

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.87

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3665>

Энтропийные особенности проявления PeTa эффекта при фазовых превращениях воды

Г. С. Бордонский✉

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
Недорезова 16а, Чита 672014, Российская Федерация*

Аннотация

Обсуждается гипотеза о возникновении нетеплового излучения сред при фазовом переходе I-го рода при конденсации пара или кристаллизации расплава (PeTa эффект), высказанная В. А. Татарченко и М. Е. Перельманом. Общепринятая точка зрения заключается в том, что скрытая теплота фазового превращения может выделяться только в виде теплоты. В своих рассуждениях авторы гипотезы при доказательстве существования эффекта возникновения нетеплового излучения и рассмотрении подтверждающих его фактов не учитывали особенностей начального и конечного состояний среды (то есть их энтропию). Для уточнения физики процесса кристаллизации жидкости и возможности появления нетеплового излучения нами рассмотрены особенности случая кристаллизации воды и образования льда. На этот процесс ссылаются авторы гипотезы для ее доказательства. Показано, что в условиях разнообразных экспериментов необходимо рассматривать как состояние (структуру) исходных образцов воды, так и образовавшегося льда, который может состоять из различных кристаллических модификаций с хаотической укладкой. Эти особенности начальных и конечных состояний, то есть знание энтропии образцов воды и льда в условиях реальных экспериментов и для наблюдаемых природных явлений, усложняют оценки характеристик возможного излучения. Энтропия начального и конечного состояний определяются процедурой приготовления системы и особенностями динамики фазового перехода. Ее значения зависят от макроскопических параметров, а также от микроструктуры сред, определение которых в каждом конкретном случае является весьма сложной задачей. Кроме того, во многих случаях приходится иметь дело с метастабильными средами, для которых необходим учет влияния флуктуаций на протекание процесса фазового перехода и не применимы представления равновесной термодинамики. Однако именно для таких сред возможно возникновение нетепловых излучений в соответствии с законами самоорганизации в нелинейных слабо неравновесных объектах. В эксперименте с замораживанием концентрированного спирта с целью получения глубоко переохлажденной воды в настоящей работе показан способ приготовления низкоэнтропийной среды с последующим ее фазовым превращением в лед. Представляется, что для нахождения характеристик PeTa излучения требуется учет энтропийных ограничений в каждом конкретном случае, что позволит оценить спектр возможных нетепловых излучений и их характеристики.

Ключевые слова: фазовый переход, нетепловое излучение, переохлажденная вода, энтропия

Для цитирования: Бордонский Г. С. Энтропийные особенности проявления PeTa эффекта при фазовых превращениях воды. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 468–474. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3665>

For citation: Bordonskiy G. S. Entropy features of the PeTa effect during phase transformations of water. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(4): 468–474. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3665>

✉ Бордонский Георгий Степанович, e-mail: lgc255@mail.ru

© Бордонский Г. С., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Известно, что протекание химических реакций определяется энергетическими характеристиками и энтропией продуктов реакций. В частности, для изотермических, близких к равновесным, процессов их направление определяется энергией Гиббса. Энергетические и энтропийные ограничения также относятся и к фазовым переходам вещества в изолированных и закрытых системах.

В ряде работ [1–3] были обнаружены нетепловые излучения при фазовых переходах I-го рода. Этот эффект назвали РеТа эффектом по фамилиям исследователей, которые детально описали данное явление (Perelman M. E., Tatarchenko V. A.). Экспериментально близкие к РеТа эффекту явления были обнаружены для усиления микроволнового излучения при деформации кристаллов льда [4], при фазовых превращениях в ферромагнитных сплавах [5], при сонолюминесценции [6].

С точки зрения энергетических соотношений, например, при фазовом переходе вещества из жидкого в твердое состояние, предполагаемая энергия квантов излучения для моля вещества согласно [1–3] находится из равенства:

$$h\nu = \frac{\lambda}{N_A}, \text{ где } h - \text{ постоянная Планка, } \nu - \text{ частота электромагнитного излучения, } N_A - \text{ число Авогадро, } \lambda - \text{ удельная теплота фазового перехода. Возможен и многофотонный процесс излучения: } h\nu = n \frac{\lambda}{N_A}, \text{ где } n - \text{ число фотонов в}$$

единичном акте излучения. По выполненным оценкам в большинстве случаев кванты энергии находятся в инфракрасном диапазоне. Поскольку объяснение эффекта вызвало неоднозначную оценку, как отмечено в [2], представляет интерес рассмотреть другие аспекты данного вопроса.

В частности, в [1–3] были учтены, прежде всего, энергетические и квантово-механические особенности РеТа эффекта. При этом имеется сложный вопрос о вероятности рассматриваемых событий. Представляется, что для его решения требуется внимательное рассмотрение начального и конечного состояний системы с точки зрения изменения энтропии, то есть выполнения второго начала термодинамики. Энтропия системы определяется весьма многообразными структурными характеристиками среды и электромагнитного излучения (объемом компонент; спектром, поляризацией и направленностью из-

лучения; формой частей системы; их взаимным расположением в пространстве и т. д.).

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы рассмотреть на примере замерзания воды, на качественном уровне энтропийные особенности РеТа эффекта, которые ранее исследователями не учитывались.

Постановка задачи. При рассмотрении РеТа эффекта возникает ряд вопросов. 1 – не ясно, какая доля энергии может перейти в монохроматическое излучение или другие виды нетеплового излучения и каковы их характеристики (степень когерентности, спектр и т. д.). 2 – при каком виде процессах могут возникать РеТа и родственные ему излучения (например, при кавитации, переохлаждении с последующим фазовым переходом, импульсах давления и т. п.). Представляется, что для ответа на эти вопросы необходимо учесть энтропийные ограничения, а не только закон сохранения энергии и представления квантовой механики о вероятности излучательных переходов. Известно, что в изолированных системах энтропия не может самопроизвольно уменьшаться (т. е. энергию системы нельзя эффективно трансформировать в энергию монохроматического излучения, имеющую более низкую энтропию).

2. Теоретическое рассмотрение

Как следует из работы автора [3], академик А. Д. Сахаров (в частном сообщении) обратил внимание на процесс замерзания переохлажденной воды, при котором возможен сброс энергии из образца радиационным путем с возникновением нетеплового излучения. Его регистрация могла бы послужить экспериментальным подтверждением существования РеТа эффекта. Это следует из того, что относительно быстрый переход из жидкого в твердое состояние вещества объемной воды, наблюдаемый в некоторых экспериментах, невозможен, так как не обеспечивается процессом теплопроводности.

Рассмотрим этот процесс фазового превращения с точки зрения 2-го начала термодинамики. Обозначим S_0 энтропию начального состояния (для моля жидкой воды), S_L – энтропию образовавшегося льда, S_E – энтропию выделившейся энергии, равной скрытой теплоте фазового перехода. S_E при этом представим в виде суммы двух компонент: $S_E = S'_E + S''_E$, где S'_E – связана с тепловой энергией, а S''_E – с нетепловым излучением. Тогда из второго начала термодинамики следует:

$$S'_E + S''_E + S_L \geq S_0, \text{ или } (S'_E + S''_E) \geq (S_0 - S_L) \quad (1).$$

Если весь процесс фазового перехода сопровождается выделением теплоты (при квазистатических процессах), то для одного моля вещества $(S_0 - S_L) = \frac{\lambda}{T_0}$, где T_0 – температура фазового перехода (предполагается, что жидкая вода первоначально находится при T_0 , то же для образовавшейся твердой фракции).

В случае возникновения РеТа эффекта и выделения части энергии (E'') в виде излучения при превращениях с одним моле воды соотношение (1) представляется в виде:

$$(S_0 - S_L) \leq \left(\frac{\alpha\lambda}{T_0} + S''_E \right), \quad (2),$$

где $\alpha = (0...1)$ характеризует долю тепловой энергии, выделившейся в процессе фазового превращения. Полная энергия: $E = \alpha\lambda + E'' = \alpha\lambda + (1 - \alpha)\lambda$. Отношение $E''/E = (1 - \alpha)$ характеризует энергетический выход РеТа эффекта.

Для равновесного фазового перехода значение разности S_0 и S_L равно $\frac{\lambda}{T_0}$, тогда из (2) сле-

дует, что при $\alpha < 1$ (то есть в случае возникновения излучений), S''_E , отнесенная к единице энергии, должна быть не ниже, чем для процесса теплопередачи контактным путем. Это можно проверить, если в (2) использовать знак равенства и

$$(S_0 - S_L) = \frac{\lambda}{T_0}, \text{ тогда минимальная } S''_E = \frac{(1 - \alpha)\lambda}{T_0}.$$

Отсюда следует вывод о термодинамическом запрете на РеТа эффект, точнее на то, что энтропия излучения для равновесного фазового перехода не может быть ниже энтропии при выделении энергии в виде теплоты.

Данный вывод вполне очевиден, так как электромагнитное излучение с узкой полосой из-за его «упорядоченности» имеет низкую энтропию. Причем $S''_E \sim \Delta\nu\Delta\phi$ [7], где $\Delta\nu$ – ширина полосы частот электромагнитного излучения, $\Delta\phi$ – ширина телесного угла пучка излучения. Для случая, когда $\Delta\nu$ или $\Delta\phi$ стремятся к нулю, S''_E также стремится к нулю, и соотношение (2) не выполняется, если α будет меньше единицы (при фиксированных S_0 и S_L).

Вместе с тем, в реально существующих физических системах разность $(S_0 - S_L)$, присутствующую в формулах (1, 2), можно понизить путем приготовления специального началь-

го состояния, приводящего к уменьшению данной разности. Для этого следует понизить S_0 и повысить S_L . Рассмотрим оба случая.

2.1. Увеличение S_L . Это возможно, если структура образовавшегося льда нарушена, например, часть льда находится в аморфном состоянии, или возникают смешанные структуры с хаотическим расположением кристаллов льда Ih и Ic. В недавних работах сообщалось об открытии переходных форм при фазовом переходе воды [8, 9] в виде так называемого стекового (штабелированного) льда I_{SD} , представляющего собой смесь льдов Ih (гексагонального) и Ic (кубического) со сложной хаотизированной структурой. Предполагают, что предыдущие сообщения об экспериментальном определении кубического льда на самом деле относятся к стековому льду.

2.2. Уменьшение S_0 . Уменьшить S_0 можно путем переохлаждения воды. Переохлаждение в природной среде наблюдали для облачного аэрозоля до -37.5 °C [10]. В этом случае энтропия переохлажденной метастабильной воды S_{0S} ниже исходного состояния S_0 на значение

$$\Delta S = \int_{T_0}^{T_x} \frac{\delta Q}{T}, \text{ здесь } \delta Q - \text{ вариация тепловой энергии, } T_x - \text{ температура переохлаждения. Чем ниже } T_x, \text{ тем меньше новое значение } S_{0S}.$$

Кроме того, понижение энтропии может возникать из-за ее уменьшения, определяемого геометрией частей системы, если объем воды разделить на отдельные фрагменты небольшого размера (в случае водного аэрозоля или пленок на поверхности пор или мелких частиц).

Интеграл для ΔS существенно зависит от значения T_x . Однако здесь для случая воды имеются дополнительные сложности. Согласно многочисленным исследованиям, теплоемкость переохлажденной воды при постоянном давлении имеет тенденцию к резкому возрастанию при приближении к -45 °C (при нормальном атмосферном давлении) [11]. Данная особенность определяется влиянием второй критической точки воды и появлением линии Видома, локусе повышенных флуктуаций плотности и энтропии жидкой объемной воды [11, 12]. Хотя достижение -45 °C без кристаллизации воды практически весьма затруднено, уменьшение энтропии при переохлаждении возможно, например, в пористых средах с наноразмерными порами, где наблюдали переохлаждение объемной воды до -70 °C [13]. Из-за роста теплоемкости при процессе переохлаждения жидкой воды энтропия

уменьшается нелинейно от температуры, резко падая вблизи $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Возможно по этой причине температура гомогенной нуклеации (т. е. ниже которой существует только кристаллический лед) считается равной приблизительно $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть соответствует более высокому значению, чем температура на линии Видома.

В графическом виде участок процесса, где возможно возникновение РеТа излучения при переохлаждении воды, представлен на рис. 1. На графике имеется начальная точка А. Точка 1 соответствует температуре T_0 , при которой экспериментально наблюдается образование льда для объемной воды. До точки 2 при определенных условиях возможно переохлаждение жидкой воды с образованием метастабильной воды с пониженной энтропией. Участок 2–2' является областью возможного проявления РеТа эффекта, где наблюдается неравновесный фазовый переход. 2'–3 – область «нормального», то есть равновесного фазового превращения жидкости в кристаллическое тело с выделением теплоты. Иными словами, в области 2–2' выделяется на единицу массы образовавшегося льда больше тепловой энергии, т. к. среда нагревается от T_x до T_0 по сравнению с областью 2'–3. При этом теплота забирает больше энтропии, чем для участка 2'–3, где температура постоянна, но часть энергии может иметь пониженную энтропию.

3. Эксперименты

В качестве примера, где проявляется в явном виде особенность начального состояния, в нашей работе экспериментально исследовали замерзание ассоциированной жидкости – концентрированного этилового спирта, содержащего небольшое количество воды. В этом эксперименте предполагали получить экстремальное переохлаждение воды, выделяющейся при разложении ассоциатов при фазовом переходе спирта и, следовательно, ее особое начальное состояние с низкой энтропией. Данная методика впервые использована для переохлаждения воды. Для регистрации момента фазового перехода и его особенностей использовали бесконтактный метод, при котором регистрировали проходящее через образец электромагнитное излучение в микроволновом диапазоне. Изменение проходящей мощности в зависимости от температуры среды позволило определить начало фазового превращения, скорость выделения тепловой энергии и вариации температуры образца.

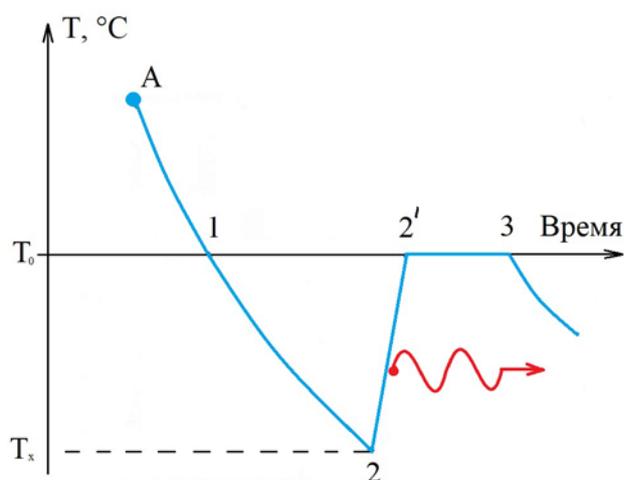


Рис. 1 Графическое представление охлаждения воды во времени и участка, где возможно возникновение РеТа излучения при процессе переохлаждения некоторого объема воды. Волнистой стрелкой отмечено излучение из области 2–2' на графике температуры от времени (нетепловое излучение)

В эксперименте проводили просвечивание образца нанопористого сорбента, насыщенного спиртом, излучением в микроволновом диапазоне на частоте 34 ГГц и помещенного в отрезок волновода. В установке для проведения эксперимента использовали маломощный генератор на диоде Ганна и кристаллический детектор. Волновод, в котором размещали образец, имел прямоугольное сечение 3.4 мм на 7.2 мм. Образец в кювете в виде пластины толщиной 5 мм с порошком сорбента размещали в волноводе под углом ~ 45 градусов к оси волновода для устранения интерференционных эффектов. Измеряли мощность прошедшего излучения и температуру среды в зависимости от времени при охлаждении образца холодными парами азота. Для приготовления образца этиловый спирт и силикагель КСКГ выдерживали в эксикаторе для насыщения сорбента. Средний размер пор КСКГ составлял 8 нм.

В эксперименте использовали этиловый спирт, имеющий концентрацию 95 %. Спирт содержал 5% воды, при котором его температура замерзания имеет значение около $-114\text{ }^{\circ}\text{C}$. В момент фазового перехода должно было происходить выделение воды, которая оказывалась глубоко переохлажденной. Ее замерзание происходило по схеме, близкой к представленной на рис. 1 для области 2–2'. Температуру среды измеряли при помощи термпары. Точность опреде-

ления температуры порядка нескольких градусов. Постоянная времени термодпары около 0.1 с. Запись сигналов осуществляли системой сбора информации Agilent со скоростью два измерения в секунду. Результаты измерений проходящей мощности микроволнового излучения от температуры среды приведены на рис. 2.

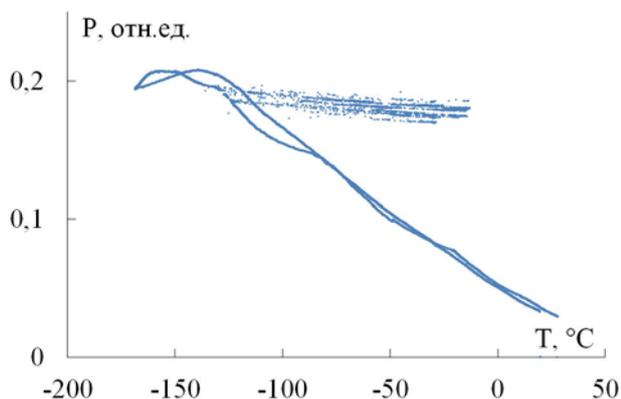


Рис. 2 Изменение проходящей мощности микроволнового излучения (P), в относительных единицах, через волноводную секцию с силикагелем, насыщенным 95 % этиловым спиртом, в зависимости от температуры среды

При охлаждении образца были обнаружены множественные скачки температуры при кристаллизации спирта в некотором интервале времени, когда температура была несколько ниже -114 °C, с быстрым разогревом среды. Такое явление хорошо известно в криологии и объясняется замерзанием неравновесной переохлажденной воды. Множественные скачки можно объяснить неоднородностью распределения температуры в объеме образца и вариациями параметров сорбента со спиртом и порового пространства. Поскольку время измерения между отдельными точками равнялось 0.5 с, можно оценить по точкам графиков время одного скачка температуры при замерзании выделяющихся объемов воды. Оно составило значение около минуты. Приращение температуры при скачке приближалось к 0 °C (на графиках наблюдали значение приблизительно равное -10 °C, возможно из-за тепловой инерции среды и термодпары, а также пространственного разнеса термодпары и активных областей, где происходит выделение теплоты). Очевидно, что выбросы теплоты сопровождались образованием льда из состояния воды с пониженной энтропией. Относительно энтропии образовавшегося стекловатого льда в настоящее время нет данных,

позволяющих выполнить оценку этой величины. Сообщалось, что во льду I_{SD} доля кубического льда может достигать 70 % [8].

Полученные результаты подтвердили высказанное предположение о выделении теплоты переохлажденной метастабильной водой с низкой начальной энтропией при температурах значительно ниже точки равновесного фазового перехода, что создает предпосылки для возникновения нетеплового излучения.

4. Обсуждение

Дополнительная сложность рассматриваемого процесса заключается в том, что испускание квантов во внешнюю среду затруднено их поглощением в объеме жидкой и твердой фаз. Поэтому наблюдать РеТа эффект можно только с поверхностного слоя порядка толщины скин-слоя воды. Для теплового ИК-диапазона значение скин-слоя для воды и льда имеет значение порядка 10 мкм. Это приводит к тому, что в соотношении (1) знак равенства не будет выполняться, и остается знак «>», усложняющий анализ системы. При этом в эксперименте нетепловое излучение может не регистрироваться.

Возможно, что при использовании пористых, слабо увлажненных сорбентов, выходящее из среды излучение в ИК-диапазоне может существенно не ослабляться, если материал матрицы имеет достаточную прозрачность в данном диапазоне длин волн.

В выполненном эксперименте с концентрированным этиловым спиртом показана возможность глубокого переохлаждения воды, которая образуется при замерзании спирта и в начальный момент имеет температуру его фазового превращения -114 °C. При таком глубоком переохлаждении вода обладает экстремально низкой энтропией. Интересно отметить, что ниже этой температуры возникает стеклование воды (приблизительно при -130 °C), которая представляет собой аморфный (неупорядоченный) лед.

Для выполнения аналогичного эксперимента с целью обнаружения нетепловых электромагнитных излучений требуются достаточно быстродействующие измерительные приборы для регистрации электромагнитных полей. В выполненном эксперименте по замораживанию спирта, находящегося в пористой среде, скачки температуры наблюдали за время порядка десятков секунд, а интенсивность микроволнового излучения существенно не изменялась. Это связано с тепловой инерцией матри-

цы сорбента и использованных измерительных устройств: микроволнового детектора, термодпары. По предлагаемой методике можно искать более низкочастотные излучения, хорошо проникающие через среду, чем излучения в ИК-диапазоне, рассмотренные в [1–3], например, на частотах ниже 1 ГГц.

В качестве примера использования энтропийного подхода выполним оценку энергии нетеплового излучения при кристаллизации переохлажденной воды в облачном аэрозоле, например, при температуре $-10\text{ }^\circ\text{C}$. Примем ряд упрощающих оценку предположений о том, что стекловый лед не образуется, и не будем учитывать изменение энтропии воды при дроблении на капли в аэрозоле. Также примем неизменность значения теплоемкости воды при постоянном давлении (C_p) в интервале от 0 до $-10\text{ }^\circ\text{C}$. При процессе переохлаждения воды ее энтропия уменьшается на $\Delta S = C_p \int_{T_0}^{T_x} \frac{dT}{T}$, где $T_0 = 273\text{ }^\circ\text{C}$,

$T_x = 263\text{ }^\circ\text{C}$, $C_p = 4.2\text{ Дж/(г}\cdot\text{град)}$. После вычислений получаем $\Delta S = 0.15\text{ Дж/(г}\cdot\text{град)}$. Для равновесного процесса для 1 грамма воды это изменение составит $S' = \lambda/T_0 \approx 1.2\text{ Дж/(г}\cdot\text{град)}$, здесь $\lambda = 333\text{ Дж/г}$. Разность энтропии ($S_0 - S_L$) обеспечивается оттоком тепловой энергии. Если эта разность уменьшается при том же оттоке энергии, то часть энергии (то есть E'') в предельном случае может иметь нулевую энтропии. Это означает возможность возникновения РеТа эффекта.

Относительная доля энергии нетеплового излучения $E''/\lambda = \Delta S/(S_0 - S_L)$, откуда $E'' = T_0 \Delta S$. Отношение, то есть доля энергии излучения на единицу массы вещества составит в данном примере 0.12. Однако надо учесть, что в процессе фазового превращения температура среды повышается, и ее эффективная температура будет выше $-10\text{ }^\circ\text{C}$. Если считать этот процесс линейным, то эффективное ΔS будет в два раза ниже. Следовательно, окончательная оценка доли энергии нетеплового излучения в общем балансе выделившейся энергии составит 0.06.

Следует отметить, что низкочастотные электромагнитные поля при замерзании воды на частотах ниже 1 МГц ранее регистрировали, например, в [14], однако их возникновение интерпретировали, как связанное с релаксацией пространственных или поверхностных зарядов. Кроме того, в начальный момент замерзания переохлажденной воды из-за быстрого выделения энергии наблюдается резкое возраста-

ние производства энтропии (производной энтропии по времени). В соответствии с термодинамикой необратимых процессов в этом случае возможно появление упорядоченных структур [15], следовательно, рассмотрение электромагнитных излучений можно выполнять и с использованием этих представлений. То же относится к рассмотрению излучений при кавитации [2] и при других слабо неравновесных процессах [6].

5. Выводы

1. Показано на примере кристаллизации воды, что РеТа эффект, связанный с возникновением нетепловых излучений при фазовом переходе I-го рода возможен только в специально подготовленных системах. Такие системы из-за пониженного значения их энтропии (и в случае уменьшения энергетического барьера образования зародышей твердой фазы) должны находиться в метастабильном состоянии. При иницировании фазового перехода в системе будет происходить неравновесный фазовый переход, при котором возможно возникновение нетеплового излучения.

2. Для конкретного случая фазового перехода глубоко переохлажденной воды показана необходимость тщательного изучения вопроса о генерации электромагнитных нетепловых излучений, характеристики которых зависят от энтропии исходного и конечного состояний. То же относится к любым другим средам, каждая из которых обладает своими уникальными свойствами. Энтропия начального и конечного состояний определяется процедурой приготовления образцов, особенностями фазового перехода, макро и микро структурой среды в начальном и конечном состояниях. Эти особенности будут определять широкий набор характеристик излучений (интенсивность, частотный спектр, когерентность, направленность, поляризацию).

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Perelman M. E., Tatartchenko V. A. Phase transition of the first kind as radiation processes. *Physics Letters A*. 2008;372(12): 2480–2483. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.11.056>
2. Tatartchenko V. A., Smirnov P. V., Wu Y. First order phase transitions as radiation processes. *Optics*

- and Photonics Journal*. 2013;3: 1–12. <https://doi.org/10.4236/opj.2013.38A001>
3. Tatartchenko V. A. Sonoluminescence as the PeTa radiation. *Optics and Photonics Journal*. 2017;7: 27–55. <https://doi.org/10.4236/opj.2017.72004>
4. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Усиление микроволнового излучения во льду при фазовом переходе, вызванном давлением. *Письма в журнал технической физики*. 2012;19: 30–36. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20327992>
5. Бычков И. В., Голунов В. А., Каленов Д. С., Каманцев А. П., Кучин Д. С., Коледов В. В., Кузьмин Д. А., Мериакри В. В., фон Гратовски С. В., Пархоменко М. П., Маширов А. В., Шавров В. Г. Собственное излучение и коэффициент отражения ЭМВ в диапазоне 8 мм сплавов $Ni_{2.14}Mn_{0.81}GaFe_{0.05}$ и TiNi в температурном интервале вблизи фазовых переходов 1-го и 2-го рода. *Журнал радиоэлектроники*. 2014;12: 1–20. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23206423>
6. Tatartchenko V. A. Bubble glow at hydrothermal vents as the PeTa radiation. *Optics and Photonics Journal*. 2019;9(11): 189–217. <https://doi.org/10.4236/opj.2019.911017>
7. Петрушкин С. В., Самарцев В. В. Лазерное охлаждение твердых тел. М.: Физматлит; 2004. 224 с.
8. Salzmann C. G. Advances in the experimental exploration of water's phase diagram. *The Journal of Chemical Physics*. 2019;150(6): 060901. <https://doi.org/10.1063/1.5085163>
9. Leoni P., Russo J. Non-classical nucleation pathway in stacking-disordered crystals. *Physical Review X*. 2021;11(3). <https://doi.org/10.1103/physrevx.11.031006>
10. Rosenfeld D., Woodley W. L. Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37.5 °C. *Nature*. 2000;405(6785): 440–442. <https://doi.org/10.1038/35013030>
11. Gallo P., Amann-Vinkel K., Angell C. A., Anisimov M. A., Caupin F., Chakravarty C., Lascaris E., Loerting T., Panagiotopoulos A. Z., Russo J., Sellberg J. A., Stanley H. E., Tanaka H., Vega C., Xu L., Petterson L. G. M. Water: a tail of two liquids. *Chemical Review*. 2016;116(13): 7463–7500. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00750>
12. Бордонский Г. С., Гурулев А. А. О физико-химических превращениях с участием воды вблизи температуры -45 °C. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2019;21(4): 478–489. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/2359>
13. Limmer D. T., Chandler D., Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores. *Journal of Chemical Physics*. 2012;137(4): 044509/11. <https://doi.org/10.1063/1.4737907>
14. Шибков А. А. Собственное электромагнитное излучение растущего льда. *Вестник тамбовского университета*. 2009;14(6): 1192–1195. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13067701>
15. Пригожин И. *Введение в термодинамику необратимых процессов*. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика; 2001. 160 с.

Информация об авторе

Бордонский Георгий Степанович, д. ф.-м. н., профессор, г. н. с. лаборатории геофизики криогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН; Чита, Российская Федерация; e-mail: lgc255@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0009-0822>.

Поступила в редакцию 06.06.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 15.09.2021; опубликована онлайн 25.12.2021.