

УДК 551.594

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ОБЛАКА НА АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

© 2007 г. В. В. Кузнецов, Н. В. Чернева, И. Ю. Бабаханов

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН**684034 Камчатка, п. Паратунка, ул. Мирная, 7**E-mail: vvk@ikir.kamchatka.ru*

Поступила в редакцию 17.06.2005 г.

Приведены предварительные результаты экспериментов по исследованию влияния на атмосферное электрическое поле (АЭП) искусственного пароводяного облака (ПВО). Эксперименты проводились 12.10.2004 г. на Камчатском месторождении теплоэнергетических вод в районе действующей Мутновской электростанции. Напряженность АЭП измерялась в непосредственной близости от открываемых во время наблюдений законсервированных глубинных геотермальных скважин. Обнаружен эффект понижения напряженности электрического поля в течение существования ПВО. Предложены модели, обсуждаются результаты эксперимента.

1. В октябре 2004 г. авторам этой статьи предлагалась возможность выполнить измерения напряженности атмосферного электрического поля (АЭП) в непосредственной близости от открываемых в момент технологического сброса перегретого водяного пара законсервированных глубинных геотермальных скважин. Предполагалось, что при открытии скважин будет возникать аэрозольное образование типа облака, которое может оказать заметное влияние на АЭП. Такое предположение не лишено смысла, т.к. известно, что облака рассматриваются в качестве дополнительных генераторов, вносящих вклад в создание глобальной разности потенциалов между Землей и ионосферой [1, 2]. Кроме этого, подобный эксперимент мог бы служить проверкой идеи, согласно которой за некоторое время перед землетрясением происходит инъекция заряженных аэрозолей с земной поверхности в атмосферу. По утверждениям авторов работы [3], напряженность электрического поля при этом уменьшается и может даже сменить знак. В наших экспериментах “инъекция” аэрозолей делается искусственно. Целью этих экспериментов по активному воздействию на АЭП была оценка влияния искусственного пароводяного облака (ПВО) на атмосферное электричество. Ставилась задача экспериментально выяснить, что происходит с АЭП во время того, как скважину открывают и затем закрывают, т.е. в те моменты времени, когда облако то появляется, то исчезает. Наблюдения за изменением АЭП вблизи действующих природных источников – гейзеров, вулканических фумарол и пр., лишены этой возможности. В поставленную задачу входило: выяснить полярность заряда, вносимого пароводяным облаком; порядок и знак изменения напря-

женности поля E ; роль мелких, не видимых глазу заряженных водных аэрозолей, увеличение концентрации которых в атмосфере, согласно некоторым моделям, предвещает землетрясение и т.п. Получение ответов на поставленные вопросы в процессе эксперимента поможет пониманию физики АЭП.

В данном сообщении приводятся предварительные экспериментальные результаты по изучению влияния на АЭП искусственно созданного пароводяного облака. Исследования проводились в районе действующей Мутновской электростанции на трех скважинах теплоэнергетических вод – парогидротерм.

2. Мутновское месторождение парогидротерм находится на юго-востоке полуострова Камчатка на высоте 800–900 метров между тремя вулканами (Мутновским, Горелым и Вилючинским) и является подземным источником перегретого водяного пара. Пар с температурой до 175°C образуется при контакте подземных вод с геологическим телом, расположенным в верхней мантии Земли. Геологическое тело, нагретое до температуры, достигающей максимума в 315°C, относится к разряду долгоживущих магматических центров и представляет собой глубинный тепловой очаг. Глубина верхней кромки магматического очага ~5 км, скважины разбурены на глубину 1–2 км. Давление пара на срезе скважины составляет несколько атмосфер, средний дебит геотермальной скважины составляет ~30 кг/с, средняя концентрация пара, содержащегося в пароводяной смеси ~25%.

3. Измерения вертикальной компоненты напряженности АЭП E_z проводились с помощью электрического флюксметра “Градиент М3”, системы оцифровки и записи сигнала на цифровой



Рис. 1. Общий вид экспериментов по созданию пароводяного облака (ПВО) на 1-й (а), 2-й (б) и 3-й (в) скважинах.

носитель. На рис. 1 показан общий вид трех экспериментов по созданию ПВО. При открытии 1-й скважины (рис. 1а) образовался столб пара высотой порядка 15–20 м. Пар сносился ветром, образуя облако объемом до 10^3 м³. Флюксометр устанавливался на земле на расстоянии от 10 до 60 м от скважины в направлении от нее как по ветру, так и против него. Показания прибора фиксировались в течение 10 мин, затем скважина открывалась, и вновь производились измерения в течение еще 10 мин, затем прибор переносился на другое место, где проводились следующие измерения. Полное время наблюдения на каждой из трех исследуемых нами скважин составило около часа. (Как выяснилось при обработке данных и как будет показано ниже, этого времени было недостаточно.) На рис. 2 и 3 приведены записи величины напряженности АЭП: величина E_z до включения первой скважины и начала выхода пара (расход $P_1 \approx 15$ кг/с) изменялась в интервале от 200 до 400 В/м при среднем значении 300 В/м. После открытия скважины значение E_z снизилось (рис. 2а) до 100–200 В/м, т.е. в два раза. Средняя величина падения напряженности поля $\Delta E \approx 150$ В/м, время ее уменьшения $\tau_1 \approx 250$ с. Затем значение E_z несколько возросло, причем быстрее, чем уменьшалось ($\tau_2 \approx 100$ с), до величины, несколько меньшей, чем первоначальное значение E_z (рис. 2б). В дальнейшем происходило медленное возрастание напряженности поля E_z с постоянной времени $\tau_3 \approx 10^3$ – 10^4 с. К сожалению, в связи с ограниченной длительностью эксперимента уточнить эту цифру не было возможности. При открытии второй скважины образовавшееся облако (расход $P_2 \approx 5$ кг/с, рис. 1б и рис. 3) было меньше, чем в первом случае, а изме-

нение величины E_z если и было, то оказалось незначительным. Можно привести только верхние пределы величин: $\Delta E < 50$ В/м, $\tau_1 < 50$ с. Результат, аналогичный первому, был получен при открытии третьей скважины (расход $P_3 \approx 35$ кг/с, рис. 1в и рис. 3). В этом опыте, несмотря на то что расход и скорость истечения пара из скважины не уменьшались со временем, а возрастали, и облако увеличивалось в размерах, в течение $\tau_1 \approx 100$ с наблюдалось уменьшение напряженности АЭП: $\Delta E \approx 250$ В/м. Время частичного восстановления значения E было примерно таким же, как и в первом эксперименте: $\tau_2 \approx 150$ с. Однако, как и на первой скважине, начальной величины напряженности поля достигнуто не было, хотя тенденция к медленному возрастанию напряженности до ее начальной величины сохранилась.

Полученные результаты позволяют ориентировочно оценить скорость убывания напряженности поля dE/dt в момент открытия скважины для двух из трех экспериментов (рис. 2, первый эксперимент и рис. 3, третий эксперимент): в первом $dE/dt \sim 0.6$ В/м с, в третьем $dE/dt \sim 2.5$ В/м с. Во втором эксперименте этот параметр достоверно оценить не представляется возможным. Данные наблюдений приведены в табл. 1.

В результате анализа полученных в эксперименте данных показано, что:

– Во всех экспериментах наблюдается понижение напряженности поля, связанное с величиной водности ПВО и дебитом скважины. Величина ΔE изменялась от эксперимента к эксперименту в при мерном соответствии с расходом пара скважины.

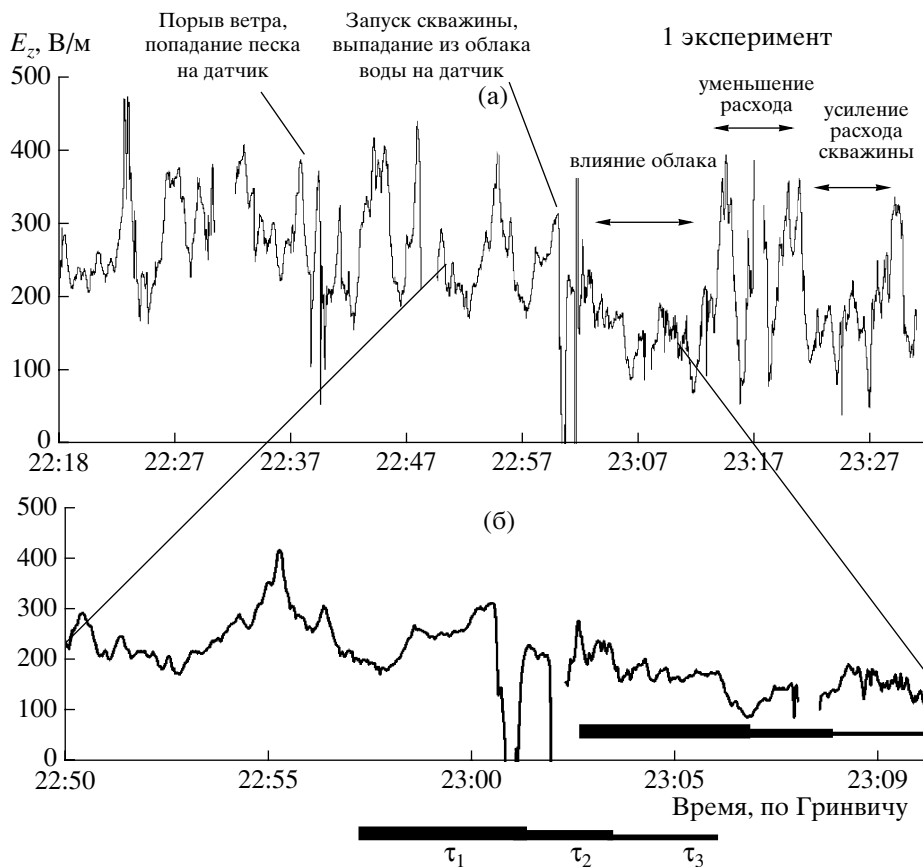


Рис. 2. Временной ход E_z (В/м) на первой скважине (а). Фиксируются моменты образования ПВО, начало понижения E_z ; окончание быстрой релаксации поля; период медленной релаксации (б).



Рис. 3. Временной ход E_z (В/м) на второй и третьей скважинах.

– Характерная скорость быстрого уменьшения напряженности поля пропорциональна расходу пара, в то время как время релаксации, т.е. время частичного увеличения напряженности поля, следующего за периодом ее уменьшения, $\tau_2 \approx 100$ –

200 с, на первой и третьей скважинах не различается так заметно, как время уменьшения.

– Время релаксации поля τ_3 велико и составляет $\sim 10^3$ – 10^4 с. Более точно это время определить не удалось. По нашим оценкам, время релаксации

Таблица 1

№ скважины	Расход кг/с	ΔE , В/м	τ_1 , с	τ_2 , с	τ_3 , с
1	15	150	250	100	>1000
2	5	50	50		
3	35	250	100	150	>1000

не зависит от величины ветра, так как во всех трех экспериментах, проведенных на трех различных скважинах, сила порывов ветра не была одинаковой. Полагая, что это характерное время есть время оседания заряженных аэрозолей с высоты ~ 10 м, можно оценить скорость оседания $v \approx 10^{-3} - 10^{-2}$ м/с, что, в свою очередь, позволяет, пользуясь формулой Стокса, оценить размер аэрозоля: 0,3–1 мкм.

– Параметр dE/dt , возможно, характеризует скорость образования зарядов (в основном, ионов); в этом случае он должен быть связан с принятым в физике ионизированных газов коэффициентом ионообразования q ($\text{м}^{-3} \text{с}^{-1}$).

4. Для получения ориентировочных оценок примем, что расход пара из скважины ~ 20 кг/с. Вместе с паром из скважины выбрасывалось значительное количество воды, для каждой из обследованных скважин точно не известное. Водность искусственного облака M , оцененная визуально, по видимому, сравнима с водностью кучевого облака, для которого принято считать $M \approx 0.1 - 1$ г/м³. За время эксперимента, продолжавшегося на каждой из скважин около получаса, выпало менее 1 мм осадков, что соответствует скорости накопления осадков (интенсивности “дождя”) ≈ 0.5 мм/ч. Такая скорость дождя соответствует мороси. Если оценить скорость выпадения дождя от облака с водностью $M \approx 0.1$ г/м³, то при полной конденсации пара это может дать скорость примерно на порядок меньше. Отсюда следует, что появление “дождя”, скорее всего, связано с наличием в облаке довольно большого количества воды. Расход пара 20 кг/с при выходе из трубы радиусом 10 см обеспечит направленную скорость движения молекул пара ~ 10 м/с и более. При экспериментах на первой скважине порывы ветра со скоростью 10–20 м/с оказывали заметное влияние на форму облака (рис. 1а). Во время проведения экспериментов на третьей скважине скорость выхода пара была значительно больше, чем на первой, так как порывы ветра со скоростью, достигавшей 20 м/с и более, не влияли на форму столба, поднимающегося на высоту более 20 метров (рис. 1в). Выход пара из третьей скважины сопровождался сильным звуком, что также служит подтверждением высокой скорости истечения, возможно, близкой к скорости звука в воздухе. Во всех трех экспериментах водяной пар сносился ветром, формируя

ПВО в виде объемной структуры, высота которой была порядка 10–20 м, а площадь основания составляла $\sim 5 \times 10$ м². На второй скважине запасы пара оказались значительно меньше, чем на первой и третьей. Облако, сформировавшись, быстро распалось после прекращения выхода пара из скважины.

Пар, нагретый до температуры 150°C, при выходе из скважины адиабатически расширялся, охлаждался и конденсировался. Конденсация в таких условиях имеет, очевидно, гетерогенный характер, т.е. происходит на ядрах конденсации, в качестве которых могут быть пылинки и заряженные частицы.

Исследуемые нами искусственные ПВО были белого цвета, характерного для кучево-дождевых облаков (Cb), внешне они также были похожи на кучево-дождевые облака. Размеры капель нашего облака специально не измерялись, но из общих соображений можно предположить, что их размер составляет около 0.08–0.10 мм при значительном количестве более мелких капель размером порядка микрона. Такой вывод можно сделать на основании возникновения в окрестности ПВО радуги [4]. Размер радуги заметно превышал размер облака. Это говорит о том, что объем, занимавший мелким, невидимым водным аэрозолем, значительно превышал размеры видимого облака.

В естественном облаке в восходящем потоке пара капли конденсируются, коагулируют, кристаллизуются и разрушаются. Эти и подобные им процессы приводят к образованию электрических зарядов [5]. Возможно, какие-то из перечисленных явлений имели место и в проведенных экспериментах. Электрические заряды, в принципе, могут образовываться и при турбулентном течении пара по скважине. Эти заряды могут быть центрами конденсации. Так как на аэрозолях, имеющих отрицательные заряды, молекулы воды конденсируются значительно эффективнее, чем на аэрозолях, заряженных положительно, отрицательно заряженные капли растут быстрее и быстрее опускаются на землю, чем положительные, обеспечивая при этом не только объемный электрический заряд в облаке, но и его поляризацию. В результате этого процесса на нижней “кромке” облака может скапливаться отрицательный заряд, на верхней “кромке” – положительный. Эта идея Френкеля [6] применяется иногда в отношении грозового облака [7]. В принципе, она может быть применима и в нашем случае, если возможно заметное разделение зарядов на таком малом промежутке, как 10 метров. Тем не менее мы имеем основание полагать, что образованное искусственное облако обладает электрическим зарядом, несмотря на то, что природа заряда не совсем ясна. Основанием к такому пред-

положению является некоторый опыт, полученный при наблюдениях и регистрации электрического заряда как в искусственных [8], так и в природных аэрозольных образованиях [9–12].

Френкель выражает величину E_z внутри облака через его водность M [6]:

$$E_z = \varepsilon_0 M g \zeta / 6 \pi \eta \sigma_e,$$

где M – водность облака (для грозового облака полагается, что $M \approx 1 \text{ г/м}^3$), g – ускорение свободного падения, ζ – электрокинетический потенциал воды ($\zeta \approx 0.25 \text{ В}$), η – вязкость воздуха ($\eta \approx 10^{-5} \text{ Па с}$), σ_e – электропроводность ($\sigma_e \approx 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$); $E_z \approx 10^4 \text{ В/м}$. Будем использовать эту формулу для оценки величины E , возникающей при разделении зарядов в насыщенной влагой атмосфере “хорошей погоды”. Известно, что в такой атмосфере концентрация молекул “сухого” пара воды $\approx 12 \text{ г/м}^3$. Водность атмосферы (в виде водного аэрозоля) M для $E_z = 100 \text{ В/м}$ должна быть в сто раз меньше, чем в кучевом облаке, т.е. $M = 0.01 \text{ г/м}^3$.

Время частичного восстановления напряженности поля $\tau \sim 100 \text{ с}$ является, по-видимому, характерным временем релаксации электрического заряда ПВО: $\tau = \varepsilon_0 / \sigma$, где ε_0 – диэлектрическая постоянная; σ – проводимость ПВО, значение которой оказывается меньше $10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ (это значение несколько выше, чем проводимость атмосферы хорошей погоды). Такая оценка правомерна, так как, например, в грозовом облаке $t \sim 10 \text{ с}$ ($\sigma \approx 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$), а время релаксации электрического заряда атмосферы $t \sim 1000 \text{ с}$ ($\sigma \approx 10^{-14}$) [7].

5. Основная цель наших исследований состояла в том, чтобы выяснить, образуется ли электрический заряд при формировании ПВО, какова его природа, величина и полярность. Как отмечалось, можно предполагать, что электрический заряд образуется при турбулентном течении пароводяной смеси в трубе, однако правомерна и другая точка зрения, предполагающая, что заряды возникают в атмосфере при формировании ПВО. По мнению авторов, проводивших наблюдения подобных природных пароводяных выбросов, эти выбросы, как правило, несут положительный заряд [9]. Например, как следует из работы [10], фузарольное облако вулкана Азума (Azuma) обладает положительным объемным зарядом с плотностью $\rho \sim 10^{-9} \text{ Кл/м}^3$. В работах [11, 12] также обнаружено присутствие положительного электрического заряда на Карымском вулкане Камчатки с $\rho \sim 10^{-10} \text{ Кл/м}^3$. В этих работах показано, что в моменты выброса из вулкана водяного пара и вулканических газов регистрировались быстрые отрицательные изменения (скачки) напряженности АЭП с амплитудой $\Delta E \approx 20 \text{ В/м}$. Регистрирующий прибор был установлен на расстоянии 3.6 км от вулкана. Автор [11, 12] полагает, что отрицательные изменения напряженности

АЭП связаны с электрическими разрядами между положительно заряженным ПВО и кратером вулкана, хотя упоминания о том, что такие разряды каким-либо образом регистрировались (визуально, по электромагнитному излучению и т.п.), в этой работе нет.

В наших экспериментах также наблюдалось уменьшение величины поля E : $\Delta E \approx 100\text{--}200 \text{ В/м}$. Известно, что при движении тела в турбулентном потоке, содержащем аэрозоль, тело заряжается, т.е. происходит разделение зарядов [13]. Физика этого явления недостаточно ясна, что ставит под сомнение столь однозначное толкование этого эффекта. Проблема физики АЭП в значительной степени состоит именно в том, чтобы выяснить механизм разделения электрических зарядов. Думаем, что если бы разделение зарядов в струе пара было таким простым и эффективным, это давно нашло бы применение в науке и технике. Следует также заметить, что если заряды действительно образуются и разделяются при движении пара по скважине, то в этом можно убедиться, поставив на срезе трубы индукционный датчик и измерив “электрический ток” в трубе. Если эта идея подтвердится, такой способ мог бы быть использован для дистанционного контроля величины расхода и водности пара в скважине.

6. По-видимому, можно попытаться найти объяснение эффекта уменьшения напряженности АЭП с точки зрения механизма разделения зарядов в облаке. Оценим степень влияния электрического поля, возникающего в облаке (E_0), на напряженность измеряемого атмосферного электрического поля E , пользуясь методом отображения Томсона [14], осознавая при этом, что такой подход не совсем применим в нашем случае, когда измерения выполняются вблизи ПВО. Тем не менее, если учесть, что, согласно нашей оценке, величина заряда облака $Q \sim 10^{-7} \text{ Кл}$, расстояние от центра облака до точки измерения $r \sim 10 \text{ м}$, то вклад поля, согласно Томсону, $\Delta E \sim Q / 4 \pi \varepsilon_0 r^2 \sim 100 \text{ В/м}$, что и было определено в наших экспериментах. Полярность поля E_0 – противоположна полярности E , поэтому поле облака приводит к уменьшению напряженности поля E .

7. Как отмечалось, при проведении измерений датчик поля находился на земле, т.е. в области пространства, в котором электрические явления в атмосфере определяются т.н. “электродным эффектом” [15], которым называется совокупность процессов, происходящих в непосредственной близости от электрода, в качестве которого подразумевается хорошо проводящая поверхность земли.

Обычно рассматриваются и обсуждаются три причины внешних возмущений АЭП в связи с электродным эффектом: наличие турбулентности, дополнительных аэрозолей и эманация ра-

диоактивных элементов в месте измерений. Исключим из рассмотрения третью причину, т.к. она не должна влиять на регистрируемые нами вариации АЭП, в то время как первые две причины присутствуют в наших экспериментах и дают свой вклад в АЭП. Турбулентность, как и изменения концентрации аэрозолей, непосредственно связана с образованием ПВО. Известно, что введение в атмосферу некоторого дополнительного количества аэрозолей приводит к увеличению напряженности поля E . Кроме этого, турбулентность приводит к увеличению толщины электродного слоя.

Зафиксированное в наших экспериментах понижение величины E , казалось бы, противоречит сказанному. В действительности это не так при условии, что знак E_0 противоположен знаку E . По-видимому, влияние аэрозоля и турбулентности приводило к увеличению абсолютной величины E_0 , а знак E_0 был противоположен знаку E . Это подтверждает наши предположения о том, что ПВО приводит к образованию заряда Q отрицательной (относительно земли) полярности. Если бы была возможность регистрации поля E на верхней “кромке” ПВО, тогда можно было бы сделать заключение относительно полярности заряда и возможности его разделения в облаке. Проведение таких экспериментов планируется в будущем.

8. Таким образом, полученные в эксперименте результаты находят более или менее правдоподобное объяснение. Наши наблюдения показали, что кроме очевидного влияния видимого облака, состоящего из крупных капель, на атмосферное электрическое поле, на него оказывают влияние и мелкие, невидимые глазом аэрозоли, которые выявлены благодаря большим размерам радуги. Часто в работах по атмосферному электричеству мелкодисперсный аэрозоль не учитывается, что, по-видимому, не всегда верно.

9. Полученный результат следует оценить с точки зрения весьма актуальной задачи использования вариаций атмосферного электричества в целях прогноза землетрясений. В некоторых работах [3] предполагается, что перед землетрясением происходит инжекция заряженных аэрозолей с земной поверхности в атмосферу. По утверждениям ряда авторов, напряженность электрического поля при этом уменьшается по абсолютной величине и может даже сменить знак. В наших экспериментах такая “инжекция” аэрозолей делалась искусственно при формировании ПВО. Для уменьшения напряженности поля до нуля и смены ее знака, по нашим оценкам, выход пара из скважины должен быть, по крайней мере, на порядок больше. Такое масштабное явление, если бы оно действительно происходило перед землетрясением на поверхности Земли, было бы обязательно зафик-

сировано. Эти соображения ставят под сомнение идею связи землетрясений с инжекцией заряженных аэрозолей.

10. Количество и качество наблюдений, описанных в настоящей работе, недостаточны для решения поставленной задачи в полной мере. Однако авторы не имели возможности подготовиться к эксперименту более тщательно. Дело в том, что плановое выключение скважин из технологической схемы геотермальной станции, когда возможно использование их для проведения экспериментов, производится довольно редко и не всегда об этом известно заранее. Посещение Мутновской термальной электростанции весьма проблематично, т.к. путь к ней проходит через два перевала, которые закрыты для проезда большую часть года. Через неделю после проведения наших наблюдений посещение гидротермального поля оказалось невозможным до середины июля следующего года, когда сошел снег. Тем не менее мы полагаем, что проведенные эксперименты и полученные предварительные результаты показали целесообразность продолжения начатой работы.

Авторы благодарят И.И. Черневу за активное участие в проведении эксперимента, О.П. Руленко за обсуждение работы и высказанные замечания, Б.М. Шевцова за интерес к работе и поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М.* Электричество облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 93 с.
2. *Чалмерс Дж. А.* Атмосферное электричество, Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 420 с.
3. *Сорокин В.М., Чмырев В.М., Яценко А.К.* Возмущение электрического поля в слое Земля–ионосфера при инжекции заряженных аэрозолей // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2001. Т. 41. № 2. С. 187–191.
4. *Миннарт М.* Свет и цвет в природе. М.: Наука, 1969. 360 с.
5. *Качурин Л.Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоиздат. 1990. 463 с.
6. *Френкель Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества. М.: ГИТТЛ. 1949. 155 с.
7. *Мучник В.М.* Физика грозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 351 с.
8. *Wilson C.T.R.* Investigation on lighting discharges and on the electric field of thunderstorms // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1920. V. A221. P. 73–115.
9. *Руленко О.П.* Электризация вулканических облаков // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 71–83.
10. *Jshikawa J., Kadana M., Misaki M.* On the charge distribution in volcanic smoke // J. Geomagn. Geoelect. 1951. V. III. N. 1. P. 9–17.

11. Руленко О.П., Токарев П.И., Фирстов П.П. Электричество вулканов // Бюл. вулканол. ст. 1976. № 52. С. 11–17.
12. Руленко О.П. Электрические процессы в парогазовых облаках вулкана Карымского // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245. №. 5. С. 1083–1086.
13. Качурин Л.Г., Бекряев В.И. Исследование процесса электризации кристаллизующейся воды // Докл. АН СССР. 1960. Т. 130. №. 1. С. 57–60.
14. Швейдлер Э. Сохранение электрического заряда Земли. М., Л.: ОНТИ. 1936. 75 с
15. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 122 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ