович Татарченко (vitali.tatartchenko@orange.fr).

явления и многочисленные экспериментальные доказательства существования ИКХИ при фазовых переходах первого рода (главным образом при кристаллизации и конденсации) для ряда веществ: среди них вода, многие щелочно-галлоидные соединения, сапфир, хлорид свинца, теллур, германий, пентагидрат тиосульфата натрия и некоторые металлы.

В данной статье обсуждается только один аспект проблемы ИКХИ, который связан с оптикой земной атмосферы, — инфракрасное излучение при конденсации и кристаллизации воды. По нашему мнению, это излучение может объяснить природу ряда источников инфракрасного излучения в атмосфере Земли и некоторых планет.

2. Источники инфракрасного излучения в земной атмосфере

2.1. Инфракрасное излучение, фиксируемое искусственными спутниками земли (ИСЗ), позволяет получать интересную информацию о процессах, происходящих на земной поверхности и в земной атмосфере. Однако не всегда трактовка инфракрасных изображений является однозначной. Рассмотрим для примера результаты, представленные в работе [13]. Здесь использовались данные, полученные спутниковым радиометром AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) в пяти каналах излучения с длинами волн в диапазонах: 1) 0,58–0,68; 2) 0,725–1,1; 3) 1,6 или 3,55–3,95; 4) 10,3–11,3; 5) 11,5–12,5 мкм. Анализировалось изображение западной окраины Североамериканского континента, обладающего источниками (размером от 600×15 до $1,5 \times 1,5$ км) постоянной или периодической (особенно активной в период дождей) инфракрасной радиации с аномально высокой интенсивностью. Оказалось, что этими источниками являются:

1) береговая линия океанского побережья и побережья озер;

2) склоны хребтов с высотой более 2500 м, при этом инфракрасное излучение наиболее контрастно распределяется на чередующихся хребтах и впадинах;

3) ареальное инфракрасное излучение впадины Грейт-Велли, которое наиболее заметно в сезон выпадения атмосферных осадков.

При этом сухой климат тихоокеанского побережья и низкая плотность растительности позволяют исключить влияние индекса вегетации на результаты определения яркостей. Использовались данные измерений в 4:00–5:00 местного времени, что позволило считать дневную тепловую инерцию рельефа минимальной.

Похожие картины распределения инфракрасного излучения Земли, полученные ИСЗ, приводятся той же группой авторов в работах [14–22] для южной части Восточной Сибири, для Таримской впадины в Китае, для Рейнского грабена в Западной Германии и для зон спрединга и рифтогенеза Афарской депрессии в Северо-Восточной

Африке. Это позволяет авторам считать, что изучаемое явление имеет глобальный характер. Типичные измеренные величины ИК-потоков соответствуют интервалу $50\text{--}90 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})$ [20].

2.2. В работах [23–25] приведены факты фиксации импульсов инфракрасного излучения в районе с. Преображенка Читинской области на высоте 1 км над ур. м. широкополосным радиометром в диапазоне длин волн 7–14 мкм: 14 июля 1987 г. во время существования слабой грозовой облачности [23, 24] и 14 декабря 2006 г. [25]. Импульсы превышали по мощности все возможные помехи. Мощность импульсов соответствовала значению радиационной температуры 330 К при уровне фона 250–270 К [24].

2.3. Еще в 1968 г. авторы [26] разработали фотокамеру, позволяющую получать фотографии объектов в трех различных спектральных диапазонах. В инфракрасном диапазоне 8–14 мкм они обнаружили в земной атмосфере источники излучения, которые не могут быть объяснены ни равновесным тепловым излучением, ни эффектами отражения. Эти источники соответствуют нижним частям формирующихся кучевых облаков с температурой $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ и поднимающемуся теплomu воздуху, насыщенному водяным паром.

2.4. В настоящее время существует множество изображений Земли, снятых из космоса в различных спектральных диапазонах. Как правило, для регистрации облаков в земной атмосфере используется инфракрасный диапазон 6,5–7,0 мкм. Например, в работе [27] приводятся фотографии Земли, снятые в 1994 г. спутником GOES-8 на длине волны 6,7 мкм. А на спутнике GMS-5, запущенном в 1997 г. Японским метеорологическим агентством для регистрации распределения водяных паров в атмосфере [28], радиометр VISSR работал в указанном выше ИК-диапазоне. На снимках в работах [27, 28] яркие области соответствуют высокой концентрации водяных паров, в то время как темные места являются сравнительно сухими областями.

3. Инфракрасное излучение, сопровождающее конденсацию и кристаллизацию воды

Приведем данные о регистрации в ряде лабораторных экспериментов аномального инфракрасного излучения при конденсации и кристаллизации воды.

3.1. Авторы [29] регистрировали интенсивность инфракрасного излучения в процессе конденсации водяного пара и кристаллизации воды в закрытой камере. Температуру понижали адиабатическим расширением. Излучение выводили через прозрачное для инфракрасного излучения германиевое окно. Желаемую область излучения выделяли из полного спектра системой фильтров, его интенсивность измеряли болометром. По утверждению авторов, экспериментальная установка позволяла регистрировать излучение в области 4–8 мкм

при конденсации водяного пара и в области 28–40 мкм для кристаллизации воды. Фиксируемая в экспериментах интенсивность ИК-излучения значительно превосходила интегральную интенсивность равновесного планковского излучения в выделенных спектральных диапазонах и соответствовала выделению 3–5% скрытой энергии фазовых переходов.

3.2. Для электроразрядного лазера на парах воды основные эмиссионные линии соответствуют длинам волн 119 и 220 мкм. Но, как отмечено в работе [30], наряду с ними имеются четыре неидентифицированные линии: 11,83; 38,1 – 39,7; 57,8 и 79 мкм.

3.3. В статье [31] сообщается о появлении эмиссионных линий шириной 0,1 мкм вблизи 2,10 и 1,54 мкм в процессе конденсации перегретого водяного пара. Линии имели интенсивность соответственно в 100 и 200 раз выше фоновой. Этот факт нам интересен с точки зрения экспериментального подтверждения существования ИКХИ. Как будет показано ниже, появление этих линий связано с образованием молекулярных комплексов в парах воды. Поскольку равновесная концентрация этих комплексов в атмосфере очень низкая, мы не будем более подробно останавливаться на этих экспериментах.

4. Теоретические основы ИКХИ фазовых переходов первого рода

Существование ИКХП, как неоднократно отмечалось [2–12], не следует из общепринятых концепций фазовых переходов. Как правило, высокотемпературная люминесценция отвергается в пользу безызлучательного фонованого механизма отвода скрытой энергии фазового перехода. Приведем пример рассуждений сторонников этой точки зрения для случая кристаллизации расплава. Рассмотрим возбужденную частицу вблизи границы раздела фаз. Для реализации излучательного фазового перехода необходимо, чтобы вероятность излучения энергии возбуждения частицей была равна или больше вероятности преобразования этой энергии в тепло. Для свободной частицы в возбужденном состоянии оптическое время жизни (время продольной релаксации) $t_1 = 10^{-7} \div 10^{-8}$ с. Для переходов в ближней инфракрасной области при температуре $T \approx 1000$ К время безызлучательной многофононной релаксации в твердых телах равно $t_2 \leq 10^{-9}$ с. Поэтому вероятность световой эмиссии очень мала – $p \sim t_2/t_1 \ll 1$, и должен реализоваться безызлучательный переход. Для излучательного фазового перехода с вероятностью $p \sim 1$ время t_1 оптического перехода между расплавом и кристаллическим состоянием должно быть меньше или сравнимо с временем t_2 безызлучательной релаксации.

Мы считаем, что t_1 сравнительно велико только для свободной частицы или для малых кластеров, состоящих из нескольких частиц. Для большого числа частиц t_1 уменьшается и ИКХИ должно

испускаться. Эта ситуация напоминает реакцию ядерного деления, когда для ее реализации необходима критическая масса, которая зависит от геометрии системы. Аналогично для лазерного излучения существует пороговая плотность населенности возбужденных уровней.

Возможность излучательных фазовых переходов в рамках квантовой электродинамики была показана в работе [32] и позднее детализирована на микроскопическом уровне в [7, 8]. Из двух последних работ выделим основные моменты, имеющие отношение к теме настоящей статьи.

Если среда содержит частицы, обладающие электрическим или магнитным моментом, фазовый переход первого рода может рассматриваться как мгновенное изменение диэлектрической проницаемости, величины моментов и положений частиц. Рассмотрим упрощенную модель для среды, содержащей частицы, обладающие только электрическим моментом. В соответствии с [33] в этом случае будет реализовываться переходное излучение, интенсивность которого может быть оценена по аналогии с переходным излучением нерелятивистского заряда и диполя. С учетом уширения спектральных линий за счет столкновения частиц для энергии излучения получим выражение, которое эквивалентно универсальному выражению для скрытой энергии образования конденсированной фазы:

$$\Lambda/T = 3\pi R = 78,2 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad (1a)$$

где Λ – скрытая энергия образования одного моля конденсированной фазы, Дж/моль; T – температура фазового перехода; R – универсальная газовая постоянная.

Формула (1a) доказывает для дипольных частиц универсальность корреляции между энергией образования конденсированной фазы и температурой фазового перехода. Этот результат является теоретическим обоснованием правила Трутона [34], связывающего температуру и скрытую теплоту фазового перехода. Правило Трутона, полученное эмпирически много лет назад, с успехом использовалось с тех пор. Формула (1a), применимость которой подтверждена для многих сотен веществ, может служить доказательством правильности использованного в [7, 8] подхода.

Возбужденная частица (атом, молекула или кластер), переходя в новую фазу, излучает скрытую теплоту перехода в виде одного или нескольких квантов, которые, однако, могут быть термализованы перед тем, как они покинут вещество. Следует отметить, что скрытая теплота конденсации, так же как и скрытая теплота кристаллизации, не являются константами. Они обе меняются с давлением и другими экстенсивными параметрами.

Глубокое переохлаждение пара практически невозможно. Это означает, что энергия излучения может быть принята равной скрытой теплоте конденсации и мы можем предсказать диапазон частот излучения при конденсации или кристаллизации из паровой фазы. При кристаллизации из расплава ситуация более сложная. Для перехода на излуча-

тельный уровень расплав может быть сильно переохлажден. Предсказание диапазона частот здесь менее точное.

Определим диапазоны излучения в зависимости от его типа:

4.1. Излучение имеет однофотонный характер:

$$\hbar\omega_1 = \Lambda/N_A, \quad (1)$$

что соответствует $\lambda_1 = 120/\Lambda$. Здесь $\hbar\omega_1$ — энергия испускаемого фотона; N_A — число Авогадро; Λ — скрытая энергия фазового перехода, кДж/моль; λ — длина волны излучения, мкм.

4.2. Излучение имеет n -фотонный характер с равными частотами:

$$\hbar\omega_n = \Lambda/nN_A \text{ или } \lambda_n = 120n/\Lambda. \quad (2)$$

Здесь n — число связей, образованных в конденсате. Таким образом, испускается один фотон на одну связь; n может быть меньше или равно координационному числу m : $n = 1, 2, 3, \dots, m$. Особенности спектра могут дать информацию о числе связей в конденсированной среде, т.е. ее структуре, по крайней мере для простых веществ. Для молекул при двухфотонном излучении наиболее вероятным является переход в 1S_0 -состояние с неизменной симметрией системы.

4.3. Для сложных молекул возможен переход с испусканием квантов различных частот. Для двухфотонного случая имеем

$$\hbar\omega_1 = \hbar\omega' + \hbar\omega'',$$

где

$$\frac{\lambda'\lambda''}{\lambda' + \lambda''} = \lambda_1 \equiv \frac{120}{\Lambda}. \quad (3)$$

4.4. Димеры, тримеры и более сложные кластеры могут рассматриваться как отдельные частицы. Если энергия связи составляющих их атомов или молекул достаточно мала, то длина волны излучения для кластера из M частиц при n -фотонном излучении будет

$$\lambda_n^{(M)} \approx 120n/M\Lambda. \quad (4)$$

Здесь может быть неопределенность, связанная с характером связей частиц, образующих кластер.

4.5. Более сложные ситуации не могут быть *a priori* исключены: образование кластера из M частиц, создание дополнительных $q = 1, 2, 3, \dots, m$ связей при n -фотонной эмиссии. В этом случае на одну связь будет излучаться скрытая теплота перехода, умноженная на $(M + q/m)$, и длина волны излучения будет следующей:

$$\lambda_{n,m}^{(M)} \approx \frac{120n}{\Lambda} / (M + q/m). \quad (5)$$

Это выражение может быть применимо уже на стадии формирования кластеров, в которых образуются новые связи.

Таким образом, характер фазового перехода можно установить путем его инфракрасной спектроскопии.

Теперь проанализируем основные типы фазовых переходов для воды, обратив основное внимание на переходы, реализуемые в атмосфере. Во-первых, это конденсация водяного пара; во-вторых, замерзание образовавшихся капель; в-третьих, прямое осаждение водяного пара с образованием кристаллов. Очевидно, что первый процесс связан с образованием дождевых облаков, второй — с образованием града и третий — снега. Каждый из этих трех фазовых переходов должен дать свой характеристический спектр. Обозначим $\lambda^{(C)}$ длину волны излучения, испускаемого при конденсации, $\lambda^{(F)}$ — при замерзании и $\lambda^{(D)}$ — при осаждении. Длины волн, соответствующие процессам с испусканием n фотонов с образованием M кластеров, обозначим соответственно $\lambda_n^{(F,M)}$, $\lambda_n^{(D,M)}$, $\lambda_n^{(C,M)}$.

При нормальном давлении длины волн характеристического излучения для однофотонного процесса в соответствии с формулой (1) будут следующими:

$$\lambda_1^{(C,1)} = 2,90 \text{ мкм}; \lambda_1^{(F,1)} = 19,62 \text{ мкм}; \lambda_1^{(D,1)} = 2,53 \text{ мкм}.$$

Подобным же образом получим длины волн характеристического излучения для двухфотонного процесса в соответствии с формулой (2):

$$\lambda_2^{(C,1)} = 5,80 \text{ мкм}; \lambda_2^{(F,1)} = 39,24 \text{ мкм}; \lambda_2^{(D,1)} = 5,06 \text{ мкм}.$$

Для двухфотонных процессов доплеровский эффект дает следующее уширение линий:

$$\lambda_2^{(C,1)} = 5,2 \div 6,4 \text{ мкм}; \lambda_2^{(F,1)} = 35 \div 43 \text{ мкм};$$

$$\lambda_2^{(D,1)} = 4,6 \div 5,6 \text{ мкм}.$$

5. Обсуждение экспериментальных результатов

Результаты предыдущего раздела позволяют понять природу описанных выше неравновесных ИК-источников.

Авторы работ [13–22] говорят о многофакторности фиксируемого ими инфракрасного излучения. Среди возможных причин упоминаются эндогенный тепловой поток и конденсация паров воды при участии в качестве центров конденсации ионов различных веществ (в основном радона) вдоль сместителей разломов. Во втором случае речь идет о выделении скрытой теплоты конденсации водяного пара. Таким образом, все объяснение сводится к тривиальному увеличению температуры, которое легко могло бы быть измерено. При этом совершенно не понятно, почему для выхода на поверхность эндогенное тепло выбирает высоту 2500 м или сочленение водной поверхности и суши.

Очень жаль, что в [13–22] не сравниваются изображения исследуемых участков Земли в различных спектральных диапазонах. Тем не менее опубликованные данные позволяют предложить следующее объяснение природы рассматриваемых источников инфракрасного излучения.

Все упомянутые источники находятся в местах с идеальными условиями для непрерывного образо-

вания облаков (включая снежные): во-первых, это значительные водные поверхности, во-вторых, это сочленения воды и суши; в-третьих, это горные склоны на высоте более 2500 м. У подножья Монблана гид обязательно обратит ваше внимание на кольцевое облако, которое постоянно окутывает гору на высоте около 2,5 тыс. м. Это облако образуется в результате конденсации водяного пара в теплых потоках воздуха, поднимающихся по склонам горы. Отмеченное в работах [13–22] присутствие заряженных ионов в атмосфере способствует интенсификации процесса. Сезонное изменение интенсивности излучения также соответствует нашей модели. Таким образом, у нас нет никакого сомнения, что рассматриваемое инфракрасное излучение является ИКХИ фазовых переходов первого рода для воды. Как было показано выше, диапазон 7–14 мкм захватывает основную линию ИКХИ конденсации воды для двухфотонного процесса $\lambda_2^{(C,1)}$ при пониженном давлении. Диапазон 7–14 мкм соответствует окну прозрачности атмосферы, поэтому, если даже максимум ИКХИ находится вне этого диапазона, но достаточно близко, излучение здесь будет уверенно фиксироваться. При этом следует иметь в виду, что образование снежных облаков и града наряду с обычной облачностью сильно усложняет спектр ИКХИ.

Объяснение результатов экспериментов [23–26] полностью соответствует предыдущему абзацу.

Мы нигде не нашли объяснения, почему при съемках из космоса диапазон 6,5–7,0 мкм используется для фиксации влаги в атмосфере [27, 28]. Наша модель дает объяснение этому факту: при съемках из космоса в местах облачности фиксируется характеристическое излучение конденсации водяных паров $\lambda_2^{(C,1)}$. При этом для перистых облаков излучение практически не поглощается атмосферой и поэтому не очень существенно, что излучение лежит вне окна прозрачности атмосферы.

Увеличение интенсивности инфракрасного излучения, описанное в [29], соответствует $\lambda_2^{(C,1)}$ и $\lambda_2^{(F,1)}$ ИКХИ.

Дополнительные линии в спектре лазера на парах воды [30] могут быть связаны с четырехфотонным излучением при конденсации воды, а также двух- и четырехфотонным излучением при замерзании воды: $\lambda_4^{(C,1)} \sim 11,83$; $\lambda_2^{(F,1)} \sim 38,1-39,7$; $\lambda_3^{(F,1)} \sim 57,8$; $\lambda_4^{(F,1)} \sim 79$ мкм.

Максимумы излучения при 2,10 и 1,54 мкм из работы [31], если принимать во внимание формулу (4), соответствуют двухфотонному излучению в процессе конденсации паров воды с предварительным образованием димеров и более сложных молекулярных комплексов: $\lambda_2^{(C,3)} \sim 2,10$; $\lambda_2^{(C,4)} \sim 1,54$ мкм.

Таким образом, мы представили нашу интерпретацию результатов экспериментов, касающихся регистрации инфракрасного излучения при конденсации и замерзании воды, а также природы аномальных инфракрасных источников в атмосфере.

Возможность излучательных фазовых переходов легко доказывается с применением теории суперизлучения [35]. Явление сверхизлучения состоит в том, что система возбужденных частиц за счет их взаимного влияния друг на друга посредством общего поля излучения осуществляет оптический переход на нижний уровень за время, много меньшее времени радиационного распада отдельной частицы. Оценки, сделанные в [35], показывают, что сверхизлучение достигается в ансамбле, содержащем как минимум 10^5 частиц. Применительно к фазовым переходам воды эта оценка дает нам минимальный размер капелек конденсации, образующихся с испусканием ИКХИ.

Очень важным является вопрос, какая часть скрытой энергии фазового перехода излучается. Этот вопрос теоретически еще не решен. Специальных экспериментов такого рода тоже не проводилось. Различные оценки дают величину порядка 3–10%. Очевидно, что количество излученной энергии прежде всего зависит от прозрачности обеих (метастабильной и стабильной) фаз. Проблема прозрачности метастабильной фазы очень специфична. Действительно, по аналогии с лазером эта фаза содержит два уровня – основной и возбужденный. Следовательно, эта среда может работать как усилитель и при условиях достаточного пересыщения должна быть прозрачна для характеристического излучения. Это единственное объяснение, почему характеристическое излучение детектируется при фазовых переходах воды – вода и лед непрозрачны для инфракрасного излучения.

Следует упомянуть, что небольшая часть скрытой теплоты замерзания воды дополнительно выделяется в виде электромагнитного излучения [36]. Это излучение тоже следовало бы поискать в атмосфере. Теория этого эффекта недавно была предложена в [37].

6. Излучение Юпитера

Обсудим очень интересный вопрос, не имеющих прямого отношения к оптике земной атмосферы, но связанный напрямую с ИКХИ фазовых переходов первого рода. Речь идет о процессах, происходящих в атмосфере Юпитера. Общеизвестно, что Юпитер излучает почти в 3 раза больше энергии, чем получает от Солнца. Очевидно, что дополнительная энергия поступает из недр планеты. Однако до сих пор не понятно, как это излучение пробивается сквозь сплошной покров облаков, содержащих пары и кристаллы аммиака, гидросульфата аммония и воды. Другой загадкой является природа красноватого цвета планеты и особенно ее так называемого красного пятна, которое представляет собой устойчивый атмосферный вихрь.

Мы предлагаем здесь качественное объяснение этих явлений: газообразные вещества, составляющие атмосферу планеты (водород, метан, аммиак, пары гидросульфата аммония и воды), нагреваются у ее поверхности и в результате конвекции поднимаются в верхние слои атмосферы. Здесь происходят

конденсация и кристаллизация некоторых из них (наличие кристаллов указанных выше веществ фиксируется в верхних слоях атмосферы планеты) с испусканием ИКХИ в космическое пространство. В зоне атмосферного вихря конденсация и кристаллизация происходят более интенсивно. Это ИКХИ сдвигает спектр свечения Юпитера, и в особенности зоны атмосферного вихря, в длинноволновую область.

7. Перспективы применения ИКХИ фазовых переходов

Большое число экспериментальных и теоретических аспектов проблемы ИКХИ при фазовых переходах еще предстоит исследовать. Но уже сейчас мы можем обсудить возможность применения этого явления к атмосферным процессам.

1) В соответствии с принципами квантовой электродинамики наличие описанного спонтанного перехода должно приводить к возможности стимулировать этот переход. Например, образование облаков может происходить в результате облучения атмосферы характеристическим излучением. При этом первичный лазерный луч должен быть усилен. Таким способом энергия конденсации пара может быть аккумулирована в атмосфере.

2) Инфракрасный лазер может быть создан на основе конденсации водяного пара в атмосфере. Он также может быть использован для аккумуляирования энергии конденсации. Представим себе систему из двух параллельных зеркал (одно из них полупрозрачное) площадью 1 м^2 на расстоянии 1 м одно от другого. Поместим эту систему в атмосферу, где водяной пар насыщен, но еще не сконденсирован. Как отмечалось выше, таким местом может быть склон горы на высоте примерно 2500 м . Каким-либо способом спровоцируем конденсацию пара. В оптимальном случае 10 г водяного пара будет сконденсировано в системе. Это соответствует выделению 25 кДж энергии. При этом система будет работать как лазер. Если обеспечить движение воздуха в системе со скоростью 1 м/с , то при разумном значении КПД 8% можно создать импульсный генератор мощностью 2 кВт и частотой 1 Гц . Для сравнения: солнечная батарея площадью 1 м^2 обеспечивает мощность 100 Вт при наличии солнечного освещения.

3) Образование грозных облаков и ураганов должно сопровождаться мощным инфракрасным излучением, регистрация которого, наряду с другими существующими способами, может служить целям грозных предупреждений. Могут быть получены также дополнительные сведения о структуре грозных облаков и ураганов.

4) Может быть сформулирована программа использования рассматриваемого эффекта для изучения климатических проблем в рамках ARMP. Это излучение должно включаться во все расчеты энергетического баланса в атмосфере. В частности, инфракрасное переизлучение в космос в результате формирования облаков на большой высоте должно

служить одним из каналов охлаждения атмосферы. Искусственное образование таких облаков могло бы обеспечить дополнительное охлаждение земной атмосферы.

5) ИКХИ может быть использовано для обнаружения воды на других планетах.

6) Можно построить количественную модель, объясняющую красный цвет Юпитера на основе конденсации и замерзания в верхних слоях его атмосферы газообразных веществ, предварительно нагретых у поверхности и конвективно поднимающихся вверх.

Заключение

Таким образом, новый физический эффект — инфракрасное характеристическое излучение фазовых переходов первого рода (в частности, к ним относятся конденсация водяного пара и замерзание воды) — следует учитывать при анализе оптических явлений в атмосфере Земли и других планет.

Работа выполнена в порядке личной инициативы в фирме Saint-Gobain Crystals, 23 Rue Louis Pouey, Apt. 353, 928000 Puteaux, France.

1. *Atmospheric Radiation Measurement Program*, 2008. <http://www.arm.gov/>
2. *Tatartchenko V.A.* Infrared characteristic radiation of water condensation and freezing in connection with atmospheric phenomena // *Earth Sci. Rev.* 2010. (In print).
3. *Tatarchenko V.A.* О природе некоторых источников инфракрасного излучения атмосферы // *Исслед. Земли из космоса*. 2010. (В печати).
4. *Tatartchenko V.A.* Infrared laser based on the principle of melt crystallization or vapor condensation. Why not? // *Opt. & Laser Technol.* 2009. V. 41. N 8. P. 949–952.
5. *Tatartchenko V.A.* Some peculiarities of first order phase transitions // *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2009. V. 20. N 1. P. 58–69.
6. *Tatartchenko V.A.* Characteristic IR radiation accompanying crystallization and window of transparency for it // *J. Cryst. Growth*. 2008. V. 310. N 3. P. 525–529.
7. *Perel'man M.E., Tatartchenko V.A.* Phase transitions of the first kind as radiation processes // *Phys. Lett. A*. 2008. V. 372. N 14. P. 2480–2483.
8. *Perel'man M.E., Tatartchenko V.A.* Phase transitions of the first kind as radiation processes // 2007. arXiv: 0711.3570. P. 1 – 17.
9. *Tatarchenko V.A.* Shaped crystal growth. London: Kluwer, 1993. P. 3.
10. *Умаров Л.М., Татарченко В.А.* Дифференциальные спектры кристаллизационного излучения галогенидов щелочных металлов // *Кристаллография*. 1984. Т. 29. № 6. С. 1146–1150.
11. *Татарченко В.А., Умаров Л.М.* Инфракрасное излучение, сопровождающее кристаллизацию сапфира // *Кристаллография*. 1980. Т. 25. № 6. С. 1311–1313.
12. *Татарченко В.* Появление особенностей в спектрах излучения в процессе кристаллизации прозрачных в инфракрасной области веществ // *Кристаллография*. 1979. Т. 24. № 2. С. 408–409.
13. *Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Тащилин С.А.* Инфракрасное излучение Земли в области сочленения океан — континент // *Исслед. Земли из космоса*. 2004. № 2. С. 17–24.

14. Вилор Н.В., Минько Н.П. Инфракрасное излучение Саяно-Байкало-Патомской горной области и Байкальской рифтовой зоны по данным спутникового мониторинга // Докл. РАН. 2001. Т. 379. № 5. С. 666–669.
15. Vilor N.V., Abushenko N.A. The contemporary IR-radiation of regional faults, its nature and application for satellite monitoring of seismic active tension state of Central Asia // Proc. of the Int. Seminar Asia – Pacific Space Geodynamics Program. Irkutsk, Russia, 2002. P. 199–205.
16. Вилор Н.В., Минько Н.П. Спутниковый мониторинг инфракрасного излучения геолого-структурных элементов Саяно-Байкало-Патомской горной области и Байкальской рифтовой зоны // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 4. С. 55–61.
17. Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Лепин В.С. Инфракрасное излучение земной поверхности в зоне аридного климата // Докл. РАН. 2003. Т. 388. № 5. С. 647–650.
18. Вилор Н.В., Минько Н.П. Инфракрасное излучение геолого-структурных элементов Саяно-Байкало-Патомской горной области и Байкальской рифтовой зоны // Геогр. и природ. ресурсы. 2003. № 2. С. 57–63.
19. Вилор Н. Невидимое сияние Земли // Химия и жизнь. 2003. № 5. С. 40–42.
20. Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Тащилин С.А. Спутниковый метод изучения корреляции инфракрасного эмиссионного потока и элементов геологической структуры Земли в северном полушарии // Сб. статей 3-й конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2005. Т. 2. С. 215–224.
21. Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Тащилин С.А. Инфракрасное излучение земли в зонах спрединга и рифтогенеза (на примере афарской депрессии, северо-восточная Африка) // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 3. С. 76–82.
22. Вилор Н.В., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю. Динамика уходящего инфракрасного излучения элементов геологической структуры земной поверхности по данным съемки со спутников NOAA и TERRA // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 3. С. 3–15.
23. Бордонский Г.С. Возможные следы лазерного излучения атмосферы Земли // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 4. С. 390–393.
24. Бордонский Г.С. Предполагаемые активные природные среды и способы их наблюдения // Читинск. ин-т природ. ресурсов СО РАН. Чита, 1991. Деп. ВИНТИ № 4638–В91.
25. Bordonskiy G.S., Gurulev A. A. Measurements of the thermal emission of Chita atmosphere in the magnetic storm of 14 December 2006: Abstracts of Fourteenth Int. Sympos. on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics (G.G. Matvienko and V.A. Banakh editors). Russia. Tomsk, 2008.
26. Nichols L.W., Lamar J. Conversion of infrared images to visible in Color // Appl. Opt. 1968. V. 7. N 9. P. 1757–1762.
27. Hasler F. Visions of our Planet's Atmosphere, Land & Oceans. NASA/GSFC and the GOES Project // 2003. <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap020323.html>
28. Curtis A.R. Space Satellite Handbook, Houston: Gulf Publishing, TX, 1994. 346 p
29. Mestvirishvili A.N., Directovich J.G., Grigoriev S.I., Perel'man M.E. Characteristic radiation due to the phase transitions latent energy // Phys. Lett. A. 1977. V. 60. N 2. P. 143–144.
30. Мествиришвили А.Н., Перельман М.Е. Эффект конверсии скрытой энергии фазовых переходов первого рода в характеристическое излучение // Тр. Института кибернетики. 1977. Т. 3. С. 338–357.
31. Potter W.R., Hoffman J.G. Phase transition luminescence in boiling water; evidence for clusters // Infrared Phys. 1968. V. 8. N 4. P. 265–270.
32. Perel'man M.E. Phase transitions caused by the opening of new channels in electron-photon interactions // Phys. Lett. A. 1971. V. 37. N 5. P. 411–412.
33. Гунзбург В.Л., Цитович В.Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. М.: Наука, 1984.
34. Wisniak J. Frederick Thomas Trouton: The Man, the Rule, and the Ratio // The Chemical Educator. 2001. V. 6. N 1. С. 55–61.
35. Саль С.А., Смирнов А.П. Фазово-переходное излучение и рост новой фазы // Ж. техн. физ. 2000. Т. 70. № 7. С. 35–39.
36. Shibkov A.A., Golovin Yu.I., Zheltov M.A., Korolev A.A., Leonov A.A. In situ monitoring of growth of ice from supercooled water by a new electromagnetic method // J. Cryst. Growth. 2002. V. 236. N 1–3. P. 434–440.
37. Perel'man M.E., Rubinshtein G.M., Tatartchenko V.A. Mechanisms of dendrites occurrence during crystallization: Features of the ice crystals formation // Phys. Lett. A. 2008. V. 372. N 22. P. 4100–4103.

V.A. Tatartchenko. Infrared characteristic radiation of the first order phase transitions and its connection with optics of the atmosphere.

This paper considers a nature of some sources of infra-red radiation in the Earth's atmosphere as a result of infra-red characteristic radiation (IRCR) of first order phase transitions – condensation and crystallization of water. Experimental and theoretical evidences of the IRCR existence are discussed. The theory of the phenomenon is based on the claim that the particle's (atom, molecule, or cluster) transition from a higher energetic level (vapor or liquid) to a lower one (liquid or crystal) produces emission of one or few photons. The energy of these photons is connected by definite way with the latent energy of the phase transition. The effect under investigation must play a very important role in atmospheric phenomena: it is one of the sources of Earth's cooling; formation of hailstorm clouds in the atmosphere is accompanied by the intensive IRCR that could be detected for process characterization and meteorological warnings. The effect can be used for atmospheric heat accumulation. The IRCR might explain the red color and infrared emission of Jupiter.