ОСНОВНЫЕ СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МОРОЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ*

**В. И. Козлов¹, П. М. Нагорский^{2,3},
К. Н. Пустовалов^{2,3}, С. В. Смирнов², А. А. Торопов¹**

¹ Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 31

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 364055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: v.kozlov@ikfia.ysn.ru, npm_sta@mail.ru, const.pv@yandex.ru,
smirnov@imces.ru, toropov@ika.ysn.ru

Рассмотрено влияние сильных понижений температуры в холодный период года, сопровождаемых туманами (смогом), на метеорологическое и атмосферно-электрическое состояние приземного слоя атмосферы на территории Сибири. Выдвинуто предположение о том, что падение напряженности электрического поля и увеличение электропроводности воздуха в приземном слое атмосферы во время сильных и продолжительных морозов обусловлены изменениями агрегатного состояния частиц тумана и формы ледяных кристаллов при температуре ниже -16°C и уменьшением абсолютной влажности воздуха при температуре ниже -35°C .

Ключевые слова: экстремально-низкие температуры, ледяной городской туман, метеорологическая дальность видимости, атмосферное электричество, электропроводность атмосферы

© Козлов В. И. и др., 2019

*Исследование выполнено при частичной поддержке: в ИМКЭС СО РАН – госбюджетная тема IX.135.1 (номер госрегистрации АААА-А17-117013050031-8); в ИКФиА ФИЦ ЯНЦ – госбюджетная тема II.16.2.1 (номер госрегистрации АААА-А17117021450059-3), поддержанная грантом РФФИ 18-45-140028 p_a.

Введение

Электрическое состояние приземного слоя атмосферы во время сильных морозов, а также ледяных туманов (смога), является одним из наименее изученных среди других метеорологических явлений. Сложная взаимосвязь между временными вариациями, с одной стороны, и физическими процессами, с другой, определяет интерес к мониторингу атмосферного электричества как фактора, воздействующего на окружающую среду, так и весьма чувствительного индикатора её состояния. Среди ранее установленных закономерностей вариаций электростатического поля наиболее известные относятся к условиям «хорошей» погоды. В их числе: суточные унитарные вариации, обусловленные изменением заряда Земли в целом; электродный эффект, связанный с накоплением объемных положительных зарядов вблизи земной поверхности; электрооптическое соотношение в атмосферных дымках, состоящее в зависимости напряженности поля от концентрации аэрозольных частиц и ряд других ([1]– [7]).

Менее изученным остается электрическое состояние приземной атмосферы при нарушении условий «хорошей» погоды (во время зимних туманов, городского смога, при снежных и пыльных бурях и т.п.). Такие атмосферные ситуации, трудно прогнозируемые по времени, существенно осложняют натурные исследования в необходимом для однозначной интерпретации объеме. Тем не менее, ряд обнаруженных в последние годы эффектов, связанных с динамикой атмосферного электричества, указывает на необходимость их учета при комплексном мониторинге и моделировании природно-климатических процессов [5], [9]– [14]. В зависимости от размеров и состояния процессы электризации аэрозольных частиц в облачных образованиях, летних туманах, вулканических извержениях, пыльных бурях прямо указывают на существенные отличия вариаций электрического поля в этих условиях по сравнению с условиями «хорошей» погоды [15]– [22]. Исследования взаимных связей метеорологической дальности видимости S_d и напряженности электрического поля E проводились ранее в условиях летних дымов, в дымах лесных пожаров и в зимнем городском смоге [15], [23]– [26]. В результате было установлено, что в летних дымках средней плотности с ростом рассеяния оптического излучения напряженность поля E возрастает, в дымах лесных пожаров с увеличением задымления воздуха напряженность падает, а при понижении температуры и образовании зимнего городского смога, который по уровню концентрации сажевого аэрозоля и угарного газа близок к дыму лесного пожара, зарегистрировано увеличение напряженности электрического поля. Эти результаты указывают как на весьма разнообразные связи, существующими между электрическим состоянием приземной атмосферы и процессами в атмосфере при значительных понижениях температуры, что приводит к образованию зимних городских туманов, так и на необходимость детального изучения этих связей.

Методика проведения эксперимента

Для исследования взаимных связей между метеорологической дальностью видимости, метеорологическими и атмосферно-электрическими величинами во время городских зимних туманов в гг. Томске и Якутске была проведена регистрация в режиме мониторинга вариаций этих величин. Вертикальные профили городских агломераций вдоль широты представлены на рис. 1.

Рис. 1. Высотный профиль вдоль широты городских агломераций. Стрелками обозначены местоположение измерительных пунктов, а цифрами 1, 2 — здания ИМКЭС СО РАН и НИ ТГУ, соответственно

В Томске мониторинг метеорологических величин (атмосферное давление, температура и относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра) проводится с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы (АМИ-ИС) геофизической обсерватории (ГО) ИМКЭС. Помимо стандартных метеопараметров в её состав включены измерители напряжённости электрического поля атмосферы «Поле-2», CS110 и EFS-2/50, полярных электропроводностей $\lambda_{\pm}$ приземной атмосферы «Электропроводность-2». Приходящая солнечная радиация измерялась пиранометром Kipp & Zonen CM-11 и радиометром NILU-UV-6T. Все приборы АМИИС, за исключением флюксметра и анеморумбометра, расположены на площадке на мезонине здания ИМКЭС на высоте 23.6 м (восточная окраина г. Томска). С ноября 2010 г. флюксметр «Поле-2» расположен на выравнивающей потенциал площадке, на высоте 1 м от земной поверхности (ранее он находился на мезонине здания ИМКЭС СО РАН), анеморумбометр — на высоте 30 м. Параллельно, измерения основных метеорологических величин и характеристик турбулентности велись с помощью ультразвуковой метеостанции АМК-03 [27], расположенной на высоте 2 м в непосредственной близости от флюксметра. При помощи АМК-03 регистрировались: абсолютная влажность воздуха; плотность воздуха; скорость вертикального ветра; энергии турбулентных пульсаций и температурных флуктуаций; вертикальные потоки импульса и тепла. В г. Якутск регистрировалась напряженность электрического поля и дважды в сутки проводилось аэрологическое зондирование. Поскольку в г. Томске отсутствует станция аэрологического зондирования, то анализировались данные станций г. Колпашево и г. Новосибирск [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>].

Следует отметить, что как метеостанция г. Якутск, так и флюксметр, расположенный на здании ИКФИА СО РАН, находятся в котловине, пойме реки Лена, в то время как основная часть измерительной аппаратуры ИМКЭС СО РАН расположена в наиболее возвышенной части г. Томска. В условиях, близких к якутским, расположен один из выносных пунктов геофизической обсерватории (ГО): в прибрежной полосе р. Томь, на юго-западной окраине города на крыше учебного корпуса Томского госуниверситета. На этом пункте измерения были начаты осенью 2018 г. В состав измерительной аппаратуры этого комплекса входят АМК-03 и флюксметр.

Измерения метеовеличин были дополнены данными метеостанций гг. Томска и Якутска [<https://rp5.ru/>], а также приборов AVHRR/3 и MODIS на спутниках NOAA-19, Aqua и Terra.

Пример вариаций метеовеличин в приземном слое атмосфере при значительном понижении температуры, приводящей к образованию зимних городских туманов в Восточной Сибири, представлен на рис. 2.

Рис. 2. Временной ход метеовеличин, зарегистрированных в Якутске с 11.12.2010 г. по 20.01.2011 г. Сверху — вниз: градиент потенциала электрического поля $\nabla\phi = -E$, В/м; дальность видимости S_d , км; температура t , °C; относительная влажность f , %

Электрическое поле при пониженных температурах в г. Якутске

Антициклонический режим погоды, свойственный ему застой холодного воздуха и экстремально низкие температуры стимулируют образование длительных ледя-

ных туманов, которые, при дальности видимости менее 50 м, характеризуются как опасное метеоявление. Такая ситуация свойственна как Западной, так и Восточной Сибири.

Обработка данных аэрологического зондирования показала, что при понижении температуры до -30°C и ниже высота области температурной инверсии составляет не менее 2 км. Вследствие температурной инверсии из приземного слоя атмосферы происходит практически полное удаление влаги и регистрируется значительное увеличение концентрации аэрозоля. В населенных пунктах из-за дополнительного поступления в атмосферу аэрозольных частиц и влаги в результате сжигания топлива отопительными системами и автомобилями частота появления зимних туманов при понижении температуры возрастает. Поэтому, кроме уменьшения дальности видимости, во время сильного понижения температуры и образования зимних ледяных туманов ухудшается качество городского воздуха из-за повышения концентрации загрязняющих веществ и примесей.

Анализ данных, полученных в Восточной Сибири

В условиях «хорошей» погоды спектр колебаний поля E в двойном логарифмическом масштабе, согласно [28], можно разделить по периодам на три участка: горизонтальный, связанный с белым шумом, который обусловлен броуновским движением легких ионов (верхняя граница не превосходит единиц-десятков секунд); линейного роста, связанный с турбулентным перемешиванием, и участок, связанный с насыщением, нижняя граница периодов которого находится вблизи или превосходит 30 мин (рис. 3а и 3с).

Рис. 3. Спектры колебаний электростатического поля до (а), во время (б) и после понижения температуры и появления зимнего ледяного тумана (в). Дата, время, отнесенное к центру анализируемого интервала, и интервал спектрального анализа (8 ч) указаны над каждой панелью. Полоса спектрального анализа: 10 с — 3 ч

Как следует из рис. 3, на котором представлены типичные спектры до (а), во время (б) и после (в) ледяных туманов, верхняя граница диапазона периодов электростатических шумов (белый шум) возрастает на один-два порядка и составляет

не менее 30-90 минут. Нижняя граница участка спектра, связанного с насыщением, также возрастает и может достигать до десятков — сотен мин (рис. 3б).

Эволюция спектров электростатических колебаний для одного из длительных периодов морозной погоды, появления ледяного тумана и его исчезновения представлена на рис. 4а (с 12 ч 5 января до 12 ч 17 января 2011 г.).

Рис. 4. Динамика спектра колебаний электрического поля $\lg(\nabla\phi(t))$ (а) и его наклона (б) при понижении температуры до экстремально низких значений

На этом же рис. 4(б) представлена частотно-временная динамика тангенса угла наклона спектра в двойном логарифмическом масштабе. Построенная поверхность, в данном случае, является аналогом регрессионной поверхности, поскольку составлена из вычисленных локальных производных. Правая панель наглядно показывает как изменяется локальный наклон спектра электростатических колебаний, обусловленный движением легких ионов как пассивной примеси в нейтральном газе, во время сильных морозов в процессе формирования ледяного тумана и при его распаде.

Обращает на себя внимание следующее. При экстремально низких температурах спектр электростатических колебаний в полосе периодов от единиц секунд до десятков мин представляет собой типичный белый шум, что свидетельствует об многократном увеличении вязкости воздуха приземной атмосферы и практически полном подавлении турбулентности.

Другой отличительной чертой поведения напряженности электрического поля, иллюстрируемой рис. 5, является то, что при понижении температуры, уменьшении относительной влажности или метеорологической дальности видимости средняя величина поля E стремится к значению ~ 60 В/м, а неизбежный разброс значений поля — также убывает.

Регрессионные зависимости для градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi = -E$) имеют следующий вид:

- от метеорологической дальности видимости: $\nabla\phi$ [В/м] = $0.29 * S_d$ [км] + 62;
- от температуры приземной атмосферы: $\nabla\phi$ [В/м] = $0.76 * t$ [°C] + 93;

Рис. 5. Зависимость градиента потенциала электрического поля от метеорологической дальности видимости (а), температуры воздуха (б) и относительной влажности (в). Кружки – усредненные на часовом интервале значения $\nabla\phi$, кривые – линии регрессии. Обработаны ежесекундные данные с 10.12.2010 по 30.01.2012 г.

— от относительной влажности: $\nabla\phi$ [В/м] = $1.1 * f[\%] - 15$.

Полученные результаты находятся в явном противоречии с выводами, представленными в [9] и [15]. Между $\nabla\phi$ и S_d в нашем случае наблюдается прямо пропорциональная зависимость, в то время как в [9] и [15] — обратно пропорциональная. Кроме того, в этих работах был сделан следующий вывод. Падение температуры сопровождается уменьшением S_d и увеличением $\nabla\phi$. Одним из важнейших механизмов, приводящих к изменчивости электрического поля, является изменение числа легких ионов. Поэтому повышение концентрации атмосферного аэрозоля во время сильных морозов из-за сопровождающих их ледяных туманов приводит к появлению канала усиленного стока легких ионов на аэрозоль. Уменьшение концентрации легких ионов при их стоке на аэрозоль приводит к соответствующему уменьшению электропроводности воздуха и, следовательно, к росту напряженности электрического поля.

Таким образом, согласно [9] и [15], падение температуры и образование ледяной дымки (тумана) приводит к росту градиента потенциала электрического поля, что, как уже отмечено выше, находится в явном противоречии с нашими результатами: при понижении температуры и уменьшении S_d среднее значение $\nabla\phi$ также уменьшается и при $t \sim -40$ °C приближается к ~ 60 В/м.

Эволюция атмосферно-электрических величин при сильных морозах на юге Западной Сибири

Экспериментальные данные в г. Якутске были получены в диапазоне температур от $-15 \div 20$ до $-40 \div 50$ °С, в то время как данные, анализируемые в [9], [15], зарегистрированы при температурах не ниже $-20 \div 25$ °С. Зависимость напряженности поля от температуры в [9] и [15] не анализировалась, а основное внимание было уделено изучению процессов рассеяния оптических волн видимого диапазона, позволяющих оценить связь замутнения атмосферы при образовании городского ледяного тумана (смога) с напряженностью поля.

Для анализа зависимости напряженности поля от температуры атмосферы из данных мониторинга метеорологических и атмосферно-электрических величин, зарегистрированных в ГО ИМСКЭС СО РАН, были отобраны такие временные интервалы, в которых диапазон изменения отрицательных температур включал в себя диапазоны изменения температур, зарегистрированных как во время экспериментов в г. Томске ([9], [15]), так и в г. Якутске. Поскольку напряженность поля зависит от полярных электропроводностей атмосферы, при выборе интервалов для обработки это также учитывалось. Всего с 2008 по 2019 гг. практически непрерывных наблюдений было отобрано 3 интервала:

- 1) с 29.11.2008 г. по 08.12.2008 г.;
- 2) с 10.01.2012 г. по 07.02.2012 г.;
- 3) с 13.01.2016 г. по 23.01.2016 г.

Предварительный анализ данных показал, что при понижении температуры до ~ -20 °С напряженность поля растет. При дальнейшем понижении температуры E начинает плавно уменьшаться. Противоположным образом ведут себя полярные электропроводности: до $t \sim -20$ °С они уменьшаются, а при больших падениях температуры – начинают расти. Результаты обработки отобранных данных представлены на рис. 6 и 7.

При обработке данные усреднялись на интервале ± 1 ч от текущего момента времени. Сдвиг по времени составлял 1 ч.

Достаточно плавный переход от роста к спаду значений поля при понижении температуры и обратная картина для полярных электропроводностей позволил аппроксимировать данные регрессионными кривыми второго порядка. Они представлены на этих рисунках штриховыми и сплошными линиями. Рассчитанные по коэффициентам уравнения регрессии экстремальные значения градиента потенциала электрического поля ($\nabla \phi$) и проводимостей $\lambda_{\pm}$ сведены в табл.

Рис. 6. Зависимость градиента потенциала электрического поля от температуры воздуха (а, б, в) и относительной влажности (г, д, е) по данным за 2008 (а, г), 2012 (б, д) и 2016 (в, е) гг. На рисунке: квадратики — усреднённые значения поля (2-х часовой интервал); штриховые кривые — линии регрессии второго порядка

Рис. 7. Зависимость полярных электропроводностей от температуры воздуха (а, б, в) и относительной влажности (г, д, е) по данным за 2008 (а, г), 2012 (б, д) и 2016 (в, е) гг. На рисунке: квадратики и крестики — значения полярных электропроводностей, усреднённые на 2-х часовом интервале; штриховые и сплошные кривые — линии регрессии второго порядка

Таблица

Значения экстремумов квадратичной регрессии

	$t, ^\circ\text{C}$				$f, \%$			
	2008 г.	2012 г.	2016 г.	Среднее	2008 г.	2012 г.	2016 г.	Среднее
$\nabla\phi$	-25.8	-27.3	-20.8	-24.6	82.5	74.4	85.7	80.9
λ_+	нет данных	-17.1	-17.7	-17.4	нет данных	80.8	79.0	79.9
λ_-	не оценивался	-22.0	-21.87	-22.0	78.4	77.7	77.7	77.9

На основании данных табл. можно сделать вывод о том, что результаты, полученные в [9] и [15] справедливы до температур не ниже $-15 \div -20 ^\circ\text{C}$. При дальнейшем понижении температуры рост поля E сменяется падением. Для полярных проводимостей $\lambda \pm$ наблюдается обратная картина.

Заключение

Причиной такого поведения электрических параметров приземного слоя атмосферы является, по-видимому, то, что при температурах $-15 ^\circ\text{C}$ и ниже смешанная и жидко-капельная фракции городского тумана (смога) замещаются кристаллической или ледяной фракцией, имеющей другие размеры и концентрацию. При понижении температуры до $-39 ^\circ\text{C}$ и ниже стабилизирующее влияние на падение напряженности поля может оказывать "спонтанное обезвоживание" приземной атмосферы (снижение абсолютной влажности воздуха практически до нуля).

Список литературы/References

- [1] Чалмерс Дж., *Атмосферное электричество*, Гидрометеиздат, Ленинград, 1974, 316 с. [Chalmers Dzh., *Atmosfernoye elektrichestvo*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 1974, 316 pp., (in Russian)].
- [2] Седунов Ю. С. и др., *Атмосфера. Справочник.*, Гидрометеиздат, Ленинград, 1991, 509 с. [Sedunov YU. S. i dr., *Atmosfera. Spravochnik.*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 1991, 509 pp., (in Russian)].
- [3] Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М., *Теория электродного эффекта в атмосфере*, Изд-во ТРТУ, Таганрог, 1998, 123 с. [Kupovykh G. V., Morozov V. N., Shvarts YA. M., *Teoriya elektrodnogo effekta v atmosfere*, Izd-vo TRTU, Taganrog, 1998, 123 pp., (in Russian)].
- [4] Анисимов С. В., Мареев Е. А., "Геофизические исследования глобальной электрической сети", *Физика Земли*, 2008, № 10, 8–18. [Anisimov S. V., Mareyev Ye. A., "Geofizicheskiye issledovaniya global'noy elektricheskoy seti", *Fizika Zemli*, 2008, № 10, 8–18, (in Russian)].
- [5] Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Нагорский П. М., Самохвалов И. В., *Электрооптические явления в атмосфере*, Изд-во НТЛ, Томск, 2015, 316 с. [Donchenko V. A., Kabanov M. V., Kaul' B. V., Nagorskiy P. M., Samokhvalov I. V., *Elektroopticheskiye yavleniya v atmosfere*, Izd-vo NTL, Tomsk, 2015, 316 pp., (in Russian)].
- [6] Mareev E. A. et al., "Russian studies of atmospheric electricity in 2011–2014", *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **52:2** (2016), 154–164.

- [7] Bennett A. J., Harrison R. G., "Atmospheric Electricity in Different Weather conditions", *Weather*, **62** (2007), 277–283.
- [8] Williams E., Mareev E., "Recent progress on the global electrical circuit", *Atmospheric Research*, **135** (2014), 208–227.
- [9] Пхалагов Ю. А. и др., "Исследования изменчивости и взаимосвязи оптических и электрических характеристик приземной атмосферы в зимних условиях", *Оптика атмосферы и океана*, **24:4** (2011), 269–274. [Pkhlagov YU. A. i dr., "Issledovaniya izmenchivosti i vzaimosvyazi opticheskikh i elektricheskikh kharakteristik prizemnoy atmosfery v zimnikh usloviyakh", *Optika atmosfery i okeana*, **24:4** (2011), 269–274, (in Russian)].
- [10] Ippolitov I. I. et al., "Diurnal variations in the electrical field intensity under smoke from forest fires", *Doklady Earth Sciences*, **453** (2013), 1137–1140.
- [11] Tinsley B. A., "On the variability of the stratospheric column resistance in the global electric circuit", *Atmospheric Research*, **76** (2005), 78–94.
- [12] Kozlov V. I. et al., "Anomalous behavior of the electric field of the atmosphere at the extremely low winter temperatures", *Proceedings of SPIE*, **10833** (2018), 108338O–1–108338O-4.
- [13] Абанников В. Н., "Анализ условий, формирующих режим зимних туманов в г. Якутске", *Евразийский Союз Ученых*, 2018, № 4-4(49), 4–10. [Abannikov V. N., "Analiz usloviy, formiruyushchikh rezhim zimnikh tumanov v g. Yakutske", *Yevraziyskiy Soyuz Uchenykh*, 2018, № 4-4(49), 4–10, (in Russian)].
- [14] Фирстов П. П. и др., "Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона", *Вестник Краунц. Серия науки о Земле*, **1:7** (2006), 102–109. [Firstov P. P. i dr., "Podpochvennyy radon i napryazhennost' elektricheskogo polya atmosfery v rayone Petropavlovsk - Kamchatskogo geodinamicheskogo poligona", *Vestnik Kraunts. Seriya nauki o Zemle*, **1:7** (2006), 102–109, (in Russian)].
- [15] Пхалагов Ю. А. и др., "Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля", *Оптика атмосферы и океана*, **22:1** (2009), 25–30. [Pkhlagov YU. A. i dr., "Svyaz anomal'nykh atmosferynykh usloviy s izmenchivost'yu elektricheskogo polya", *Optika atmosfery i okeana*, **22:1** (2009), 25–30, (in Russian)].
- [16] Smirnov V. V., "Electrization of Aerosol Wetted in Bipolarly Ionized Air", *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **4:3** (2010), 294–303.
- [17] Leblanc F. et al., *Planetary Atmospheric Electricity*, Springer, Dordrecht, Boston, London, 2008, 532 с.
- [18] Адушкин В. В., Соловьёв С. П., Спивак А. А., *Электрические поля техногенных и природных процессов*, ГЕОС, Москва, 2018, 459 с. [Adushkin V. V., Solov'yov S. P., Spivak A. A., *Elektricheskiye polya tekhnogennykh i prirodnnykh protsessov*, GEOS, Moskva, 2018, 459 pp., (in Russian)].
- [19] Firstov P. P. et al., "Electrification of Eruptive Plumes Discharged by Shiveluch Volcano in Relation to the Character of the Responsible Explosion", *Journal of Volcanology and Seismology*, **13:3** (2019), 172–184.
- [20] Sow M. et al., "Electrification of particles in dust storms: Field measurements during the monsoon period in Niger", *Atmospheric Research*, **102** (2011), 343–350.
- [21] Gorchakova I. A., Mokhov I. I., Rublev A. N., "Radiation and temperature effects of the intensive injection of dust aerosol into the atmosphere", *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **51:2** (2015), 113–126.
- [22] Katz S. et al., "Electrical properties of the 8–12th September, 2015 massive dust outbreak over the Levant", *Atmospheric Research*, **201** (2018), 218–225.
- [23] Красногорская Н. В., *Электричество нижних слоёв атмосферы и методы его измерения*, Гидрометеиздат, Ленинград, 1972, 323 с. [Krasnogorskaya N. V., *Elektrichestvo nizhnikh sloyov atmosfery i metody yego izmereniya*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 1972, 323 pp., (in Russian)].
- [24] Мак-Кормак Б., Селиги Т., *Солнечно-земные связи, погода и климат*, Мир, Москва, 1982, 382 с. [Mak-Kormak B., Seligi T., *Solnechno-zemnyye svyazi, pogoda i klimat*, Mir, Moskva, 1982, 382 pp., (in Russian)].

- [25] Шулейкин В. Н., *Атмосферное электричество и физика Земли*, ООО «ФЭД», Москва, 2006, 159 с. [Shuleykin V. N., *Atmosfernoye elektrichestvo i fizika Zemli*, ООО «FED», Moskva, 2006, 159 pp., (in Russian)].
- [26] Анисимов С. В., Мареев Е. А., “Аэроэлектрические структуры в атмосфере”, *Доклады академии наук*, **37**:1 (2000), 101–104. [Anisimov S. V., Mareyev Ye. A., “Aeroelektricheskiye struktury v atmosfere”, *Doklady akademii nauk*, **37**:1 (2000), 101–104, (in Russian)].
- [27] Азбукин А.А. и др., “Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03”, *Метеорология и гидрология*, 2006, № 11, 89–97. [Azbukin A.A. i dr., “Avtomatizirovanny ul'trazvukovoy meteorologicheskiy kompleks АМК-03”, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2006, № 11, 89–97, (in Russian)].
- [28] Анисимов С. В. и др., “Механизмы формирования пульсаций электрического поля приземной атмосферы”, *Изв. ВУЗов Радиофизика*, **44**:7 (2001), 8–18. [Anisimov S. V. i dr., “Mekhanizmy formirovaniya pul'satsiy elektricheskogo polya prizemnoy atmosfery”, *Izv. VUZov Radiofizika*, **44**:7 (2001), 8–18, (in Russian)].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 316 с.
- [2] Седунов Ю. С. и др. Атмосфера. Справочник. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
- [3] Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
- [4] Анисимов С. В., Мареев Е. А. Геофизические исследования глобальной электрической сети // *Физика Земли*. 2008. №10. С. 8–18.
- [5] Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Нагорский П. М., Самохвалов И. В. Электрооптические явления в атмосфере. Томск: Изд-во НТЛ, 2015. 316 с.
- [6] Mareev E. A. et al. Russian studies of atmospheric electricity in 2011–2014 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. vol. 52. no. 2. pp. 154–164.
- [7] Bennett A. J., Harrison R. G. Atmospheric Electricity in Different Weather conditions // *Weather*. 2007. vol. 62. pp. 277–283.
- [8] Williams E., Mareev E. Recent progress on the global electrical circuit // *Atmospheric Research*. 2014. vol. 135. pp. 208–227.
- [9] Пхалагов Ю. А. и др. Исследования изменчивости и взаимосвязи оптических и электрических характеристик приземной атмосферы в зимних условиях // *Оптика атмосферы и океана*. 2011. Т. 24. №4. С. 269–274.
- [10] Ippolitov I. I. et al. Diurnal variations in the electrical field intensity under smoke from forest fires // *Doklady Earth Sciences*. 2013. vol. 453. pp. 1137–1140.
- [11] Tinsley B. A. On the variability of the stratospheric column resistance in the global electric circuit // *Atmospheric Research*. 2005. vol. 76. pp. 78–94.
- [12] Kozlov V. I. et al. Anomalous behavior of the electric field of the atmosphere at the extremely low winter temperatures // *Proceedings of SPIE*. 2018. 10833. 108338O-1–108338O-4
- [13] Абанников В. Н. Анализ условий, формирующих режим зимних туманов в г. Якутске Евразийский Союз Ученых. 2018. №4-4(49). С. 4–10.
- [14] Фирстов П. П. и др. Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона // *Вестник Краунц. Серия науки о Земле*. 2006. №1(7). С. 102–109.
- [15] Пхалагов Ю. А. и др. Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22. №1. С. 25–30.
- [16] Smirnov V. V. Electrization of Aerosol Wetted in Bipolarly Ionized Air // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2010. vol. 4. no. 3. pp. 294–303.

- [17] Leblanc F. et al. Planetary Atmospheric Electricity. Dordrecht, Boston, London: Springer, 2008. 532 с.
- [18] Адушкин В. В., Соловьёв С. П., Спивак А. А. Электрические поля техногенных и природных процессов. М.: ГЕОС, 2018. 459 с.
- [19] Firstov P. P. et al. Electrification of Eruptive Plumes Discharged by Shiveluch Volcano in Relation to the Character of the Responsible Explosion // Journal of Volcanology and Seismology. 2019. vol. 13. no. 3. pp. 172–184.
- [20] Sow M. et al. Electrification of particles in dust storms: Field measurements during the monsoon period in Niger // Atmospheric Research. 2011. vol. 102. pp. 343–350.
- [21] Gorchakova I. A., Mokhov I. I., Rublev A. N. Radiation and temperature effects of the intensive injection of dust aerosol into the atmosphere // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. vol. 51. no. 2. pp. 113–126.
- [22] Katz S. et al. Electrical properties of the 8–12th September, 2015 massive dust outbreak over the Levant // Atmospheric Research. 2018. vol. 201. pp. 218–225.
- [23] Красногорская Н. В. Электричество нижних слоёв атмосферы и методы его измерения. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. 323 с.
- [24] Мак-Кормак Б., Селиги Т. Солнечно-земные связи, погода и климат. Москва: Мир, 1982. 382 с.
- [25] Шулейкин В. Н. Атмосферное электричество и физика Земли. Москва: ООО «ФЭД», 2006. 159 с.
- [26] Анисимов С. В., Мареев Е. А. Аэроэлектрические структуры в атмосфере // Доклады академии наук. 2000. Т. 37. №1. С. 101–104.
- [27] Азбукин А.А. и др. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорология и гидрология. 2006. №11. С. 89–97.
- [28] Анисимов С. В. и др. Механизмы формирования пульсаций электрического поля приземной атмосферы // Изв. ВУЗов Радиофизика. 2001. Т. 44. №7. С. 8–18.

Для цитирования: Козлов В.И., Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В., Торопов А.А. Основные сценарии развития вариаций атмосферно-электрических величин в приземной атмосфере во время сильных морозов на территории Сибири // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2019. Т. 29. № 4. С. 135-148. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-135-148

For citation: Kozlov V. I., Nagorskiy P. M., Pustovalov K. N., Smirnov S. V., Toropov A. A. The main scenarios for the development of atmospheric-electric variations in the surface atmosphere during severe frosts in Siberia, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2019, **29**: 4, 135-148. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-135-148

Поступила в редакцию / Original article submitted: 15.11.2019

DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-135-148

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT

MSC 86A10

THE MAIN SCENARIOS FOR THE DEVELOPMENT OF ATMOSPHERIC-ELECTRIC VARIATIONS IN THE SURFACE ATMOSPHERE DURING SEVERE FROSTS IN SIBERIA¹

**V. I. Kozlov¹, P. M. Nagorskiy^{2,3}, K. N. Pustovalov^{2,3},
S. V. Smirnov², A. A. Toropov¹**

¹ Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, 677980, Yakutsk, Lenin ave., 36, Russia

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 364055, Tomsk, Academicheskoy ave., 10/3, Russia

³ National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk, Lenin ave., 36, Russia

E-mail: v.kozlov@ikfia.ysn.ru, npm_sta@mail.ru, const.pv@yandex.ru,
smirnov@imces.ru, toropov@ika.ysn.ru

The influence of strong temperature drops in the cold season, which are accompanying by fogs (smogs), on the meteorological and atmospheric-electric state of the atmosphere surface layer in Siberia was considered. The assumption that a decrease in the electric field strength and an increase in the air electrical conductivity in the atmosphere surface layer during the heavy and long frosts are caused by the changes of fog particles phase state and ice crystals shape at temperature less -16°C and the decrease of absolute air humidity at temperature less -35°C was made.

Key words: group, subgroup, index of a subgroup, algorithmic problem, free product, direct product, occurrence problem.

© Kozlov V.I. et. al., 2019

¹The study was carried out with partial support: at IMCES SB RAS - state budget topic IX.135.1 (state registration number AAAA-A17-117013050031-8); at the IKFiA FIC YaNTS - the state budget topic II.16.2.1 (state registration number AAAA-A17117021450059-3), supported by the RFBR grant 18-45-140028 p_a.