

# Лабораторный практикум по геофизике

23 ноября 2023 г.

## Предисловие

В рамках курса «Геофизика» для ознакомления с некоторыми методами и возможностями современных геофизических исследований предлагается к выполнению несколько лабораторных работ, связанных как с инструментарием, так и с анализом данных натурных наблюдений глобальной электрической цепи (ГЭЦ) постоянного тока и переменного тока. Лабораторные работы направлены на развитие общих навыков, которые будут полезны и в других областях науки: современные методы автоматизации эксперимента, численное моделирование, обработка рядов данных и т. д.

Работа с программным кодом и данными реализуется в среде JupyterLab, запущенной на серверах лаборатории. Среда доступна по адресу <https://gis.ipfran.ru/>. Для программирования рекомендуется использовать язык Python 3 с библиотеками `numpy`, `scipy`, `pandas`, `matplotlib`. Эти и другие библиотеки предустановлены в рабочем окружении. В качестве альтернативного варианта можно использовать C/C++ в том же окружении, только компилировать код вручную через консоль. В последнем случае рекомендуется использовать библиотеку `xtensor` для работы с векторами и матрицами и библиотеку `scpru` для загрузки бинарных данных в формате `pru`.

## Введение

Для анализа различных составляющих ГЭЦ применяется несколько разных типов натурных наблюдений. Например, с помощью специальным образом подготовленного датчика Гейгера, поднимаемого на воздушном шаре<sup>1</sup>, можно измерить вертикальный профиль ионизации в атмосфере до высот в 30–40 км и использовать эти данные для уточнения профиля проводимости.

Ещё один пример — глобальные сети грозопеленгации и спутниковые датчики молний<sup>2</sup>. Сети, как правило, основаны на регистрации электромагнитного излучения молний несколькими датчиками, расположенными в разных точках планеты. На основе разности времен прихода излучения на различные пункты можно рассчитать время и местоположение разряда, а по амплитуде и форме принятого сигнала — оценить энергию и тип молниевых разряда.

В отдельную категорию можно выделить наблюдения за интегральными величинами, которые содержат в себе все заложенные в задачу условия. Иначе говоря, наблюдения за теми величинами, которые мы ранее искали как *решения задач*. В прочитанных лекциях [Слюняев, 2023] такими величинами выступали *ионосферный потенциал* для ГЭЦ постоянного тока и *спектр шумановских резонансов* для ГЭЦ переменного тока.

В данном практикуме предлагается ознакомиться с инструментарием, используемым для численного и инструментального анализа ГЭЦ. При этом предлагаемые зада-

---

<sup>1</sup>Как правило, такие шары используются в метеонаблюдениях. Сам шар обычно называют метеоболочкой, а датчик, который он несёт, метеозондом. Тем не менее, и в отечественной, и в зарубежной литературе можно встретить наименование «зонд», «метеозонд» по отношению к метеоболочке с датчиком вместе.

<sup>2</sup>Наиболее известный датчик — это Lightning Image Sensor (LIS), запущенный в рамках миссии The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).

ния дают представления о методах, типичных не только для исследований атмосферного электричества, но и для геофизики в целом.

## 1. Анализ суточной вариации электрического поля по данным натурных наблюдений

Наиболее естественной количественной характеристикой ГЭЦ постоянного тока является ионосферный потенциал. Однако измерения ионосферного потенциала достаточно сложны — для этого нужно промерить весь вертикальный профиль вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$ , — и стали возможными только в 1950-е — 1960-е годы.

С теоретической точки зрения для изучения вариабельности глобальной цепи на различных временных масштабах достаточно измерять вместо ионосферного потенциала вертикальную компоненту электрического поля  $E_z$  у поверхности Земли в областях хорошей погоды. Квазистатическое электрическое поле  $E_z$ , измеряемое в условиях идеально чистой атмосферы (т. е. идеального профиля проводимости и отсутствия объёмного заряда), должно быть линейно связано с ионосферным потенциалом. Но на практике идеальные условия, конечно, не достигаются. Более пригодные условия — в океане вдали от суши, где меньше влияние антропогенных и естественных искажающих факторов.

Исторически первыми измерениями, связанными с появлением концепции ГЭЦ, оказались измерения квазистатического электрического поля  $E_z$  на поверхности океана, проводившиеся в начале 20-го века на специальных исследовательских кораблях «Карнеги» и «Мод». Оказалось, что в условиях хорошей погоды электрическое поле обладает вариацией с периодом в одни сутки, форма которой не зависит от места проведения измерений: максимумы и минимумы происходят в одно и то же универсальное время (UT). Этот суточный цикл часто называют кривой Карнеги.

В течение суток электрическая активность в атмосфере «бежит» вслед за дневной областью на Земле, что проявляется в появлении трёх максимумов грозовой активности: в Азии (08:00 UT), в Африке (14:00 UT) и в Америке (20:00 UT). Аналогичным образом ведут себя и источники ГЭЦ постоянного тока (включающие, впрочем, токи зарядки не только в грозовых облаках, но и в других облаках с развитой электрической структурой). Суточный цикл источников ГЭЦ постоянного тока приводит к наличию устойчивого цикла ионосферного потенциала, который, в свою очередь, отражается на динамике приземного поля хорошей погоды  $E_z$ . Таким образом, существование универсальной кривой Карнеги (а также давно отмеченное совпадение её формы с формой графика суточной вариации глобальной грозовой активности) является одним из экспериментальных подтверждений концепции ГЭЦ постоянного тока.

Для анализа ГЭЦ постоянного тока на основе наземных измерений поля  $E_z$  нужно вычленивать из всего массива результатов данные, относящиеся к отрезкам времени, в которые точка наблюдения попадала в область хорошей погоды. Чаще всего для этого приходится довольствоваться не слишком строгими *условиями хорошей погоды*. Они не гарантируют линейную связь приземного поля с ионосферным потенциалом, но статистически приближают к ней. Существуют различные критерии хорошей погоды (в контексте ГЭЦ). Ниже приведён список наиболее часто используемых погодных критериев:

1. **Балл облачности.** 10 баллов — все небо покрыто облаками, 0 баллов — облачность отсутствует полностью. Облака, даже не грозовые, чаще всего несут на себе достаточно большой заряд, поле которого вблизи Земли больше или порядка поля хорошей погоды. Балл облачности должен быть не более 1–2.

2. **Ветер.** Сильный ветер может поднимать до датчика микрочастицы пыли, сажи, которые могут нести на себе заряд, а к достаточно мелким частицам аэрозолей могут прилипать ионы, снижая проводимость воздуха. Ветер должен быть не более 1–3 м/с.
3. **Осадки и грозы.** Может так случиться, что даже при низком балле облачности и почти ясном небе над датчиком окажется небольшое дождевое или даже грозовое облако. Поля, связанные с переносом заряда при разряде молнии, составляют порядка 1–50 кВ/м, что на 3–4 порядка больше поля хорошей погоды. Капли дождя и снега также несут на себе заряд. Осадков, гроз и вообще любых метеоявлений быть не должно.

Даже не очень строгие критерии, применённые к ряду фактической погоды в Нижнем Новгороде, позволяют отобрать для анализа всего 15–25 дней в году.

Кроме погодных критериев, можно ввести критерии на основе значений поля. Их можно рассматривать либо как дополнительные по отношению к погодным критериям, либо как основные, когда данные метеонаблюдений недоступны. Критерии такого рода, например, использовались исследователями при анализе данных антарктических измерений [Burns et al., 2012]. Приводимые ниже критерии отличаются от предложенных в упомянутой работе, но также использовались для анализа антарктических измерений [Slyunyaev et al., 2021]:

1. **Знак поля.** Вспомним, что поле хорошей погоды определяется током хорошей погоды, направленным к Земле от ионосферы. Если ток течёт в обратном направлении — в точке наблюдения плохая погода. Отсюда очевидно, что в условиях хорошей погоды поле должно быть знакопостоянным. Если вертикальная ось  $z$  направлена вниз (из атмосферы к поверхности Земли)<sup>3</sup>, следует наложить условие  $E_z > 0$ .

Надо отметить, что применять критерии непосредственно к исходным данным (с частотой оцифровки в 2–200 Гц, в зависимости от прибора) нельзя, так как даже небольшое локальное искажение (например, мимо датчика пролетела птица либо порывом ветра пронесло облако заряженной пыли) приведёт к нарушению критерия. Чаще всего сначала проводится усреднение данных по периодам длиной 15, 30 или 60 минут. Далее будем полагать, что используется часовое усреднение.

2. **Абсолютный максимум поля.** В условиях хорошей погоды поле составляет порядка 100–130 В/м. Вариация поля хорошей погоды укладывается в диапазон 70%–150% от среднесуточного значения. Таким образом, можно было бы ожидать при отсутствии искажений разброс поля от 70 до 195 В/м. Основываясь на этой оценке, мы можем отсеять заведомо искажённые измерения, ограничившись значениями  $E_z$ , не превышающими 300 В/м. Эта отсечка не является абсолютно истинной и подобрана эмпирически. Итак, в сутках не должно быть ни одного среднечасового значения поля более 300 В/м.
3. **Амплитуда суточной вариации.** Исходя из рассуждений в пункте выше, можно наложить и ограничение на амплитуду суточной вариации:

$$\frac{\max E_z - \min E_z}{\langle E_z \rangle} < 1.5,$$

где максимум  $\max E_z$ , минимум  $\min E_z$  и среднее значение  $\langle E_z \rangle$  вычисляются на основе среднечасовых значений в течение суток.

<sup>3</sup>Следует обратить внимание на то, что в других ситуациях мы обычно направляем ось  $z$  в противоположном направлении.

4. **Непрерывность временного ряда.** При статистическом анализе суточной вариации может возникнуть ситуация, что мы отберем для анализа ряд суток, в которых будет отсутствовать часть среднечасовых значений из-за отключённого оборудования или иных технических проблем. Это приведет к тому, что у нас будет, например,  $N-6$  часов и  $N+9-7$  часов, и дисперсия среднего для 6-х часов окажется больше.

Чтобы не вносить такой дисбаланс, также будем полагать, что в днях хорошей погоды измерения были непрерывны и нам доступны для анализа все 24 среднечасовых значения электрического поля.

## Практические задания

1. Определить дни хорошей погоды для Нижнего Новгорода за 2022 год по погодным критериям, используя архив погоды <https://rp5.ru/>. С архива погоды можно скачать .csv таблицу и обработать данные, написав для этого скрипт на Python, либо отобрать дни хорошей погоды «вручную».
2. Усреднить по часам предоставленный ряд данных нижегородских наблюдений  $E_z$  за 2022 год. Отбросить из рассмотрения данные по суткам, в которых не набралось 24 среднечасовых значения.
3. Построить среднюю суточную вариацию  $E_z$  в Нижнем Новгороде по дням хорошей погоды, отобранным в задании 1. Качественно сравнить форму вариации с классической кривой Карнеги [Harrison, 2013].
- \*4. Используя данные измерений электрического поля  $E_z$  на антарктической станции Восток за 2006–2019 годы ([https://eee.ipfran.ru/files/mjo/vostok\\_hourly\\_from\\_10\\_s\\_without\\_calibration\\_and\\_empty.tsv](https://eee.ipfran.ru/files/mjo/vostok_hourly_from_10_s_without_calibration_and_empty.tsv)), построить среднюю суточную вариацию, используя критерий хорошей погоды на основе значений поля.
- \*5. Построить суточную вариацию по нижегородским наблюдениям  $E_z$  отдельно для рабочих и выходных дней, предварительно исключив дни плохой погоды.

## 2. Изучение шумановских резонансов по данным натуральных наблюдений

Натурное наблюдение шумановских резонансов возможно несколькими способами. Не так часто используются измерения низкочастотного электрического поля  $E_z$  с помощью вертикальной антенны. Такие измерения содержат в себе, кроме «полезного» сигнала шумановских резонансов, большое количество как высокочастотных, так и низкочастотных помех, обеспеченных антропогенными факторами и электрической активностью в атмосфере. Обычно же используются измерения полей  $H_{x,y}$  с помощью индукционных магнитометров.

Индукционный магнитометр в простейшем случае представляет собой катушку из 10–100 тыс. витков, намотанную на ферромагнитный сердечник. Катушка через буферный усилитель подключена к аналого-цифровому преобразователю (АЦП). Для измерения шумановских резонансов характеристик такого простейшего магнитометра оказывается недостаточно: фликкер-шум в цепях усиления, растущий по закону  $1/f^n$  при уменьшении частоты  $f$ , мешает наблюдениям уже первой гармоники шумановских резонансов.

Для устранения проблемы фликкер-шума используют усилители с модуляцией-демодуляцией сигнала (МДМ), сдвигающие фликкер-шум по спектру в область высоких частот. В МДМ-усилителях входной низкочастотный сигнал преобразуется в высокочастотный с помощью модулятора на высокой частоте, а затем с помощью демодулятора сигнал преобразуется обратно в низкочастотный. Применение МДМ приводит к появлению шума на частотах переключения.

Кроме того, большая амплитуда высокочастотных помех приводит к перегрузке входа АЦП и насыщению сердечника. Для устранения этой проблемы реализуется активная фильтрация: добавляется катушка отрицательной обратной связи, на которую подается в противофазе выходной сигнал на частотах помех. Также дополнительные катушки обратной связи иногда используются для создания линейной амплитудно-частотной характеристики в заданном диапазоне частот.

Для снижения высокочастотных помех магнитометры обычно закапываются в землю, что формирует скин-слой относительно хорошо проводящей земли вокруг магнитометров. Однако достаточно интенсивные источники импульсных помех приводят к появлению широкополосного шума, «засветке» спектра. Такими антропогенными источниками шума являются скважинные глубинные насосы, сварочные аппараты, тиристорные регуляторы мощности и т. д. Естественным же источником импульсных помех являются разряды молний ближних гроз.

Основным же источником искажения измерений является антропогенный электромагнитный сигнал на частоте электросети, в России — 50 Гц. Амплитуда гармоники 50 Гц и её субгармоник в достаточных для измерения условиях составляет порядка 100 нТл. При большей амплитуде динамического диапазона большинства магнитометров не хватает; вход АЦП перегружается по амплитуде.

В настоящее время в достаточно чистом от антропогенных помех пункте долговременных наблюдений установлено два магнитометра Vega IMS-008. Предлагается исследовать данные измерений с одного или обоих магнитометров для изучения шумановских резонансов.

## Практические задания

1. Построить спектр шумановских резонансов за время наблюдений, используя предоставленные данные измерений за последнюю неделю (15.11.2023–22.11.2023). Сравнить резонансные частоты с теоретическими [см. [Слюняев, 2023](#), формула (75)].
2. Построить спектрограмму шумановских резонансов за время наблюдений с разными временными окнами: 30 секунд и 5 минут. Использовать перекрытие окон шириной 1/4 окна.
3. Используя данные спектрограммы, изучить суточную динамику частоты и дисперсии частоты первой гармоники шумановского резонанса.
- \*4. Попробовать повторить анализ для второй, третьей и четвёртой гармоник (при их наличии).
- \*5. Сопоставить суточные вариации амплитуды и частоты первой гармоники с суточной вариацией мировой грозовой активности за тот же период. Данные всемирной сети локализации молний WWLLN (World Wide Lightning Location Network) для задания будут предоставлены дополнительно.



### 3. Параметризация ионосферного потенциала в климатической модели

В климатических моделях и моделях прогноза погоды ионосферный потенциал можно параметризовать с помощью формулы, полученной на лекции [см. [Слюняев, 2023](#), формула (25)]:

$$V \propto \sum_i \frac{S_i P_i}{W_i} \left( \exp\left(-\frac{z_i^-}{D}\right) - \exp\left(-\frac{z_i^+}{D}\right) \right) \times \begin{cases} 0, & \varepsilon_i < \varepsilon_0, \\ 1, & \varepsilon_i \geq \varepsilon_0, \end{cases} \quad (1)$$

где сумма берётся по всем ячейкам модельной сетки и для  $i$ -ой ячейки  $S_i$  обозначает площадь поверхности,  $P_i$  — количество конвективных осадков<sup>4</sup>, выпавших за некоторый период времени (порядка 1–2 часов),  $W_i$  — полное количество запасённой влаги в столбе воздуха,  $z_i^-$  и  $z_i^+$  — высоты нижней и верхней границ области смешанной фазы в облаке соответственно,  $\varepsilon_i$  — характерное значение доступной конвективной потенциальной энергии (convective available potential energy, CAPE). Остальные параметры:  $D$  — характерный вертикальный масштаб роста проводимости,  $\varepsilon_0$  — пороговое значение CAPE.

При конкретных вычислениях можно брать в качестве  $P_i$  количество выпавших конвективных осадков за последний час, использовать значения  $D = 6$  км и  $\varepsilon_0 = 1$  кДж/кг, а  $z_i^-$  и  $z_i^+$  отождествить с высотами изотерм  $0^\circ\text{C}$  и  $-38^\circ\text{C}$  соответственно (все эти значения можно изменять в некотором диапазоне).

Мы будем использовать результаты расчётов динамики атмосферы с помощью климатической модели INMCM (Institute of Numerical Mathematics Climate Model) — главной российской климатической модели, разработанной в Институте вычислительной математики РАН под руководством Е. М. Володина. Модель состоит из атмосферного, океанического и аэрозольного блоков; в атмосферном и аэрозольном блоках используется широтно-долготная сетка с разрешением  $1.5^\circ \times 2^\circ$  и 21 уровнем по высоте, тогда как океанический блок имеет пространственное разрешение  $0.5^\circ \times 1^\circ$  при 40 уровнях. Нам будут нужны лишь параметры, относящиеся к атмосферному блоку.

В данном случае мы будем использовать результаты расчёта с помощью модели INMCM десяти лет доиндустриального климата (когда все внешние форсинги устанавливаются как для 1850 года). Разрешение по времени составляет 1 час; каждый час в каждом столбце рассчитываются значения следующих параметров:

- Количество конвективных осадков за предшествующий час ( $P_i$ );
- Количество запасённой влаги ( $W_i$ );
- Высота изотермы  $0^\circ\text{C}$  ( $z_i^-$ );
- Высота изотермы  $-38^\circ\text{C}$  ( $z_i^+$ );
- Значение CAPE для объёма воздуха у поверхности Земли<sup>5</sup> ( $\varepsilon_i$ ).

В формуле (1) отсутствует коэффициент пропорциональности (нет смысла его выписывать, поскольку входящее туда характерное значение тока зарядки в электрически

<sup>4</sup>Конвективные осадки — это часть рассчитываемых в моделях осадков, связанная с конвекцией; они наиболее интенсивны в тропиках, где как раз и сосредоточены основные источники ГЭЦ постоянного тока. Другая часть — неконвективные осадки — не связана с облаками глубокой конвекции и не играет такой же роли для ГЭЦ.

<sup>5</sup>Иногда берут максимальное такое значение по всему столбу воздуха, однако и приземное тоже подходит для оценки.

активных облаках мы всё равно не можем измерить напрямую и можем лишь оценивать по косвенным признакам). Чтобы получить реалистичные значения ионосферного потенциала, нам нужно отнормировать результаты, получаемые по формуле (1), таким образом, чтобы долговременное среднее значение было реалистичным и составляло порядка 240 кВ.

## Практические задания

1. Загрузить предоставленные бинарные файлы с данными по (1) осадкам, (2) запасённой влаге, (3) CAPE, (4) высоте нулевой изотермы, (5) высоте изотермы  $-38^{\circ}\text{C}$ . Для загрузки можно использовать предоставленный пример скрипта на языке Python, модифицировав его. Используя параметризацию ионосферного потенциала, задаваемую формулой (1) выше, рассчитать ненормированный ионосферный потенциал.
2. Отнормировать ионосферный потенциал на 240 кВ и найти нормировочный коэффициент. Построить суточную вариацию рассчитанного ионосферного потенциала. Использовать нормировочный коэффициент при построении всех графиков.
3. Вычислить и построить четыре кривых суточной вариации рассчитанного ионосферного потенциала, сгруппировав данные по временам года.
- \*4. Рассчитать суточный ход вкладов в ионосферный потенциал регионов Африки, Америки, Азии (ограничивая суммирование в формуле (1) на соответствующие ячейки). Регионы можно разграничить приблизительно по долготе, положение границ — по своему усмотрению. Построить суточную вариацию суммарного ионосферного потенциала и вкладов регионов на одном графике. Сравнить с классической кривой Карнеги [Harrison, 2013].
- \*5. Построить среднесуточную картину вкладов в ионосферный потенциал поверх карты мира, используя библиотеку cartopy. Построить аналогичные отдельные карты для CAPE и осадков и сравнить со вкладами в ионосферный потенциал.

## 4. Изучение методов автоматизации эксперимента на примере калибровки измерителя электрического поля Voltek EFM-100

Измеритель электрического поля Voltek EFM-100 (Electric Field Meter) представляет собой электростатический генератор, чувствительные электроды которого перекрываются вращающейся экранирующей секторальной пластиной. Периодическая экранировка внешнего измеряемого квазистатического поля создает на поверхности чувствительных электродов переменное электрическое поле, что приводит к перетеканию индуцированного заряда между электродами и корпусом через входной усилитель.

На выходе усилителя создаётся переменный сигнал, амплитуда которого пропорциональна приложенному внешнему полю. Для преобразования переменного сигнала, центральной частотой которого является частота вращения, к сигналу на исходной частоте, осуществляется синхронное детектирование: «переворачивание» сигнала транзисторным ключом по сигналу с датчика положения ротора и сглаживание полученного униполярного сигнала фильтром низких частот.

Сигнал после фильтрации оцифровывается 12-битным аналого-цифровым преобразователем и передаётся с помощью последовательного протокола на частоте 9600 бит в секунду либо по оптоволоконному кабелю (в старых версиях) либо по витой паре (в новых версиях). С помощью USB-конвертера сигнал может быть заведён в компьютер, причём USB-конвертер является FTDI USB Serial устройством, т. е. создаёт в системе виртуальный последовательный COM-порт.

Boltek EFM-100 является надёжным прибором, пригодным для многолетних измерений квазистатического электрического поля. Он используется на пяти станциях мировой сети GLOCAEM (Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements) [Nicoll et al., 2019; положение станций, используемые приборы и данные наблюдений доступны на сайте <https://glocaem.wordpress.com>].

С 2014 года по настоящее время в Нижнем Новгороде установлены и функционируют 6 измерителей электрического поля Boltek EFM-100.

Несмотря на надёжность, EFM-100 нуждаются в регулярной проверке своих характеристик. Это связано с тем, что происходит загрязнение и деградация поверхности электродов и изоляторов, износ щёток, заземляющих ротор. Предлагается реализовать систему автоматической калибровки EFM-100 с помощью программируемого блока питания Rigol DP823A и специально собранного калибровочного конденсатора.

Для управления блоком питания потребуется минимальное использование команд на языке SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments). Он не является совсем универсальным для любых программируемых устройств. Список команд этого языка производители, как правило, предоставляют для каждого прибора отдельно. В целом можно воспринимать этот язык как программный аналог нажатия кнопок управления на панели прибора. Так, вместо нажатия кнопки AUTOSET на осциллографе можно послать команду :AUTO. При практической работе будет более подробно изучено использование Python и SCPI для работы с Rigol DP823A. В дальнейшем эти знания можно применить для управления почти любым современным осциллографом, векторным анализатором, генератором и т. д.

## Практические задания

1. Под руководством сотрудника лаборатории собрать экспериментальную схему из блока питания, калибровочного конденсатора, измерителя электрического поля и компьютера под управлением операционной системы Linux.
2. Написать подпрограмму чтения данных, передаваемых с измерителя Boltek EFM-100.
3. Написать подпрограмму, управляющую программируемым блоком питания. Для этого потребуется с помощью python-библиотеки pyvisa и языка команд SCPI научиться задавать напряжение на блоке питания.
4. Написать программу, задающую последовательно в цикле напряжения на обкладках конденсатора от 0 до 60 В (т. е. напряжённость поля от 0 до 60 В/м) и в течение пяти секунд на каждой итерации сохраняющую показания с EFM-100.
5. Построить калибровочный график  $E(u)$ , где  $u$  – приложенное на обкладки конденсатора напряжение,  $E$  – средняя за пять секунд напряжённость поля, измеренная EFM-100. Определить коэффициенты линейной регрессии  $E = a \cdot u + b$ .



## Литература

- Burns G. B., Tinsley B. A., Frank-Kamenetsky A. V., Troshichev O. A., French W. J. R., Klekociuk A. R. Monthly diurnal global atmospheric circuit estimates derived from Vostok electric field measurements adjusted for local meteorological and solar wind influences // *J. Atmos. Sci.* V. 69, no. 6. P. 2061–2082. 2012. DOI: [10.1175/JAS-D-11-0212.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0212.1).
- Harrison R. G. The Carnegie curve // *Surv. Geophys.* V. 34, no. 2. P. 209–232. 2013. DOI: [10.1007/s10712-012-9210-2](https://doi.org/10.1007/s10712-012-9210-2).
- Nicoll K. A., Harrison R. G., Barta V., Bor J., Brugge R., Chillingarian A., Chum J., Georgoulas A. K., Guha A., Kourtidis K., Kubicki M., Mareev E., Matthews J., Mkrtchyan H., Odzimek A., Raulin J.-P., Robert D., Silva H. G., Tacza J., Yair Y., Yaniv R. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 184. P. 18–29. 2019. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.01.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.01.003).
- Slyunyaev N. N., Frank-Kamenetsky A. V., Ilin N. V., Sarafanov F. G., Shatalina M. V., Mareev E. A., Price C. G. Electric field measurements in the Antarctic reveal patterns related to the El Niño—Southern Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* V. 48, no. 21. e2021GL095389. 2021. DOI: [10.1029/2021GL095389](https://doi.org/10.1029/2021GL095389).
- Слюняев Н. Н. Глобальная электрическая цепь постоянного и переменного тока. Заметки к лекциям по курсу «Геофизика», ИПФ РАН, 2023. URL: [https://eee.ipfran.ru/files/gec-lectures-2023/GEC\\_lectures.pdf](https://eee.ipfran.ru/files/gec-lectures-2023/GEC_lectures.pdf).