

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices / M. N. Baibich [ et. al. ] // Phys. Rev. Lett. – 1988. – Vol. 61, № 21. – P. 2472–2475.
2. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch [ et. al. ] // Phys. Rev. B. – 1989. – Vol. 39, № 7. – P. 4828–4830.
3. Zutic, I. Spintronics: Fundamentals and applications / I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma // Rev. Mod. Phys. – 2004. – V.76. – P. 323–410.
4. Особенности изучения спин-зависимых электронных состояний и процессов в курсе лекций “Спинтроника” и проведении лабораторных работ / Головчук В.И., Лукашевич М.Г. // Материалы и структуры современной электроники : сборник научных трудов VII Международной научной конференции, посвященной 50-летию кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники, Минск, 14–16 октября 2020 г. / редкол. : В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. — Минск : Изд. центр БГУ, 2020.
5. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – 2-е изд., перераб. и доп. в 2 – х томах. – М.: Мир, 1982. – 664 с.
6. Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников/ Б. И. Шкловский, Ф. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
7. Abeles, B. Structural and electrical properties of granular metal films / B. Abeles, P. Sheng, M. Coutts, Y. Arie // Adv. Phys. – 1975. – Vol. 24. – P. 407–461.
8. Bergman, G. Weak localization in thin films / G. Bergman // Phys. Rev. B. – 1984. – Vol.107, № 1. – P. 1–58.
9. Bean, C.P. Superparamagnetism / C.P. Bean, J. D. Livigston // J. Appl. Phys. Supplement. – 1959. – Vol. 30, № 4. – P. 120S – 129S.

## ГРАДООТВОДЫ НАРКЕВИЧА-ИОДКО И ПОИСК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

О. А. Гапоненко<sup>1</sup>, Н. А. Поклонский<sup>2</sup>, В. А. Самуйлов<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> *Национальная академия наук Беларуси, пр. Независимости, 66, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: Olga@presidium.bas-net.by*

<sup>2)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: Poklonski@bsu.by*

<sup>3)</sup> *State University of New York at Stony Brook, Department of Materials Science and Chemical Engineering, Stony Brook, NY11794 e-mail: Vladimir.Samuilov@stonybrook.edu*

В 80-х годах XIX века белорусский естествоиспытатель профессор Якуб Наркевич-Иодко предложил концепцию градоотводов. Указывая на аналогию между градоотводом и молниеотводом, он впервые отметил, что градоотводы являются «мягкими» стоками атмосферного электричества на земную поверхность. Многочисленные попытки использования электрического поля Земли напрямую в качестве источника электроэнергии до сих пор не показали практической целесообразности. Но в последнее время экспериментально установлено, что при взаимодействии влажного воздуха и гидрофильной поверхности микро- и наноструктурированных углеродных материалов может быть получена электроэнергия значимой величины. Этот способ получения электроэнергии – суть гигроэлектричества.

**Ключевые слова:** градоотвод; атмосферное электричество; пары воды; гигроэлектричество; гидрофильные углеродные материалы; оксид графена.

# HAIL DEFLECTORS BY JACUB NARKIEWICZ-JODKO AND SEARCH FOR NEW ALTERNATIVE ELECTRIC ENERGY SOURCES

O. A. Gaponenko<sup>1</sup>, N. A. Poklonski<sup>2</sup>, V. A. Samuilov<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup>*National Academy of Sciences of Belarus*

<sup>2</sup>*Belarusian State University, Nezavisimosti Ave. 4, 220030 Minsk, Belarus*

<sup>3</sup>*State University of New York at Stony Brook, Department of Materials Science and Chemical Engineering  
Corresponding author: V. A. Samuilov (Vladimir.Samuilov@stonybrook.edu)*

In the 80s of the 19th century, Belarusian naturalist Professor Yakub Narkiewicz-Jodko proposed a concept of Hail Deflectors. Recognizing the analogy between hail and lightning rods, he was the first to note that hail rods are “soft” drains of the atmospheric electricity onto the ground surface. Numerous attempts to use the Earth’s electric field directly as an electric power source have not yet shown the practical possibility. However, it was recently experimentally shown that the interaction of moist air with the hydrophilic surface of micro- and nanostructured carbon materials can produce significant electrical energy. This method of generating electricity is the essence of hygroelectricity.

**Key words:** hail deflector; atmospheric electricity; water vapor; hygroelectricity; hydrophilic carbon materials; graphene oxide.

## ВВЕДЕНИЕ

Мир физики и техники создавался благодаря исследователям и инженерам многих поколений разных народов. Творчески вобрав в себя опыт многих стран, заметный вклад в физико-технические науки, инженерию и практику внесли и представители Беларуси. Память о прошлом помогает естествоиспытателям в отчаянном противостоянии с бесконечностью на крутых траекториях познания. Ключевым аспектом в этом противостоянии является получение, преобразование и аккумуляция электрической энергии, которые во многом определяют развитие цивилизации [1, 2].

В 80-х годах XIX века на страницах периодической печати появились сообщения о градоотводах, которые использовались профессором Якубом Оттоновичем Наркевичем-Иодко на территории его имений в Минской губернии с целью уменьшения гроз и градобитий [37]. Первое официальное сообщение о системе градоотводов [3] сделано им на заседании Метеорологической комиссии Русского географического общества в феврале 1889 г. и получило ее одобрение. Градоотвод состоял из заостренного на верхнем конце медного стержня, соединенного металлической проволокой с цинковой пластинкой, закопанной в землю (ниже глубины промерзания грунта зимой). Медный стержень располагался на деревянном столбе высотой около 15–20 м. Результаты действия градоотводов, которые располагались на поле в шахматном порядке с плотностью одна штука на две десятины, были проанализированы в отчетах Главной физической обсерватории по наблюдению над грозами в Российской империи. Указывалось, что в Минской губернии в одиннадцати пунктах было 164 грозы за лето, из которых минимальное число — шесть — пришлось на поля Я.О. Наркевича-Иодко, где были установлены градоотводы. Сам исследователь, да и другие местные жители уверяли, что поля, снабженные градоотводами, никогда не страдали от града [8, 9].

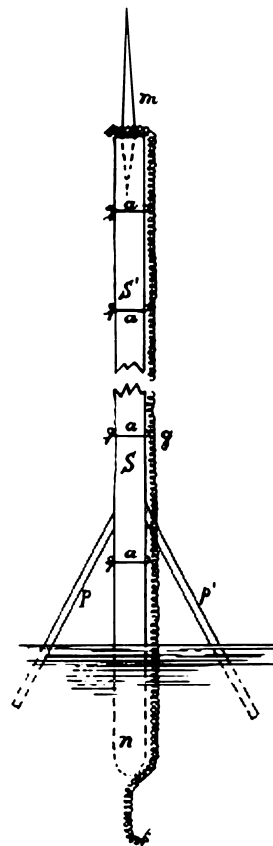
Принцип действия градоотвода профессор Наркевич-Иодко предложил основываясь на собранных им за много лет сведениях об атмосферных явлениях и измерениях электрического напряжения атмосферы. Он был убежден, что возможность возникновения такого атмосферного явления, как гроза, зависит от напряжения электрического поля между грозовой тучей и поверхностью земли. Ученый считал, что на это влияют рельеф местности и метеорологические параметры, среди которых особенно важную роль играет влажность воздуха [10, 11].

### ИДЕЯ ГРАДООТВОДОВ

Градоотводы по мнению Я.О. Наркевича-Иодко являлись «мягкими» собирателями (стоками) атмосферного электричества в землю, позволяющими уменьшить количество атмосферного электричества, а вместе с тем и опасность воздействий грозы, молнии, града. Признавая аналогию между градоотводом (см. рис. 1) и молниеотводом, ученый отмечал: «... что такой прибор чрезвычайно схож с тем, который бессмертный Франклин употреблял в своих классических исследованиях атмосферного электричества, хотя, разумеется, он меньше всего имел при них в виду “электрокультуру”» [12]. Цель градоотводов не ограничивалась предотвращением гроз и града. Они служили источниками электрического тока в его опытах по изучению влияния электричества на рост растений.

Действительно, в конце XIX столетия началось широкое практическое применение электрического тока для повышения урожайности растений. По этому вопросу публиковались работы в Англии, Германии, России, Франции. Для профессора Наркевича-Иодко, землевладельца и естествоиспытателя, изучение влияния электричества на растения представляло большой интерес. С целью проведения систематических исследований в этой области он оборудовал в имении Над-Нёман опытные участки электрокультивирования [12,13]. Изучая влияние электричества на растения, ученый приходит к выводу, что «электричество оказывает на них несомненное влияние, в большинстве случаев благотворное... Электричество может играть громадную роль в культуре растений» [13].

В январе 1892 г. на заседании «Собрания сельских хозяев» в Санкт-Петербурге Я.О. Наркевич-Иодко делает сообщение о результатах опытов по использованию электричества в сельском хозяйстве. «Из добытых в литературе данных оказывается, что большинство исследователей, которые до сих пор пробовали делать опыты, делали их с гальваническим элементом; но мои по-



**Рисунок 1.** Схема градоотвода конструкции Я.О. Наркевича-Иодко в статье «Градоотводы-грозоотводы», опубликованной в журнале «Сельский Хозяин» (1889, № 32)

следние опыты 1891 г. были произведены над атмосферным электричеством» [13]. Ему удавалось сократить вегетативный период на три-четыре недели, а размер плодов при этом увеличивался в несколько раз. Обобщение и анализ экспериментальных результатов позволили ученому сделать вывод, что электричество способствует ускорению электрохимических процессов, происходящих в почве [13].

В настоящее время вопросам влияния электрических токов на растения посвящены многочисленные исследования. Установлено, что при пропускании тока через стебель растения линейный рост побегов увеличивается на 5–30% [14]. Установлена зависимость между интенсивностью фотосинтеза и значением разности электрических потенциалов между землей и атмосферой [14]. Однако, все еще не исследован механизм этих явлений.

При раскопках руин в 2017 г. усадебного дома в усадьбе Над-Нёман со стороны северного фасада на глубине около 1.5 метров от поверхности материкового слоя была обнаружена оцинкованная пластина с припаянной к ней длинной медной проволокой диаметром  $\approx 3$  мм, выходящей на поверхность земли. Малое значение площади поперечного сечения медного провода отвергает гипотезу о молниеотводе, установленном в непосредственной близости к усадебному дому (рис. 2). Анализ фотографии усадебного дома (первая половина XX века) позволил предположить принадлежность этой пластины с проволокой к отчетливо видимому градоотводу — разработке естествоиспытателя для «мягкого» сбора атмосферного электричества.

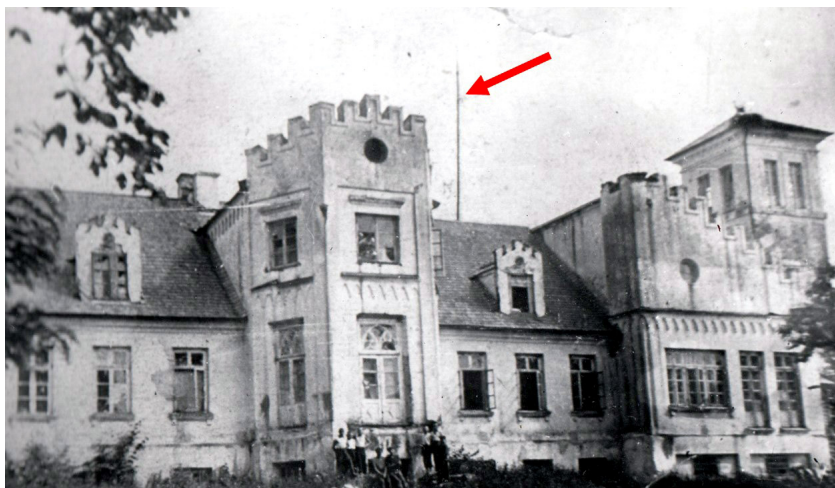
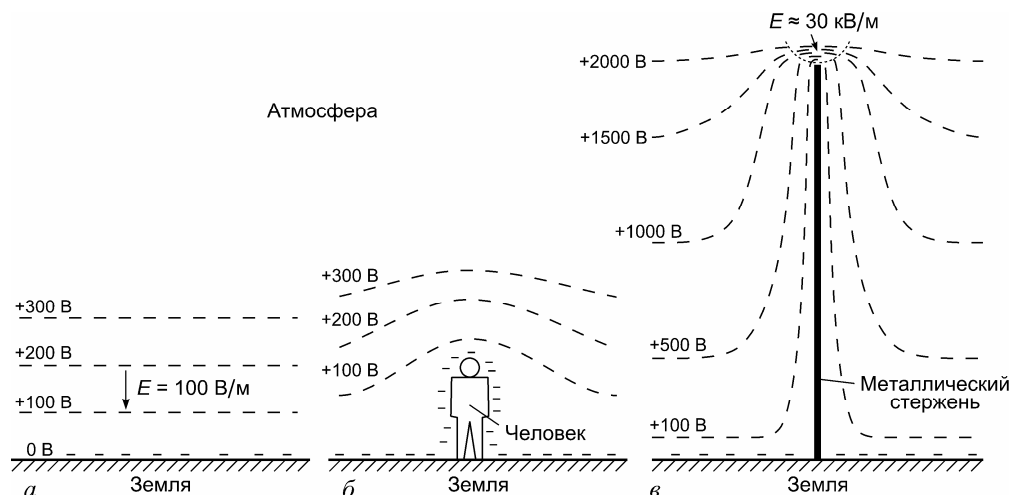


Рисунок 2. Фотография усадебного дома профессора Я.О. Наркевича-Иодко (фото С. Шкадинского, начало 1930-х годов). Стрелкой указана мачта градоотвода (рис. 1)

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

В солнечный день над равниной по мере подъема вверх электрический потенциал увеличивается с каждым метром на  $\approx 100$  вольт, т. е. в сухом воздухе существует вертикальное электрическое поле напряженностью  $E = 100$  В/м, направленное вниз, что соответствует отрицательному заряду на поверхности Земли. Возникает вопрос [15]: «Если между моей головой и пятками действительно имеется напряжение  $\approx 175$  В, то почему же меня не ударяет током, как только я выхожу на улицу?» Ответ: челове-

ское тело является относительно хорошим проводником [16]. Когда мы стоим босиком на влажной земле, то вместе с нею образуем эквипотенциальную поверхность. Обычно эквипотенциальные поверхности параллельны земле (рис. 3, *а*), но когда на земле стоит человек, то эти поверхности искажаются (рис. 3, *б*). Так что разность потенциалов между головой и пятками практически равна нулю. Градоотвод высотой  $\approx 20$  м создаст еще большее искривление эквипотенциальной поверхности; градиент потенциала у острия может достигать напряженности пробоя воздуха (рис. 3, *в*).



**Рисунок 3. Распределение потенциала (по мотивам лекций Р. Фейнмана [15]):**  
*а* – над землей; *б* – возле человека; *в* – вблизи металлического градоотвода высотой 20 м.  
 Напряженность электрического поля (изменение потенциала с расстоянием) имеет высокое значение вблизи острия градоотвода (рис. 1)

Проведено большое количество исследований по улучшению свойств катодов для автоэлектронной эмиссии посредством их покрытия чешуйками графена и массивами углеродных нанотрубок. Однако многочисленные попытки использования электрического поля Земли для извлечения электроэнергии пока не показали практической целесообразности из-за того, что в атмосфере у земной поверхности концентрация подвижных нескомпенсированных зарядов весьма мала: воздух является плохим проводником электричества [17].

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ ИЗ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Идея использования электричества, образовавшегося естественным путем в атмосфере, будоражит умы на протяжении столетий. Можно представить себе устройства, которые улавливают электричество из воздуха подобно тому, как солнечные батареи улавливают солнечный свет и генерируют электрическую энергию. Так, Никола Тесла мечтал улавливать и использовать электричество из атмосферы, образующееся при собирании водяного пара на микроскопических частицах в воздухе. Но в то время не было достаточных знаний о процессах, связанных с образованием и выделением электричества в присутствии воды в атмосфере. Ранее считалось, что капли воды в земной атмосфере электрически нейтральны и остаются таковыми даже после контакта с электрически заряженными частицами пыли и каплями других жидкостей.

Однако новые данные свидетельствуют о том, что капли воды в атмосфере действительно накапливают электрический заряд [18].

Исследователи уже находятся на стадии разработки устройств по преобразованию атмосферного электричества в альтернативный источник энергии [19]. Так, в работе [20] проведены лабораторные эксперименты, моделирующие контакт воды с частицами пыли в воздухе. В качестве частиц пыли использовались микрочастицы  $\text{SiO}_2$  и  $\text{AlPO}_4$ , которые являются обычными переносимыми по воздуху веществами. Было установлено, что в присутствии высокой влажности частицы  $\text{SiO}_2$  становятся отрицательно заряженными, а частицы  $\text{AlPO}_4$  — положительно заряженными. Это стало явным доказательством того, что пары и капли воды в атмосфере могут накапливать электрические заряды и передавать их другим материалам, с которыми вода вступает в электромеханический контакт. Было предложено называть электричество, получаемое в результате взаимодействия материалов с влагой окружающей среды, — «гигроэлектричеством».

При достаточно высокой влажности вблизи острия градоотвода в сильном электрическом поле происходит диссоциация молекул воды, сопровождаемая возникновением коронного разряда и компенсацией тока автоэмиссии электронов из острия потоком ионов из атмосферы [21].

В будущем возможно будет разработать коллекторы, которые улавливают гигроэлектроэнергию и направляют ее потребителю. Подобно тому, как солнечные элементы лучше всего работают в солнечных районах мира, гигроэлектрические панели будут работать более эффективно в районах с относительно высокой влажностью. Этот подход поможет предотвратить образование и удары молний, размещая гигроэлектрические панели на крышах зданий в регионах, где часто бывают грозы. Панели будут отводить электричество из воздуха и предотвращать накопление электрического заряда, высвобождаемого молнией.

### НАНО-ГИГРОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

В последнее время концепция гигроэлектричества была возрождена на атомно-молекулярном уровне, когда генерация электрической энергии происходит за счет взаимодействия влаги воздуха с гидрофильной поверхностью мембран, изготовленных из функциональных низкоразмерных углеродных материалов, таких как оксид графена [22] и оксиды некоторых металлов [23].

В соответствии с рис. 4 молекулы воды, адсорбированные на поверхности мембраны из оксида графена, диссоциируют, а протоны диффундируют вглубь мембраны при возникновении градиента протонов и создают разность электрических потенциалов на противоположных сторонах мембраны до  $\approx 1.5$  В, когда система (оксид графена + электроды) подвергается воздействию атмосферы с относительной влажностью 80% при температуре 25 °С [22, 24]. Гигроэлектричество, впервые описанное в ряде работ [22–31], открыло возможности для использования окружающего нас влажного воздуха в производстве электроэнергии. Это привело к исследованиям гигроэлектрической генерации: от концепции до практических приложений [27, 31].

Такие устройства (рис. 4) могут создавать постоянную разность электрических потенциалов на основе спонтанной адсорбции молекул воды, их диссоциации и диффузии протонов из-за сильного градиента их концентрации. Кроме того, их можно интегрировать в больших масштабах (простое последовательное соединение). Выходное напряжение этих интегрированных устройств приближается к чрезвычай-

но высокому значению (до 1000 вольт!) [25]. Электроэнергии, вырабатываемой такими устройствами в единицу времени, достаточно для питания бытовой электроники, что может создать основу для экологически чистой и устойчивой энергетики.

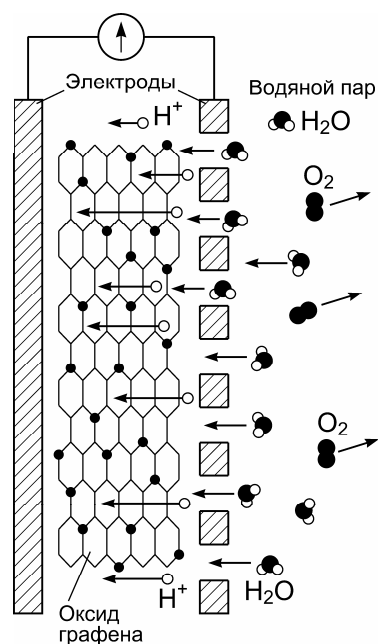
В то же время адсорбция и диссоциация воды на поверхности гидрофильных мембран из различных функциональных материалов, включая оксид графена и оксиды металлов, еще недостаточно изучены [32–35], также как и механизм протонного транспорта в этих материалах [22–31, 36].

Было обнаружено, что оксид графена является эффективным катализатором диссоциации молекул воды, снижая высоту барьера на 75% по сравнению с контрольной мембраной [35]. Электромиграция протонов через кристаллические мембраны из моно- и малослойного графена, а также гексагонального нитрида бора (hBN) и дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) исследовалась в работе А. Гейма и др. [37]. Было установлено, что в результате эволюции в мембране протонов в молекулы водорода ( $\text{H}_2$ ) наблюдается контролируемый поток  $\text{H}_2$ .

Наше понимание протонной проводимости оксида графена в присутствии влаги следующее [38]: 1) адсорбция молекул  $\text{H}_2\text{O}$  происходит в результате конденсации на поверхности; 2) при взаимодействии молекул воды с гидрофильными функциональными группами оксида графена образуются протоны ( $\text{H}^+$ ) [39]. Принято считать, что протоны перемещаются путем прыжков между соседними молекулами воды по механизму Гротхуса [40]. Однако, наше наблюдение протонной электрической проводимости соответствует области температур значительно ниже точки заморозания воды [38], что может быть интерпретировано как протонная электромиграция во льду. Тем не менее, при низких значениях влажности (точка росы ниже нуля градусов Цельсия) покрытие поверхности оксида графена молекулами воды далеко не сплошное, и вряд ли можно ожидать протонную электропроводность в воде или во льду [41]. Наш взгляд миграция протонов в оксиде графена является термически активируемым процессом с энергией активации  $\approx 0.7$  эВ, что соответствует высоте энергетического барьера для прохождения протона через шестиугольную ячейку решетки графена [37].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция градоотводов, мягких стоков атмосферного электричества, предложенная естествоиспытателем Якубом Оттоновичем Наркевичем-Иодко в 80-х годах XIX века, может быть использована для разработки дополнительных источников электрической энергии на основе достижений современных технологий.



**Рисунок 4. Схема работы гигроэлектрической наноячейки из оксида графена между двумя электродами, один из которых пронизан для молекул воды**

Работа выполнена при частичной поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» Республики Беларусь.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Капица, П.Л. Эксперимент. Теория. Практика / П.Л. Капица. – М.: Наука, 1987. – 496 с.
2. Капица, С.П. К теории роста населения Земли / С.П. Капица // УФН. – 2010. – Т. 180, № 12. – С. 1337–1346.
3. Журн. заседания Метеорологической комиссии 10 февраля 1889 г. // Изв. Имп. Рус. Геогр. О-ва, 1889. – Т. 25, вып. 3. – С. 29.
4. Журн. заседания Метеорологической комиссии 14 апреля 1889 г. // Изв. Имп. Рус. Геогр. О-ва, 1889. – Т. 25, вып. 4. – С. 52.
5. Наркевич-Иодко, Я.О. Градоотводы-грозоотводы / Я.О. Наркевич-Иодко // Сельский хозяин. – 1889. – № 32. – С. 560–561.
6. Наркевич-Иодко, Я.О. Гроза с градом 17-го (29) июня 1890 г. и действие градоотводов / Я.О. Наркевич-Иодко // Метеорологический вестник (СПб.). – 1891. – № 4. – С. 184.
7. Наркевич-Иодко, Я.О. О теории града и градоотводов (извлечение из реферата Я.О. Наркевича-Иодко) / Я.О. Наркевич-Иодко // Минский листок. – 1891. – 25 окт. (№ 86). – С. 3; Продолжение: 29 окт. (№ 87). – С. 5.
8. Грыбкоўскі, В.П. Прафесар электраграфіі і магнетызму: Якуб Наркевич-Ёдка / В.П. Грыбкоўскі, В.А. Гапоненка, У.М. Кісялёў. – Мінск: Навука і техника, 1988. – 72 с.
9. Грибковский, В.П. Яков Оттонович Наркевич-Иодко / В.П. Грибковский, О.А. Гапоненко, В.Н. Киселев // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. – 1985. – № 5. – С. 117–123.
10. Яков Оттонович Наркевич-Иодко (1847–1905): библиографический указатель / сост. Я.Ю. Березкина, О.А. Гапоненко. – Минск: Белорус. наука, 2010. – 244 с.
11. Beryozkina N.Yu., Gaponenko O.A. Scientific activity of the Belarusian scientist J. Narkiewicz-Jodko (second half of the nineteenth and early twentieth centuries) // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. гуманіт. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 461–475.
12. Протокол Петербургского Собрания сельских хозяев от 6 апреля 1893 г. // Зап. Петербург. О-ва Сельск. Хозяев. – 1893. – № 8. – С. 1–18.
13. Протокол Петербургского Собрания сельских хозяев от 28 января 1892 г. // Зап. Петербург. О-ва Сельск. Хозяев. – 1892. – № 2. – С. 1–15.
14. Галактионов, С.Г. Ботаники с гальванометром / С.Г. Галактионов, В.М. Юрин. – М.: Знание, 1979. – 144 с.
15. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – Вып. 5: Электричество и магнетизм // Гл. 9. Электричество в атмосфере. – М.: УРСС, 2013. – С. 174–198.
16. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.
17. Базелян, Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
18. Б.М. Смирнов. Электрический цикл в земной атмосфере / Б.М. Смирнов // УФН. – 2014. – Т. 184, № 11. – С. 1153–1176.
19. Electricity collected from the air could become the newest alternative energy source [Electronic resource] // 240th National Meeting of the American Chemical Society, Boston, Aug. 22–26, 2010. – Mode of access: <https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2010/august/electricity-collected-from-the-air-could-become-the-newest-alternative-energy-source.html>. – Date of access: 03.10.2022.
20. Gouveia, R.F. Electrostatic charging of hydrophilic particles due to water adsorption / R.F. Gouveia, F. Galembeck // J. Am. Chem. Soc. – 2009. – Vol. 131, № 32. – P. 11381–11386.
21. Войцеховский, Б.В. Изолированный огонь св. Эльма на летающем концентраторе и шаровая молния / Б.В. Войцеховский, М.Б. Войцеховский // Докл. АН СССР. Физика. – 1987. – Т. 295, № 3. – С. 580–582.
22. Interface-mediated hygroelectric generator with an output voltage approaching 1.5 volts / Y. Huang [et al.] // Nat. Commun. – 2018. – Vol. 9. – P. 4166 (1–8).
23. Moist-electric generation / J. Bai [et al.] // Nanoscale. – 2019. – Vol. 11, № 48. – P. 23083–23091.



24. Water-enabled electricity generation: A perspective / X. Zhao [et al.] // *Adv. Energy Sustainability Res.* – 2022. – Vol. 3, № 4. – P. 2100196 (1–15).
25. Bilayer of polyelectrolyte films for spontaneous power generation in air up to an integrated 1,000 V output / H. Wang [et al.] // *Nat. Nanotechnol.* – 2021. – Vol. 16, № 7. – P. 811–819.
26. Gabris, M.A. Carbon nanomaterial-based nanogenerators for harvesting energy from environment / M.A. Gabris, J. Ping. // *Nano Energy.* – 2021. – Vol. 90, Part A. – P. 106494 (1–30).
27. A hygroelectric power generator with energy self-storage / Y. Han [et al.] // *Chem. Eng. J.* – 2020. – Vol. 384. – P. 123366 (1–5).
28. Asymmetrically patterned cellulose nanofibers/graphene oxide composite film for humidity sensing and moist-induced electricity generation / Z. Li [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2020. – Vol. 12, № 49. – 55205–55214.
29. Chen, Q. Graphene-based assemblies for moist-electric generation / Q. Chen, J. Zhao, H. Cheng // *Front. Energy Res.* – 2021. – Vol. 9. – P. 738142 (1–13).
30. Sustainable power generation via hydro-electrochemical effects / A. Sohn [et al.] // *Nanoscale.* – 2022. – Vol. 14, № 11. – P. 4188–4194.
31. Energy harvesting by ambient humidity variation with continuous milliampere current output and energy storage / Y. Komazaki [et al.] // *Sustain. Energ. Fuels.* – 2021. – Vol. 5, № 14. – P. 3570–3577.
32. The chemistry of water on alumina surfaces: Reaction dynamics from first principles / K.C. Hass [et al.] // *Science.* – 1998. – Vol. 282, № 5387. – P. 265–268.
33. Sulpizi, M. The silica–water interface: How the silanols determine the surface acidity and modulate the water properties / M. Sulpizi, M.P. Gaigeot, M. Sprik // *J. Chem. Theory Comput.* – 2012. – Vol. 8, № 3. – P. 1037–1047.
34. Cheng, J. Acidity of the aqueous rutile TiO<sub>2</sub>(110) surface from density functional theory based molecular dynamics / J. Cheng, M. Sprik // *J. Chem. Theory Comput.* – 2010. – Vol. 6, № 3. – P. 880–889.
35. McDonald, M.B. Graphene oxide as a water dissociation catalyst in the bipolar membrane interfacial layer / M.B. McDonald, M.S. Freund // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2014. – Vol. 6, № 16. – P. 13790–13797.
36. Marx, D. Proton transfer 200 years after von Grotthuss: Insights from ab initio simulations / D. Marx // *ChemPhysChem.* – 2006. – Vol. 7, № 9. – P. 1848–1870.
37. Proton transport through one-atom-thick crystals / S. Hu [et al.] // *Nature.* – 2014. – Vol. 516, № 7530. – P. 227–230.
38. Poklonski, N.A. Towards the understanding of the mechanism of dc protonic conduction in graphene oxide / N.A. Poklonski, V.A. Samuilov // *Материалы и структуры современной электроники: матер. VIII Междунар. науч. конф., Минск, 10–12 окт. 2018 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2018. – С. 214–219.*
39. Enhanced proton conductivity of graphene oxide/nafion composite material in humidity sensing application / S. Ghosh [et al.] // *IEEE Trans. Nanotechnol.* – 2016. – Vol. 15, № 5. – P. 782–790.
40. Agmon, N. The Grotthus mechanism / N. Agmon // *Chem. Phys. Lett.* – 1995. – Vol. 244, № 5-6. – P. 456–462.
41. Conway, B.E. Proton conductance in ice / B.E. Conway, J.O'M. Bockris // *J. Chem. Phys.* – 1958. – Vol. 28, № 2. – P. 354–355.