

# Основные результаты деятельности группы Фотоники и спинтроники

## Научные результаты:

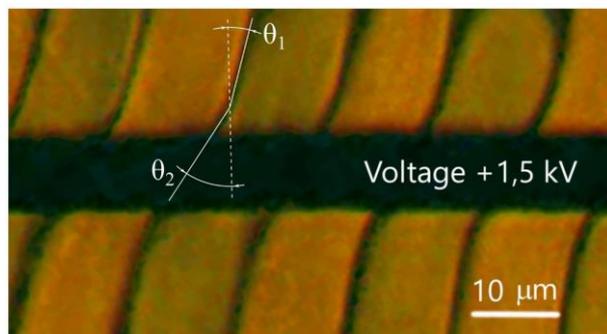
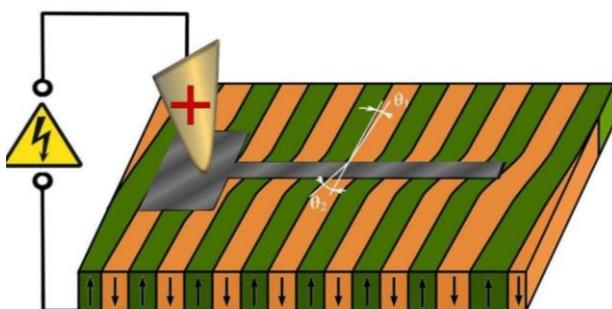
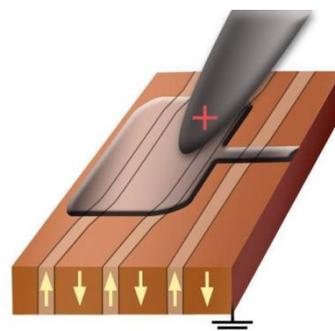
- Принцип Ферма – это не только про оптику!



А. Подклетнова и др. Эффект "преломления" магнитных доменных границ на электрических неоднородностях, [Письма в ЖЭТФ](#), **118**, 259–262 (2023).

The iron garnet stripe domain structure "refraction" effect at the electrode location, [JMMM](#), **595**, 171497(2024)

Из курса оптики известно, что луч "выбирает" путь, соответствующий наименьшему времени. Этот принцип, сформулированный Пьером Ферма три с половиной века назад, получил недавно неожиданное применение в физике магнитных доменов: как показали сотрудники кафедры физики колебаний физфака МГУ, доменные границы преломляются на полосковых электродах, а "показатель преломления" зависит от знака и величины поданного на электрод электрического напряжения.



Согласно принципу, аналогичному принципу Ферма в оптике, доменная граница располагается так, чтобы общая ее поверхностная энергия была минимальна. Более детальное численное моделирование, проведенное аспирантом Никитой Мясниковым во второй статье, показывает, что доменная граница отслеживает все неоднородности электрического поля и может преломляться на одном электроде по несколько раз - не только на его границах, но и в области под ним, там, где меняется электрическое поле.

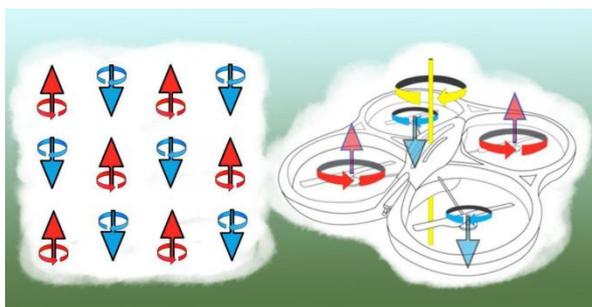
Это эффект служит ещё одним красивым примером чувствительности магнитных доменных границ к электрическому полю - явления, открытого в лаборатории фотоники и спинтроники. Он может применяться в устройствах с электрической записью и магнитным хранением информации.

- **Что общего у антиферромагнетика с квадрокоптером?**

Maksim A. Koliushenkov and Alexander P. Pyatakov. On the Einstein–de Haas effect in van der Waals micro-electromechanical systems. *Europhysics Letters*, 147:36002, 2024.



Идея статьи пришла авторам с кафедры физики колебаний физического факультета МГУ при наблюдении за движением квадрокоптера, которое полностью определяется скоростью вращения винтов. В статическом положении квадрокоптера моменты импульсов двух диагональных винтов полностью компенсируются другой диагональю. Если же необходимо повернуть аппарат по часовой стрелке, то для этого нужно увеличить скорость вращения винтов, крутящихся против часовой стрелки: вследствие закона сохранения момента импульса корпус квадрокоптера повернется в противоположную сторону .



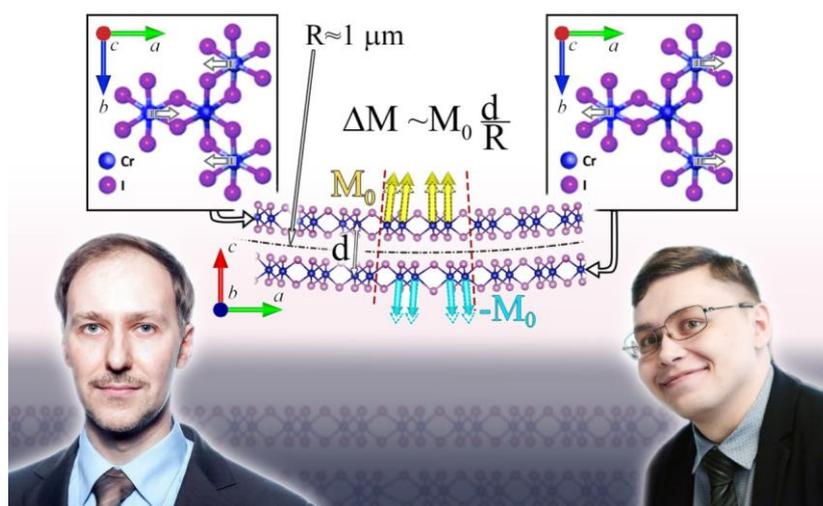
Подобно этому в антиферромагнетике спины двух магнитных подрешеток полностью уравнивают друг друга. Если же вызвать декомпенсацию магнитных моментов подрешеток, то, вследствие эффекта Эйнштейна-де-Гааза (магнитомеханического эффекта), возникновение намагниченности приведет к появлению и механического момента.

В статье предлагается использовать для создания такой декомпенсации обратный магнитоэлектрический эффект – возникновение намагниченности под действием электрического поля в антиферромагнетиках. Для обнаружения механического момента авторы предлагают воспользоваться оптической системой детектирования колебаний кантилевера в атомном силовом микроскопе, а сам кантилевер сделать из зажатого между графеновыми электродами ван-дер-ваальсова антиферромагнетика – графеноподобного материала, в котором магнитный момент одного слоя компенсируется соседним слоем (рис.2). Прикладывая переменное электрическое напряжение к графеновым электродам, можно вызывать за счет магнитоэлектрического эффекта периодическое изменение магнитного момента, а вследствие магнитомеханической связи – также и вибрацию кантилевера.

- Как «флексят» антиферромагнетики?

Qiao Lei, Jan Sladek, Vladimir Sladek, Alexey S. Kaminskiy, Alexander P. Pyatakov, and Ren Wei. Curvature-induced magnetization in a CrI<sub>3</sub> bilayer: Flexomagnetic effect enhancement in van der Waals antiferromagnets, *Physical Review B*, **109**, 014410 (2024).

Ученые кафедры физики колебаний физического факультета МГУ совместно с коллегами из Шанхайского Университета и Словацкой Академии Наук предсказали новый гигантский эффект в двумерных магнитных материалах. Этот эффект может найти применение в стрейнтронике и гибкой электронике.



Двумерные магнитные материалы, по своим свойствам напоминающие графен, были обнаружены относительно недавно, в 2016 году, и сразу стали «горячей» темой в магнетизме. Сама геометрия таких материалов располагает к эффектам связанным с их механической деформацией или изгибом. В работе аспиранта физического факультета МГУ Алексея Каминского и профессора А.П. Пятакова, написанной совместно с коллегами из Шанхайского Университета и Словацкой Академии Наук, предсказано, что в двумерных магнетиках в сотни раз усиливается *флексомагнитный эффект*, который заключается в возникновении намагниченности при изгибе материала.

«В наше время слова с корнем «флекс-» почти не требуют пояснений: людям зрелого возраста он знаком по занятиям лечебной физкультурой, а у молодежи в ходу слово «флексить» — замечает руководитель лаборатории фотоники и спинтроники проф. [А.П. Пятаков](#), — «занятно, что этот жаргонизм, одним из смыслов которого является «выставлять напоказ», довольно точно передает механизм явления: скрытый магнетизм выходит наружу, когда образец выгибается».

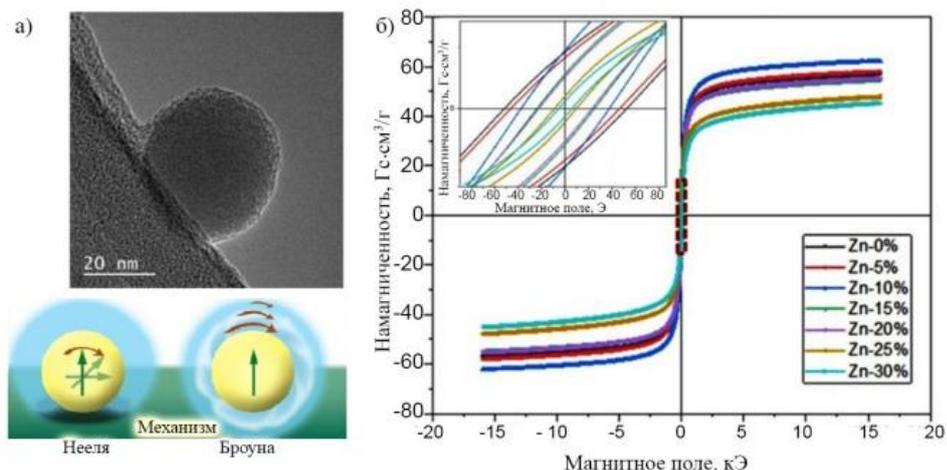
Флексомагнитный эффект проявляется в антиферромагнитных бислоях, т.е. материалах состоящих из двух намагниченных слоев, у которых в отсутствие деформаций один магнитный слой полностью компенсирует намагниченность другого. При изгибе верхний слой с намагниченностью вверх сжимается, его атомы сближаются, и магнитное взаимодействие между ними возрастает, а нижний слой, напротив, растягивается, и его намагниченность, направленная вниз, по модулю уменьшается. В результате возникает раскомпенсация магнитных моментов верхних и нижних атомов. Чем сильнее зависит намагниченность одиночного слоя от деформации и чем дальше друг от друга слои, тем сильнее эффект, а именно эти два свойства присущи двумерным магнитным материалам.

- **Решение дилеммы «частота-поле»**

Optimization of Zn–Mn ferrite nanoparticles for low frequency hyperthermia: Exploiting the potential of superquadratic field dependence of magnetothermal response, [Appl. Phys. Lett.](#) **120**, 102403 (2022).

В магнитной гипертермии, как и в любой медицинской практике, одной из главных проблем остается баланс между лечебным воздействием и побочными эффектами: переменные магнитные поля вызывают как полезный эффект нагрева магнитных наночастиц (накапливающихся в больных клетках), так и нежелательный нагрев здоровых биологических тканей.

Паразитный нагрев возникает за счет электромагнитной индукции Фарадея, величина которой пропорциональна производной магнитного поля по времени. Из этих соображений был сформулирован так называемый критерий Брезовича: произведение амплитуды поля на его частоту не должно превышать  $10^9 \text{A}/(\text{m}\cdot\text{с})$ , что примерно соответствует частоте 100 кГц и полю 100Э (~200 полей Земли). Если увеличивать частоту магнитного поля, нужно уменьшать его амплитуду и наоборот. Так возникает дилемма: чему отдать предпочтение – большему полю или большей частоте?



Механизмы нагрева наночастиц в переменном магнитном поле отличаются от индукционных и бывают нескольких видов: для малых (<10 нм) частиц преобладает магнитная релаксация (рис. 1а), которая делится на релаксацию Нееля (частица остается неподвижной и выделяет тепло при перемагничивании за счет преодоления магнитной анизотропии) и релаксацию Броуна (частица вращается и тепло выделяется за счет вязкого трения); для более крупных частиц уже становятся заметны потери на гистерезис (рис. 1б). Наиболее же перспективным, по мнению проф. А.П. Пятакова и его коллег-соавторов, оказывается механизм, связанный с потерями на гистерезис, поскольку площадь частной петли гистерезиса возрастает с амплитудой четвертой и даже пятой степени.

Это позволяет сформулировать такое решение дилеммы: нужно уменьшать частоту, увеличивая амплитуду магнитного поля, оставляя неизменным и равным пределу Брезовича их произведение. Это означает отход от обычной практики использования ультрамалых суперпарамагнитных (<10 нм) частиц, в которых отсутствует гистерезисная петля.

- **Надувание магнитных «пузырей» электрическим полем**

Bipolar electric field-induced nucleation of magnetic domains with 90° domain walls, [Journal of Applied Physics](#), v.129 024103 (2021).



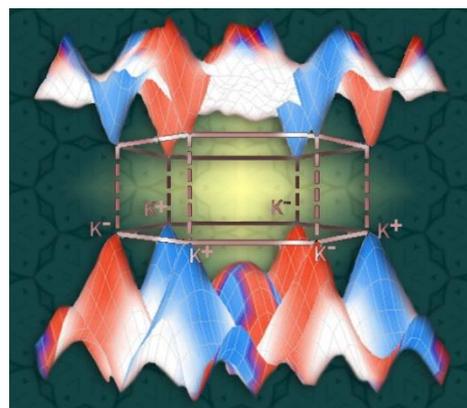
В англоязычной литературе цилиндрический магнитный домен называют “bubble domain”, т.е. домен-пузырь. И это не случайно, поскольку сходство между ними не только визуальное, но и физическое: силы, действующие на доменные границы, аналогичны поверхностному натяжению мыльных пленок. Как показано в [работе](#) сотрудников лаборатории фотоники и спинтроники электрическое поле от заряженного зонда-иглы играет как роль

«мыла» понижающего поверхностное натяжение доменной границы, так и роль давления воздуха, «раздувающего» домен. При этом домены с 90-градусными границами удается зарожать при обеих полярностях электрического напряжения.

- **Долинная поляризация – новый вид взаимосвязи электричества и магнетизма**

*Magnetoelectric Coupling in Multiferroic Bilayer VS<sub>2</sub>*, [Phys. Rev. Letters](#), v.125 247601 (2020)

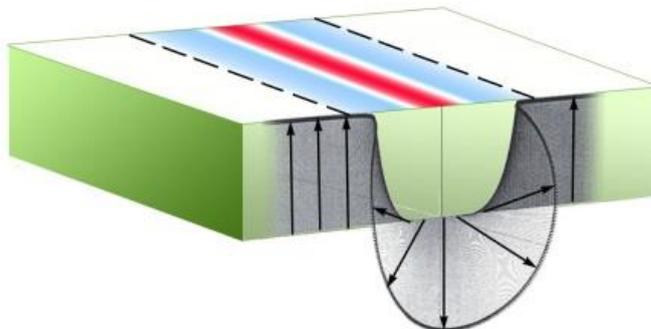
Все знают Кремниевую долину, но далеко не всем, даже физикам, известно понятие долины в кремнии и других полупроводниках. Так называют экстремумы энергетических зон (дно зоны проводимости, потолок валентной зоны). Если такой экстремум находится не в центре зоны Бриллюэна (например, в К-точке), то они представлены в двух «копиях», которые могут быть заселены по-разному, что называют долинной поляризацией электронов. В [статье](#) проф. А.П. Пятакова с коллегами из Шанхайского Университета на примере двумерного материала дисульфида ванадия VS<sub>2</sub> предложен новый вид взаимосвязи между магнетизмом и электрической поляризацией – посредством долинной поляризации.



- **Нуль-градусная доменная стенка как новый объект микромагнетизма и магнитоэлектричества**

*The electric-field-induced "zero-degree domain walls" in ferromagnets, [EuroPhysics Letters](#), v.129 27004 (2020)*

Само понятие 0-градусная доменная стенка может показаться оксюмороном, поскольку доменные стенки, как правило, разделяют области с различным направлением намагниченности, а здесь намагниченность как была направлена вверх, так и остается. Кроме того, существование такой неоднородности энергетически невыгодно, поскольку, доменная граница, подобно водяной пленке, имеет поверхностное натяжение. Однако, как показано [в работе](#) проф. А.П. Пятакова в соавторстве с коллегами из БашГУ все меняется в электрическом поле: там, где находится электрод (штриховая линия) покачивание намагниченности в одну и другую сторону оказывается энергетически выгодным. Такая 0-градусная граница может быть зародышем нового домена, что можно использовать в комбинированной памяти: электрической записи информации с магнитным считыванием.



- **Спектр изучения позволит предсказать срок службы диодного лазера**

*Прогнозирование срока службы мощных диодных лазеров по спектру их излучения на начальном этапе эксплуатации, **Известия Российской академии наук. Серия физическая**. Т. 84, № 2. — С. 225–228 (2020)*

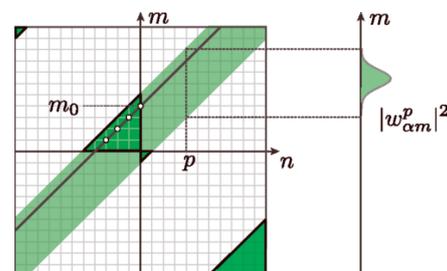
В [работе](#) доцента А.Г. Ржанова в сотрудничестве с коллегами из Национального исследовательского университета "МЭИ" показано, что в мощных лазерных диодах с широким контактом сравнение их спектра при первом включении и спустя 30 часов работы позволяет разработать теоретическую модель формирования спектров и каналов генерации в лазерах (на рисунке показаны картины излучения лазера в дальнем поле вначале работы и спустя 30 часов), а также предсказать срок их работы.



- **Новый вывод основного соотношения для электрической поляризации**

*Geometry of projected connections, Zak phase, and electric polarization, [Physical Review B](#), v.98, 161101(R) (2018)*

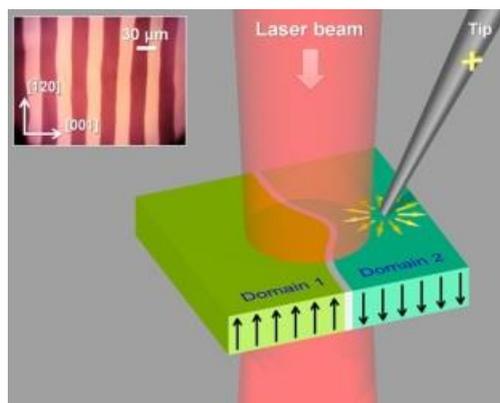
В работе с.н.с. А.С. Сергеева предложен новый подход к выводу основного соотношения современной теории электрической поляризации. Дело в том, что старое определение, которое учат в курсе общей физики (дипольный момент системы объема) мало подходит для периодического кристалла, а находят ее по среднему току через кристаллическую ячейку при изменении состояния кристалла (например, при воздействии на него электрического поля или механического напряжения). В статье показано, что изменение геометрической фазы, известной как фаза Зака, можно быть представлено в виде двух вкладов: ток через границу ячейки и изменение ее дипольного момента, что естественным образом позволяет связать фазу Зака с электрической поляризацией.



- **Доменная граница в роли затвора фотоаппарата**

*Electric-field-driven magnetic domain wall as a microscale magneto-optical shutter, [Scientific Reports](#), v.7, 264 (2017)*

Сотрудники лаборатории фотоники и спинтроники с помощью коллег из Российского Квантового Центра создали прототип устройства, управляющего интенсивностью света, которое работает на новом, электро-магнитооптическом, принципе. Прикладывая переменное напряжение к электроду-игле, можно заставить доменную границу двигаться, открывая и закрывая путь лучу лазера, подобно краю шторки пленочного фотоаппарата. Этот принцип управления может стать основой функционирования миниатюрных и быстродействующих модуляторов света для передачи информации в оптических системах связи.



- **Магнитные топологические дефекты – это не помеха, а напротив, «строительные блоки» спинтроники 4-го поколения**

*Микромагнетизм и топологические дефекты в магнитоэлектрических средах, [Успехи Физических Наук](#), т. 185, 1077–1088 (2015)*

Неоднородности в распределении намагниченности – доменные границы, магнитные вихри и т.п. могут рассматриваться как подвижные элементы магнитной памяти и магнитной электроники. В статье сотрудников Лаборатории фотоники и спинтроники показано, что ими можно управлять с помощью электрического поля, что позволит перейти к новым принципам управления в спинтронике.



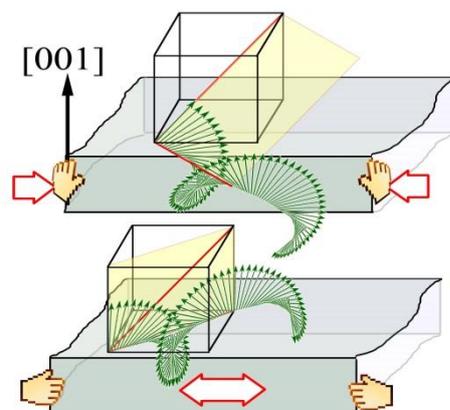
Pyatakov\_photospin.mpeg

**[Ссылка на видео](#)**

- **Дизайн магнитной текстуры в тонких пленках позволит регулировать работу устройств спинтроники**

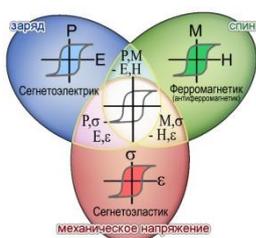
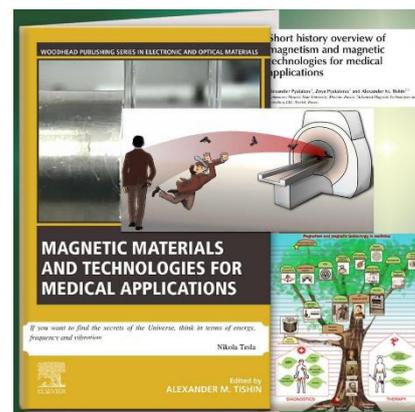
*Crafting the magnonic and spintronic response of BiFeO<sub>3</sub> films by epitaxial strain, [Nature materials](#), v. 12, 641–646 (2013)*

Как показано в статье международной команды исследователей с участием сотрудников Лаборатории фотоники и спинтроники магнитные текстуры особого типа – *спиновые циклоиды*, могут быть использованы для настройки спектров магнонных мод материала, а также величины магнетосопротивления в устройствах спинтроники. Форма и ориентация спиновых циклоид зависит от механических напряжений, возникающих при эпитаксиальном росте пленки, что позволяет, подбирая величину и знак деформации, проектировать спиновые структуры и создавать материалы с заданными свойствами.



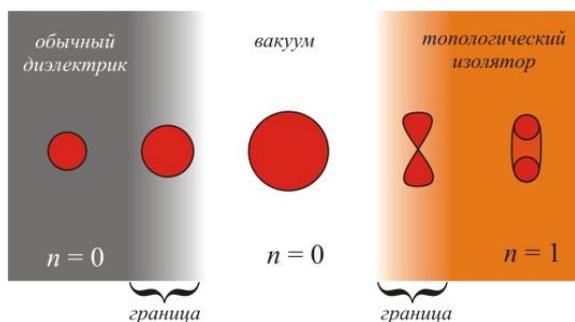
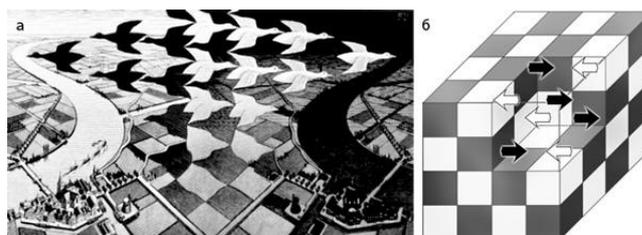
## Научно-популярные публикации:

А.П. Пятаков, А.М. Тишин, З.А. Пятакова, "Short history overview of magnetism and magnetic technologies for medical applications", глава в книге «Magnetic Materials and Technologies for Medical Applications» (Elsevier, 2021) ([магнитная медицина](#) в ее развитии: от аюрведы до современных практик и перспективных методик).



А.П. Пятаков  
[«Мультиферроики»](#) и связанные с ними статьи для  
[Большой Российской Энциклопедии](#)

А.П. Пятаков, А.К. Звездин, Магнит чувствует электрическое поле, для журнала «[Химия и жизнь](#)» - XXI век». -2013. - № 5. - С. 3-7



А.С. Сергеев «Удивительные свойства электронов» (о [топологических изоляторах](#)) для журнала «Квант» №1, 2014, стр. 7-11

Александр Пятаков, «Вулкан как источник вдохновения» (о [вулкане с молниями](#)), для научно-популярного журнала "КОТ ШРЁДИНГЕРА", n1, Октябрь 2014, с.136

