

О возможности применения эффекта Керра для дистанционного зондирования электрических полей грозовых туч

В.Ю. Венедиктов^{1,2}, А.В. Горелая¹, Е.В. Шалымов^{1*}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

² Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 6.06.2014 г.

На сегодняшний день измерения напряженности, а также пространственно-временной структуры электрических полей над грозовыми облаками проводятся с помощью зондов или беспилотных самолетов. Эти методы измерений малоэффективны и весьма затратны. В то же время характеристики электрических полей имеют большое значение для геофизики. Рассматривается возможность применения эффекта Керра для дистанционного зондирования электрических полей.

Ключевые слова: эффект Керра, электрические поля гроз, воздушные потоки; Kerr effect, thunderstorm electric field, air flow.

Введение

Мощные электрические поля вызывают множество атмосферных явлений, таких как спрайты, голубые струи, красные призраки, гигантские струи и т.д. Применяемые на сегодняшний день методы измерений этих полей сильно ограничены. Измерения производятся с помощью зондов или беспилотных самолетов во время их пролета через грозовую тучу или над ней, при этом определяется напряженность поля только вокруг летательного аппарата. Такие измерения не только не позволяют точно оценить общую структуру поля внутри и за пределами облака, но и требуют повышенных материально-технических затрат ввиду жестких условий эксплуатации. Использование дистанционных методов зондирования может решить вышеобозначенные проблемы.

В последнее время перспективным представляется дистанционное зондирование грозовых полей, основанное на генерации высших гармоник или на эффекте Штарка. Эти методы требуют специальных мощных, а главное дорогих искусственных источников излучения.

В настоящей статье рассматриваются недавно предложенный метод дистанционного зондирования электрических полей грозовых облаков с помощью электрически индуцированного двойного лучепреломления (эффекта Керра), изменяющего природную

поляризацию света, рассеянного атмосферой, который проходит вблизи или над грозовыми облаками, а также возможность его практической реализации.

Зондирование электрического поля грозы с помощью эффекта Керра

В 2008 г. была опубликована статья, посвященная дистанционному зондированию электрических полей грозовых туч с помощью эффекта Керра [1]. В ней предлагается новый сравнительно недорогой метод для измерения напряженности такого поля с помощью электрически индуцированного двойного лучепреломления (эффекта Керра), изменяющего природную поляризацию небесного света, проходящего вблизи или над грозовыми облаками, а также показано, что электрические поля гроз вызывают измеримое изменение поляризации на падающий на Землю небесный свет.

Эффект Керра — электрооптический эффект, возникающий при частичном искажении электронной структуры материала электрическим полем. В результате наблюдается различие в показателях преломления для волн, поляризованных параллельно и перпендикулярно приложенному полю (двойное лучепреломление), выраженное в виде

$$\Delta n_K = nKE^2,$$

где n — показатель преломления вещества в отсутствие поля; K — постоянная Керра; E — амплитуда

* Владимир Юрьевич Венедиктов (vlad.venediktov@mail.ru); Алина Владимировна Горелая (gorelayaalina@mail.ru); Егор Вадимович Шалымов (shev1989@yandex.ru).

напряженности электрического поля, кВ/м. Это приводит к сдвигу фазы

$$\varphi_K = \frac{2\pi l \Delta n_K}{\lambda_0},$$

где l — длина пути, км; λ_0 — длина волны в вакууме, нм. Эффект мал в воздухе и прямо пропорционален плотности оптической среды с $K \sim 2,3 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-2}$ на уровне моря [2].

Используя приведенные выше соотношения, можно определить величину φ_K . Для света с длиной волны $\lambda_0 = 500$ нм сдвиг фазы (рад) $\varphi_K \approx 3 \cdot 10^{-9} l E^2 n/n_0$, где n и n_0 — показатель преломления атмосферы в зондируемой области и на уровне моря соответственно [3]. Типичные электрические поля, создаваемые грозовыми облаками, достигают напряженности $E = 100$ кВ/м. Такие поля могут обладать протяженностью порядка 1 км и приводить к номинальному сдвигу фазы $\varphi_{0K} \approx 3 \cdot 10^{-5} n/n_0$ (например, $\varphi_K \approx 10^{-5}$ на высоте 10 км).

Для рассматриваемого метода измерений необходимо использовать источник света со стабильными характеристиками и известным состоянием поляризации. Этим требованиям отвечает солнечный свет, рассеянный атмосферой под углом 90° . В результате рэлеевского рассеяния свет становится частично линейно поляризованным в плоскости, перпендикулярной к падающему свету (рис. 1). Согласно [1] степень линейной поляризации вдоль оси x приближается к 100% (достигает 80–90%). Она уменьшается за счет многократного рассеивания в атмосфере и косвенного освещения.

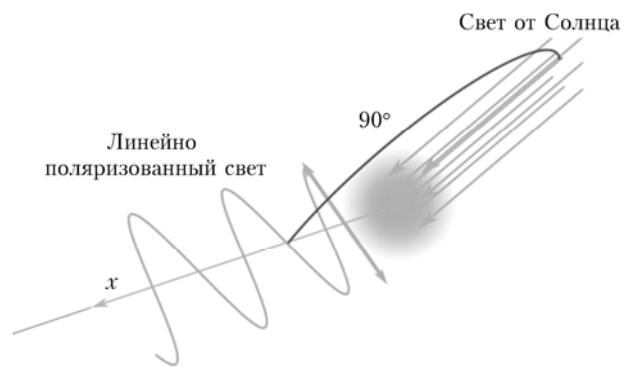


Рис. 1. Рэлеевское рассеяние

Поляризация солнечного света, рассеянного под углом, близким к 90° , изменяется при прохождении вблизи или над грозовыми облаками. Свет, падающий на Землю с неба из областей, граничащих с грозовыми облаками, является частично эллиптически поляризованным. Возможная геометрия измерений показана на рис. 2.

Несмотря на то что в [1] раскрыта сущность метода дистанционного зондирования электрических полей гроз с помощью эффекта Керра, некоторые аспекты не освещены в достаточной мере. Не рассмотрены причины снижения степени линейной поляризации света, рассеянного под прямым углом. Спорным является высказывание о том, что воздушные потоки не вызывают значительного двойного лучепреломления по причине наличия большого градиента скорости ветра только в тонком слое атмосферы вблизи поверхности Земли.

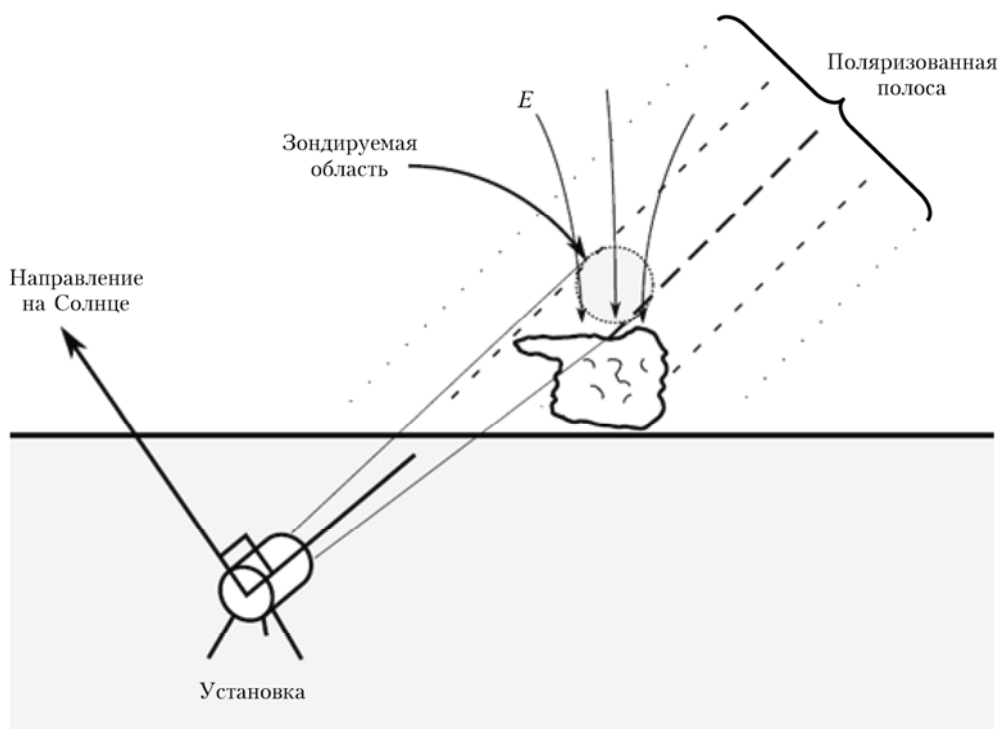


Рис. 2. Геометрия измерений

Причины неполной поляризации

При любых условиях наблюдения (даже при идеальных) измеренная степень поляризации не достигала 100%. Приведем максимальные значения, отмеченные за многолетние периоды систематических измерений в разных точках Советского Союза: в Павловске (под Петербургом) 82%, в Свердловске (Екатеринбурге) 83,7%, в Крыму на г. Ай-Петри 84,7% [4].

Снижение максимальной степени поляризации вызвано рядом причин. Первая — постоянное присутствие в атмосфере аэрозоля, рассеяние на котором уменьшает степень поляризации во всех направлениях и тем сильнее, чем крупнее частицы аэрозоля и чем их больше. Вторая — многократное рассеяние света. Свет, рассеянный многократно, оказывается менее поляризованным по сравнению с однократно рассеянным. Поэтому «добавка» многократного рассеяния в общий поток рассеянного света, идущего из любого направления, снижает степень поляризации. Третья — некоторые особенности в строении молекул основных газов (анизотропия молекул), составляющих воздух, которые снижают степень поляризации примерно на 5%. Также степень линейной поляризации снижается за счет ненулевого углового размера Солнца. В условии решаемой задачи оно не может считаться точечным источником. Если пучок света от центра солнечного диска, рассеиваемый определенной точкой атмосферы под прямым углом, будет полностью линейно поляризован, то пучок света от края солнечного диска, рассеиваемый той же точкой атмосферы по тому же, что и первый, направ-

лению, будет рассеян под углом, несколько отличным от прямого (на половину углового размера Солнца) и не полностью линейно поляризован. Эта причина снижает степень поляризации примерно на 0,3%.

Основная причина снижения уровня линейной поляризации рассеянного света заключается в том, что в атмосфере кроме молекулярного рассеяния присутствует еще и аэрозольное рассеяние на множестве разнообразных по размерам, форме и свойствам крупных частиц. Индикатрисы для молекулярного и аэрозольного рассеяний приведены на рис. 3 (внешние кривые — индикатрисы рассеяния, а внутренние кривые отделяют поляризованный рассеянный свет (заштрихован) от неполяризованного (не заштрихован)).

Рассмотрим сначала зависимость степени поляризации от угла рассеяния (рис. 3, *a*).

Полная поляризация рассеяния света, достигающая 100%, имеет место под углами рассеяния 90° и 270° (весь радиус-вектор лежит в поляризованной части индикатрисы). Под углами рассеяния 0° и 180° степень поляризации равна 0% (весь радиус-вектор лежит в неполяризованной части индикатрисы). В остальных направлениях имеет место частичная поляризация, при которой степень поляризации больше 0, но меньше 100%. При рассеянии на крупных частицах, как это видно из рис. 3, *б–г*, внутренняя кривая всюду разомкнута. Это означает, что нет такого направления, в котором рассеянный свет был бы полностью поляризован. С увеличением размера рассеивающих частиц степень поляризации уменьшается во всех направлениях (уменьшается заштрихованная часть индикатрисы рассеяния).

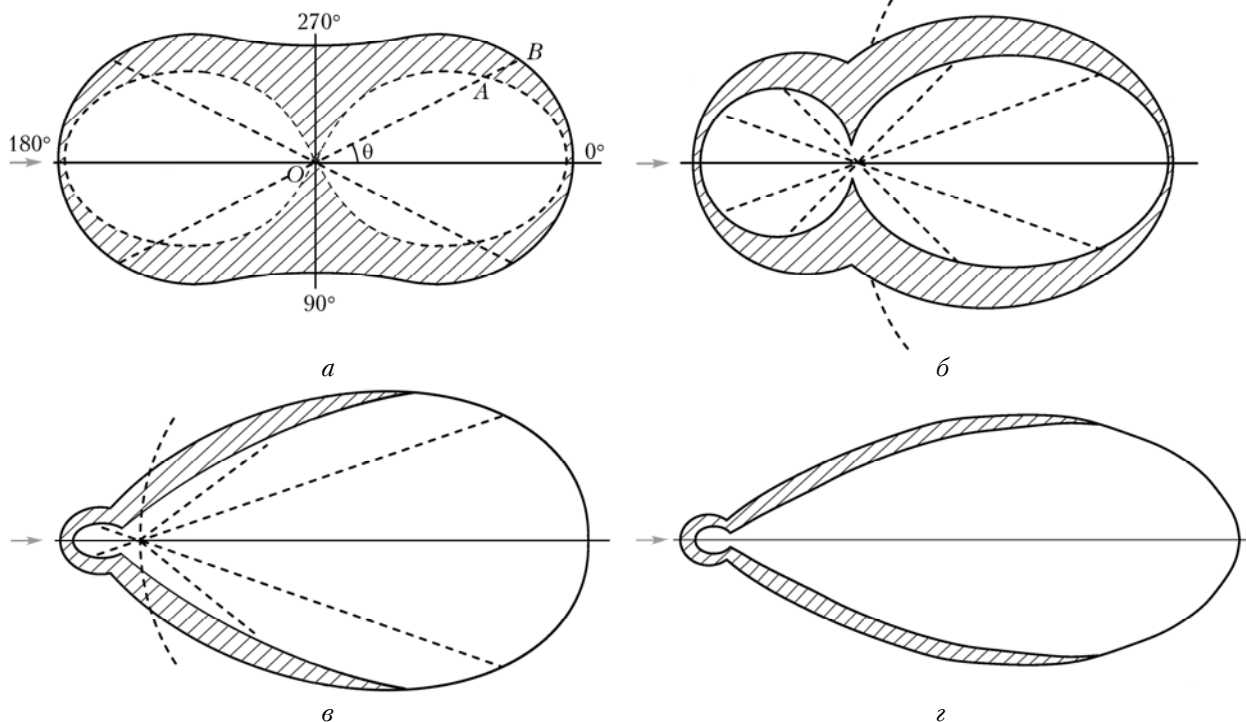


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния: *a* — при молекулярном рассеянии; *б* — для частиц диаметром, равным $1/3\lambda$; *в* — для частиц диаметром λ ; *г* — для частиц диаметром 3λ

Околозенитная область неба характеризуется наибольшей долей линейной поляризации, так как в рассеянии участвует минимальная толща воздуха и, кроме того, в этом направлении воздух более чистый и рассеяние солнечного света наиболее близко к молекулярному. С удалением от зенита увеличиваются толща воздуха, участвующая в рассеянии, и число крупных частиц. Аэрозольное рассеяние становится все более интенсивным. Кроме того, при рассеянии в большой толще воздуха возрастает вклад многократного рассеяния. Доля линейной поляризации уменьшается.

Двойное лучепреломление, вызываемое воздушными потоками

Состояние поляризации света, рассеянного атмосферой, меняется под влиянием сильных воздушных потоков [5]. Существование двойного лучепреломления в потоке газа было экспериментально доказано (подробнее см. в работе [6]). Это явление наблюдают при следующих условиях: в составе газа есть молекулы с анизотропной поляризуемостью (например, линейные молекулы); имеется преимущественная ориентация молекул газа (полной ориентации мешает броуновское движение) и ее деформация, которая возникает под действием аэродинамических сил при относительном смещении прилежащих слоев газа, т.е. при наличии градиента скорости ветра по сечению потока. Указанные условия выполняются в пределах земной атмосферы. Основные компоненты воздуха (N_2 и O_2) являются линейными молекулами. Мощные воздушные потоки создают преимущественную ориентацию молекул и деформируют ее.

Величина двойного лучепреломления, вызванного воздушными потоками, определяется формулой

$$\Delta n_{\text{д}} = \beta G,$$

где β — коэффициент двойного лучепреломления воздушного потока; G — градиент скорости ветра.

Результаты измерений коэффициента β и описание установки для определения его значения представлены в [5] (рис. 4).

Линейно поляризованное излучение лазера L , проходя через пластинку $\lambda/4$, приобретает круговую поляризацию. Циркулярно поляризованное лазерное излучение распространяется по направлению K , параллельно плоской поверхности Земли на высоте 0,5 м и перпендикулярно направлению ветра V . Под действием двойного лучепреломления, вызванного воздушным потоком, свет становится эллиптически поляризованным. Данные о градиенте скорости ветра были собраны с помощью четырех пар анемометров, равномерно распределенных вдоль оптического пути. В каждой паре верхний A_1 и нижний A_2 анемометры были расположены на высоте 0,75 и 0,25 м над Землей соответственно. Направление ветра определяли с помощью специального флюгера. Оканчивается 270-метровая установка эллипсометром \mathcal{E} , с помощью которого определяются поляризационные характеристики (параметры Стокса). В состав эллипсометра входят фазовая пластинка $\lambda/4$, акустооптический модулятор и фотоумножитель.

Согласно экспериментальным данным, полученным авторами [5], значения коэффициента β принадлежат интервалу $3 \cdot 10^{-14} - 5 \cdot 10^{-14}$ с.

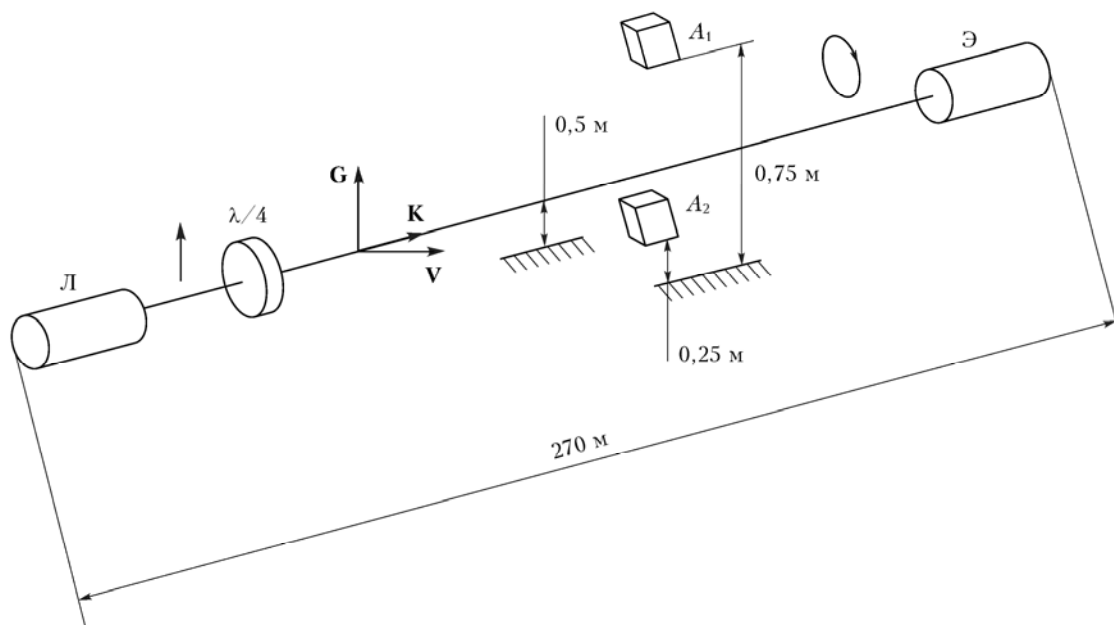


Рис. 4. Схема установки для определения значения коэффициента β

Воздушные потоки, оказывающие влияние на состояние поляризации

Для того чтобы выявить, какие воздушные потоки оказывают влияние на состояние поляризации, необходимо рассмотреть грозовое облако в его максимальной стадии развития.

Максимальная стадия развития начинается по достижении облаком наибольшей высоты после уровня замерзания, как показано на рис. 5 [7].

На этой стадии гроза обычно достигает высоты 10 км, но иногда – более 20 км. Одним из признаков созревшей грозы является образовавшаяся сверху «наковальня». Часто вершина грозовой тучи доходит до струйного течения, тогда она будет двигаться с ним и принимать характерную форму, как показано

на рис. 5. Осадки создают под уровнем замерзания мощный нисходящий поток. Падая, капли объединяются в более крупные. Потоки вниз становятся более мощными и скоростными, чем вверх, дождь и град выпадают на землю. В результате движения воздушных масс вверх и вниз в облаке возникают электрические заряды и бьют грозовые разряды. Под тучей присутствуют восходящие и нисходящие потоки, но первые занимают пространство только на наветренной стороне.

Влияние на поляризацию рассеянного света оказывают воздушные потоки, встречающиеся на его пути. При зондировании электрических полей вблизи грозовых облаков (сбоку) необходимо учитывать нисходящие потоки и атмосферные течения. На состояние поляризации над грозовой областью влияют только атмосферные течения (рис. 6).

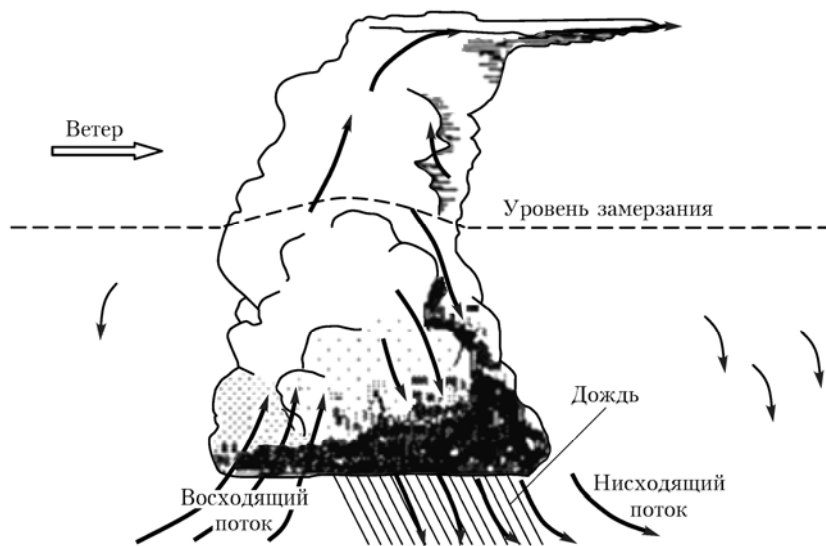


Рис. 5. Стадия максимального развития грозы

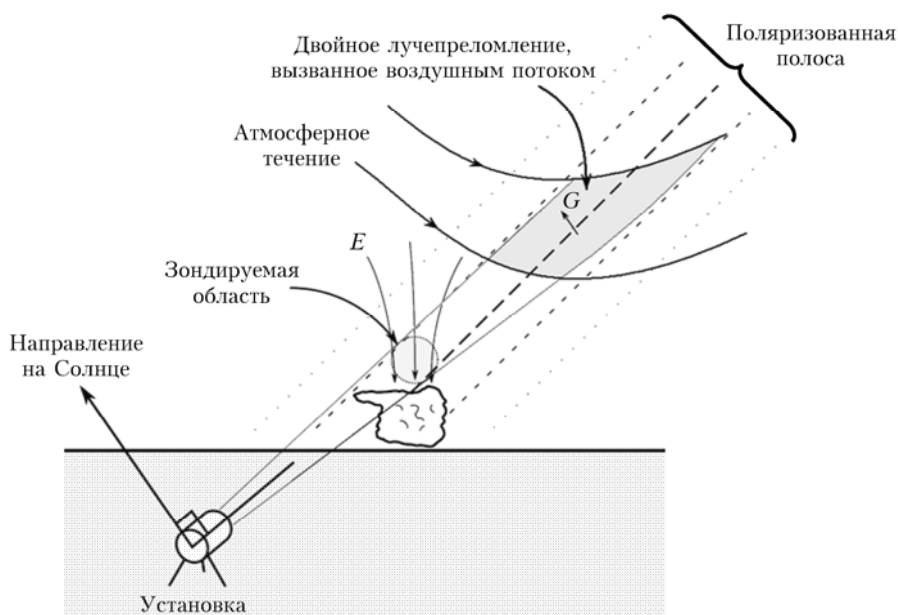


Рис. 6. Воздушные потоки на пути рассеянного света

Согласно определению струйного течения, предложенному аэрологической комиссией Всемирной метеорологической организации в 1957 г., струйное течение — это сильный узкий поток с квазигоризонтальной осью, расположенный в верхней тропосфере или стратосфере, характеризующийся большими вертикальными и боковыми сдвигами ветра с наличием одного или более максимумов скорости ветра. Условно за нижний предел струйного течения принимаются значения скорости около 30 м/с. Струйные течения имеют в длину тысячи километров, сотни в ширину и несколько в толщину. Вертикальный сдвиг ветра составляет 5–10 м/с на 1 км и более, а боковой сдвиг 5 м/с на 100 км. В качестве примера на рис. 7 приведено полярное струйное течение, расположенное на границе холодного и теплого воздуха в умеренной зоне.

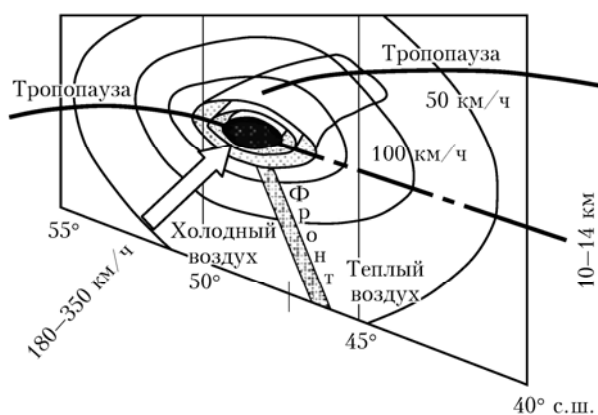


Рис. 7. Полярное атмосферное течение

Используя приведенные выше соотношения, можно определить влияние атмосферного течения (например, полярного) на поляризацию рассеянного света, проходящего через него. При $\beta = 5 \cdot 10^{-14}$ с и $G = 0,01 \text{ с}^{-1}$ величина двойного лучепреломления составит $\Delta n_{\text{п}} \approx 5 \cdot 10^{-16}$. Для света с длиной волны $\lambda_0 = 500 \text{ нм}$ при прохождении через воздушный поток пути длиной $l = 1 \text{ км}$ номинальный сдвиг фазы $\varphi_{0\text{п}} \approx 6 \cdot 10^{-6} n/n_0$ (например, $\varphi_{\text{п}} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ на высоте 10 км). Таким образом, сдвиг фазы, вызванный атмосферным течением, составит приблизительно 20% от сдвига, вызванного эффектом Керра. Кроме того, стоит отметить, что вклад воздушных потоков в величину сдвига фазы может возрасти с увеличением длины пути, по которому свет пересекает поток.

Исходя из вышесказанного, ясно, что влиянием воздушных потоков на поляризацию пренебрегать нельзя. Реализация метода дистанционного зондирования в том виде, в котором он описан в статье [1], представляется маловероятной. Тем не менее модифицировав рассмотренный метод, можно решить поставленную задачу.

Одним из возможных вариантов модификации является реализация двухчастотных или многочастотных измерений, т.е. определение состояний поляризации на различных длинах волн. В этом случае можно алгоритмически исключить из результатов из-

мерений составляющую, вызванную воздушными потоками, так как вклад различных механизмов характеризуется разными дисперсионными соотношениями. Другим вариантом является проведение измерений до и после грозового разряда. В этом случае измерения производятся перед и непосредственно после грозового разряда. После разряда напряженность электрического поля грозовой ячейки резко падает и величина двойного лучепреломления, вызываемая эффектом Керра, становится пренебрежимо малой. Состояние поляризации рассеянного света в этом случае определяется влиянием воздушных потоков. Результаты измерений состояния поляризации после разряда используются для выделения составляющей эффекта Керра из результатов измерений, предшествующих грозовому разряду.

Закключение

Дан анализ возможности применения эффекта Керра для дистанционного зондирования электрических полей гроз. Рассмотрен метод, предложенный в статье [1], ряд положений которой вызвал сомнения. В связи с этим были более подробно рассмотрены механизмы, снижающие степени линейной поляризации рассеянного атмосферой света и двойного лучепреломления, порождаемого воздушными потоками. Приведены ориентировочные вычисления величин сдвигов фаз, вызываемых эффектом Керра при грозе ($\varphi_{\text{к}} \approx 10^{-5}$ рад) и воздушным потоком атмосферного течения ($\varphi_{\text{п}} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ рад). Так как значения сдвигов фаз сравнимы, то нельзя пренебрегать влиянием воздушных потоков на состояние поляризации света, рассеянного атмосферой. Невозможно измерять напряженность электрического поля с помощью метода, предложенного в статье [1]. Однако, модифицировав этот метод, можно исключить влияние градиента скорости ветра.

Выражаем признательность Российскому научному фонду за поддержку в рамках гранта РФФ № 14-19-00693.

1. Carlsonand B.E., Inan U.S. A novel technique for remote sensing of thunderstorm electric fields via the Kerr effect and sky polarization // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L22806. DOI: 10.1029/2008GL035922.
2. Weinheimer A.J. The electrooptical Kerr effect in the atmosphere // J. Atmos. Ocean. Technol. 1985. V. 3, iss. 1. P. 175–178.
3. Kumada A., Iwata A., Ozaki K., Chiba M., Hidaka K. Kerr effect in gas and its application to noncontact measurement of electric field // J. Appl. Phys. 2002. V. 92, N 5. P. 2875–2879.
4. Зверева С.В. В мире солнечного света. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 160 с.
5. Boyer G.R., Lamouroux B., Prade B.S. Atmospheric birefringence under wind speed gradient shear // J. Opt. Soc. Amer. 1978. V. 68, N 4. P. 471–474.
6. Baas F. Streaming birefringence in CO₂ and N₂ // Phys. Lett. A. 1971. V. 36, N 2. P. 107–108.
7. Пэгин Д. Понять небо. Новая Каховка: Изд-во ЧП «Пшел», 1997. 122 с.

V.Yu. Venediktov, A.V. Gorelaya, E.V. Shalymov. **On the possibility of using the Kerr effect for remote sounding of thunderstorm cloud electric fields.**

Today the strength of electric field over the thunderstorm cloud as well as its spatiotemporal structure are measured with the use of either sounding balloons or drones. Such methods are not very efficient and quite expensive. At the same time, the parameters of such electric fields are of a great importance for the geophysics science. The paper considers possible use of the Kerr effect for the remote sounding of electric fields.