

## АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.594.11:504.3.054

**В.К. Ролдугин, Л.А. Першаков, С.А. Румянцев**

### **Вариации атмосферного электрического поля во время нефелиновых бурь вблизи г. Апатиты**

*Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты*

Поступила в редакцию 22.12.2005 г.

В г. Апатиты Мурманской области проводились наблюдения напряженности электрического поля и плотности атмосферного тока. Обнаружено, что при появлении пылевых бурь, приходящих с апатито-нефелинового хвостохранилища, происходят уменьшение величины постоянного электрического поля и тока и обращение их знака. Пыль имеет эрозионное происхождение и образуется летом в сухую погоду при достаточно сильном ветре. Регрессионное сопоставление записей поля и тока позволило определить величину проводимости воздуха и исследовать вклад тока, не являющегося током проводимости. Найденные значения проводимости воздуха близки к наблюдавшимся в средних широтах. Показано, что уменьшение величины и обращение знака атмосферного электрического поля и тока могут быть объяснены объемным зарядом пылевого облака.

#### **Введение**

Пыль составляет часть аэрозольного наполнения нижней атмосферы. Она может быть как природного (эрозионного, вулканического), так и промышленного происхождения. В районе г. Апатиты Мурманской области расположены захоронения отходов производства объединения «Апатит» (так называемые «хвосты», или хвостохранилища), содержащие большое количество мелкодисперсного вещества, возникающего при обработке горных пород в процессе апатито-нефелинового производства. В последние годы в г. Апатиты в летние периоды увеличилась частота пылевых бурь. Объясняется это тем, что ветер в сухую погоду поднимает с «хвостов» пыль и разносит ее по окрестностям, достигая иногда города. При этом присутствие ее в воздухе определяется визуально. Длительность явления составляет от получаса до нескольких часов. Появление пыли отрицательно сказывается на здоровье населения и экологии лесных массивов.

Пыль в атмосфере влияет на свойства приземного электрического поля [1]. Измерения в Западной Африке в сухой сезон во время сильных северо-восточных ветров обнаружили, что при появлении пылевых облаков приземное электрическое поле и токи испытывают обращение знака [2, 3], причем величина обращенного поля может в 50 раз превосходить величину исходного. Время смены знака составляет около 10 мин. В Иркутске было отмечено похожее явление, — противофазность годовых вариаций напряженности поля и концентрации пыли [4]. Как показано в работах по исследованию влияния на атмосферное электрическое поле пыли вулканического [5], эрозионного [6] либо промышленного происхождения [7], вариации

электрического поля могут быть объяснены предположением структуры распределения объемного электрического заряда в пылевом облаке. В данной работе показано, что пылевые бури около г. Апатиты сопровождаются сильными изменениями постоянного электрического поля атмосферы и атмосферного тока и объясняются наблюдаемые вариации электрического поля с помощью гипотезы об объемном заряде пылевого облака.

#### **1. Аппаратура**

Измерения атмосферного электричества на атмосферной станции Полярного геофизического института, расположенной в лесном массиве за чертой г. Апатиты ( $\varphi = 67,5^\circ$ ,  $\lambda = 33,4^\circ$ ) на расстоянии 2 км от города, начаты в апреле 2001 г. с измерений атмосферного электрического тока. Датчиком служит двойная линия около 100 м длиной (высота подвеса 3,5 м, расстояние по горизонтали между биметаллическими проводами диаметром 5 мм около 1,5 м). Эффективная площадь антенны, согласно формулам из [8, 9], составляет 520 м<sup>2</sup>. Сигнал подается на усилитель постоянного тока, собранный на ОУ, а затем поступает на цифровую 18-канальную 10-разрядную систему сбора данных с частотой опроса 1 раз в 1 мин. На эту же систему сбора подаются данные температуры, давления, влажности воздуха, скорости и направления ветра, а также освещенности в видимой области спектра в относительных единицах.

Измерения напряженности атмосферного электрического поля начаты в конце июня 2002 г. [10]. Датчиком служит прибор «Поле-2», измеряющий поток электростатической индукции. Прибор установлен на плоской крыше двухэтажного здания

станции в центре квадратной металлической сетки размером 3×3 м. Во время осадков прибор выключается. Из-за отсутствия второго прибора для сравнения редуциционный множитель для приведения получаемых на крыше значений к наземным пока не определен, и в данной статье представлены непосредственно определяемые величины поля. Регистрация напряженности поля, как и тока, осуществляется системой сбора данных в цифровом виде. На полигоне ведутся визуальные наблюдения за погодой и состоянием атмосферы примерно раз в 1–2 ч.

## 2. Результаты наблюдений

По результатам визуальных наблюдений в 2002 и 2003 гг. было обнаружено 12 случаев появления нефелиновых бурь, когда имелись записи атмосферного электрического поля и/или тока. Все эти случаи приходятся на летние месяцы. Пыль появлялась на станции, когда ветер дул с хвостохранилища и скорость ветра была в пределах от 4 до 7 м/с. Хвостохранилище находится около ст. Хибины на расстоянии 8–10 км от места наблюдений и содержит ряд щелочных алюмосиликатов, в основном нефелин [11]. Во время сильных нефелиновых бурь горизонт при безоблачной погоде не виден. По высоте дымка простирается на сотни метров. На полигоне, где проводятся измерения атмосферного электричества, крупные пылинки оседают на предметы, расположенные под открытым небом. Они представляют собой частички размером около 10–30 мкм, в основном полевошпатовые.

Практически все рассмотренные случаи происходили в отсутствие осадков. Длительность явления — от 15 мин до нескольких часов.

Анализ данных по атмосферному электричеству показал, что появление на полигоне нефелиновых бурь сопровождается значительным падением градиента потенциала электрического поля. Он не только уменьшается до нуля, но и достигает больших отрицательных значений. В отличие от типичных для случаев плохой погоды (осадки, сильный ветер) интенсивных вариаций как в сторону увеличения, так в сторону уменьшения градиента потенциала поля, при нефелиновых бурях происходит только его уменьшение. Характерный случай, зарегистрированный 13 августа 2002 г., показан на рис. 1.

До 4.00 UT наблюдались легкие перистые облака, а после 4.00 небо было безоблачно. Примерно с этого времени направление ветра совпало с направлением на хвостохранилище, азимут около 300°, а его скорость возросла до 4 м/с. Около 5 ч поле с обычных значений 200 В/м резко упало до нуля, на некоторое время вернулось к невозмущенным значениям, а затем его вариации приняли колебательный характер, достигая отрицательных значений – 600 В/м. Около 14.30 ветер почти стих и напряженность сразу же вернулась к положительным значениям.

Аналогичная картина наблюдается и в поведении атмосферного электрического тока при пылевых бурях 24 июня 2003 г. (рис. 2).

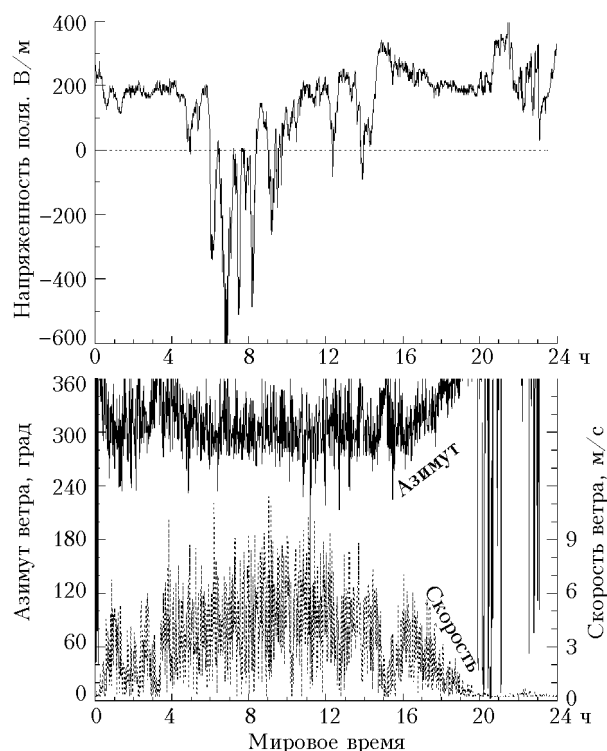


Рис. 1. Вариации напряженности электрического поля и скорости и направления ветра в день наблюдения нефелиновой пыли

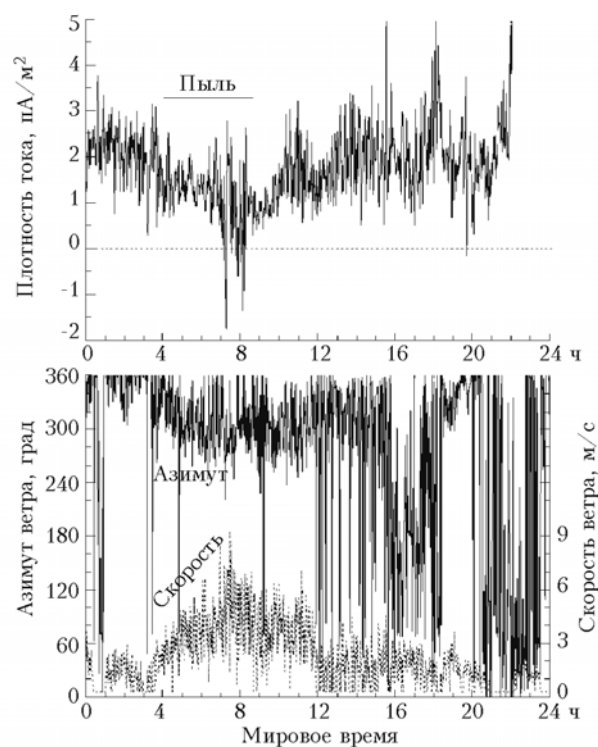


Рис. 2. Вариации плотности электрического тока в атмосфере и направления и скорости ветра в день наблюдения нефелиновой пыли

Период, когда в окрестности станции была видна нефелиновая пыль, отмечен горизонтальной линией. Азимут ветра в это время был близок

к направлению на «хвосты». Между 7.00 и 8.15 средняя скорость ветра достигла максимума (около 5 м/с) и ток сменил направление, т.е. тек от земли вверх. На небе были слоисто-кучевые облака. С 9.00 скорость ветра понизилась примерно до 1,5 м/с (в 12.00 UT) и нефелиновая пыль на станции не отмечалась. Величина и направление тока в это время возвратились к невозмущенным значениям.

### 3. Соотношение тока и поля

Представляет интерес сопоставить поведение градиента потенциала электрического поля и плотности тока во время появления нефелиновой пыли. Качественно картина изменения этих проявлений атмосферного электричества одна и та же: когда на место наблюдения приходит пыль, то и градиент потенциала, и плотность тока падают и достигают отрицательных значений. Количественно же изменения градиента потенциала поля и плотности тока различны. В качестве примера на рис. 3 показана ситуация, наблюдавшаяся 13 июля 2003 г., когда пыль появлялась всего лишь в течение 30 мин.

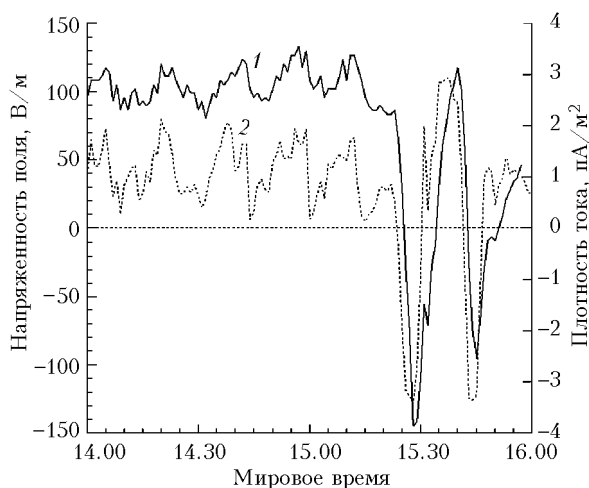


Рис. 3. Изменения напряженности электрического поля (кривая 1) и плотности тока (2) при появлении нефелиновой пыли между 14 ч и 16 ч мирового времени 13 июля 2003 г.

Изменения обеих величин и до, и во время появления нефелиновой пыли чрезвычайно похожи, даже в деталях. Видно, что минимальных значений во время нефелиновой бури, начавшейся в 15.20, они достигают почти одновременно, и вариации их в этот получасовой интервал весьма схожи. Однако величины отрицательных значений относительно невозмущенных уровней сильно отличаются: если для градиента потенциала отрицательные значения близки по абсолютной величине к положительным, то для тока их величина в несколько раз больше, чем при отсутствии пыли. Из рис. 3 видно также, что смена знака происходит не одновременно: ток раньше пересекает нулевую отметку, чем градиент поля (как при падении, так и при восстановлении).

Сходство и различие вариаций градиента потенциала поля  $E$  и плотности тока  $j$  можно выра-

зить количественно, если учесть, что регистрируемый длинной линией ток складывается из нескольких компонентов: тока проводимости  $j_{\text{пров}}$ , конвективного тока  $j_{\text{конв}}$ , связанного с переносом ветром зарядов, и тока смещения  $j_{\text{см}} = \partial E / \partial t$ . Тогда суммарная плотность тока  $j$  выразится как

$$j = \lambda E + j^*, \quad (1)$$

где  $j^* = j_{\text{конв}} + j_{\text{см}}$ . При известной удельной проводимости  $\lambda_{\text{п}}$  можно было бы по этому соотношению определять вклад токов, отличных от тока проводимости.

Измерения проводимости нами не ведутся, однако можно оценить  $\lambda_{\text{п}}$  и  $j^*$  из (1), используя статистический подход. Рассматривая относительно небольшой интервал времени, можно аппроксимировать связь плотности тока и напряженности поля линейной функцией  $j = aE + b$ , в которой коэффициент пропорциональности  $a$  соответствует удельной проводимости  $\lambda_{\text{п}}$ , а постоянная  $b$  — плотности тока  $j^*$ , отличной от плотности тока проводимости. При этом используется предположение, что в течение данного интервала времени оба параметра, т.е.  $\lambda_{\text{п}}$  и  $j^*$ , остаются постоянными.

Весь день 13 июля был разбит на часовые интервалы, за исключением участка от 14.00 до 16.00, который был разбит на два интервала: 14.00–15.20, до прихода пыли, и 15.20–16.00, когда пыль появилась. После 16 ч возникли кучевые облака, а затем туман, поэтому данные после этого времени не рассматриваются. Для каждого из 16 часовых интервалов по односторонним значениям  $j$  и  $E$  линейной аппроксимацией определялись величины  $\lambda_{\text{п}}$  и  $j^*$ , а также коэффициент корреляции между  $j$  и  $E$  (рис. 4).

Видно, что, как и в рассмотренных выше случаях, влияние нефелиновой пыли на атмосферное электричество сказывается при достижении ветром скорости 4 м/с. Коэффициент корреляции между током и полем для всего участка достаточно высок (+0,56).

Условием применимости данного подхода, использующего предположение о постоянстве значений  $\lambda_{\text{п}}$  и  $j^*$  в течение часовых интервалов, может служить большая положительная величина коэффициента корреляции между  $j$  и  $E$ . В качестве порога мы выбрали значение 0,5 (горизонтальная пунктирная прямая). Значения проводимости  $\lambda_{\text{п}}$  и  $j^*$  для интервалов, где коэффициент корреляции превышал 0,5, выделены жирной линией; на остальных интервалах найденные значения  $\lambda_{\text{п}}$  и  $j^*$  следует считать недостоверными.

Как следует из рис. 4, средние значения удельной проводимости находятся между 0,015 и 0,035 пСм/м, что близко к величинам, измеренным в среднеширотной атмосфере [12, 13]. Абсолютная величина плотности тока  $j^*$  лежит в интервале от 0 до 2 пА/м<sup>2</sup>. Знак плотности тока  $j^*$  на всех «достоверных» интервалах отрицательный, за исключением интервала с нефелиновой бурей в 15.20–16.00.

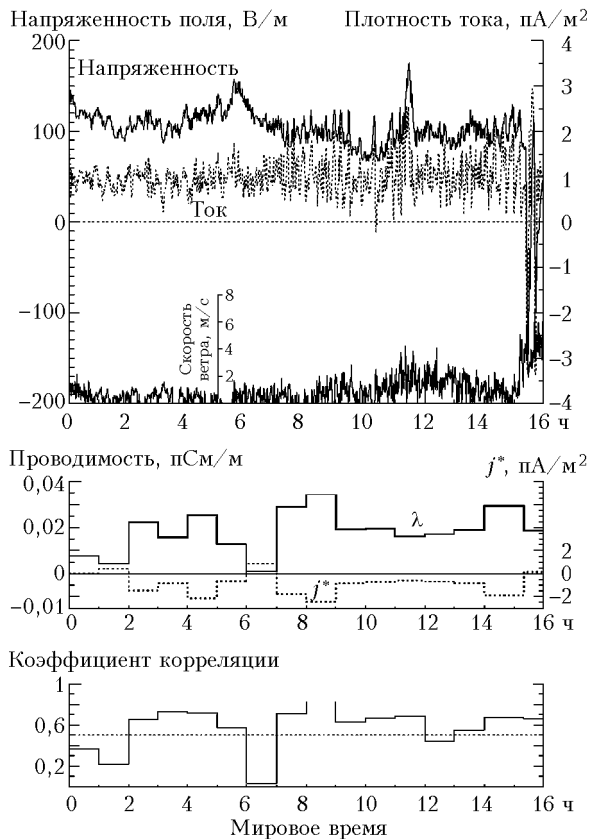


Рис. 4. Напряженность электрического поля, плотность тока и скорость ветра 13 июля 2003 г. на атмосферной станции, расчетные значения за указанные интервалы времени удельной проводимости  $\lambda_n$  и плотности тока  $j^*$ , не являющегося током проводимости, а также коэффициенты корреляции между напряженностью поля и плотностью полного тока за соответствующие интервалы времени

На этом интервале коэффициент корреляции между градиентом потенциала поля и плотностью тока высок и равен 0,68 (см. рис.3), и регрессионный анализ представляется здесь допустимым. Удельная проводимость в это время оказалась равной 0,02 пСм/м, т.е. несколько ниже среднего для невозмущенных интервалов времени, и всего 2/3 от значения за предыдущий интервал 14.00–15.20.

Величина плотности тока  $j^*$  за рассматриваемый интервал бури составила +0,17 пА/м<sup>2</sup>, а на предыдущем интервале –1,88 пА/м<sup>2</sup>, т.е. в 11 раз больше по абсолютной величине.

Ток  $j^*$  состоит из двух основных компонентов: конвективного тока и тока смещения. До бури (15.20)  $j^*$  был отрицательный, во время бури он стал почти равным нулю. Сильные изменения электрического поля (большие значения  $\partial E/\partial t$ ) во время бури (см. рис. 3) указывают на возросший вклад тока смещения. Поэтому можно полагать, что ток смещения в это время компенсировал конвективный ток, который до бури определял  $j^*$  и был отрицательным. Поскольку после 15.20 возросший ток смещения стал отрицательным, то конвективный ток в это время должен быть положительным. Положительным считается направление сверху вниз, и возросший конвективный ток можно свя-

зать с осаждением на землю крупных положительно заряженных песчинок. Это согласуется с общеизвестным представлением [1, 2, 3, 14, 15], что мелкие частицы пыли заряжены отрицательно, а крупные – положительно.

#### 4. Обсуждение результатов

Упрощенную физическую интерпретацию наблюдаемого явления можно дать, рассматривая электрический заряд пылевого облака. В сухих условиях ветер сдувает пыль с поверхности хвостохранилища и переносит ее в прилегающую местность. Заряд на пылинках может возникать как во время сдувания, так и при электризации их в процессе движения в воздухе.

Появление заряженного облака пылинок приводит к изменению квазистационарного электрического поля у поверхности. Рассмотрим, например, пылевой слой толщиной  $h$  и горизонтальными размерами, значительно превосходящими  $h$ , однородно заряженный отрицательным зарядом с объемной плотностью  $\rho$ . Создаваемое им поле  $E_d$  вне слоя и на его границе вертикально и направлено к слою, по величине равному полю от однородно заряженной поверхности с поверхностной плотностью заряда  $\sigma = \rho h$ , т.е.  $E_d = \rho h/2\epsilon_0$ , где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м. По визуальным наблюдениям толщина пылевого слоя порядка 100 м, и, чтобы нейтрализовать фоновое невозмущенное поле  $E_0 = 100$  В/м, необходима объемная плотность заряда  $\rho_1 = 2\epsilon_0 E_0/h = 1,77 \cdot 10^{-11}$  К/м<sup>3</sup>. Для достижения величины поля  $E = -600$  В/м, показанной на рис. 1, требуется значение плотности заряда  $|\rho_2| = 7|\rho_1| = 1,24 \cdot 10^{-10}$  К/м<sup>3</sup> при данных значениях  $h$  и  $E_0$ .

Если облако пылинок электронейтрально, то требуется, чтобы в нем произошло разделение зарядов, при котором пылинки с положительным зарядом окажутся внизу облака, а с отрицательным – на верхней границе. И в этом случае возможно обращение полного атмосферного электрического поля.

Вероятный механизм электризации пылевого облака описан в [2]. Ветровое возмущение разрушает пыль, большие частички ( $> 5$  мкм) заряжаются положительно, малые (0,1–0,4 мкм и меньше) – отрицательно. При переносе под действием гравитации положительные частицы осаждаются на землю и на больших расстояниях пыль оказывается заряженной отрицательно. По оценкам для нигерийских пылевых бурь, разделение происходит на расстояниях 10–12 км [3], что близко в нашем случае расстоянию от станции до отвалов. Изучение осажденной на станции пыли показало наличие частиц размерами около 10 мкм и более. Поэтому можно полагать, что в нашем случае у земли были пылинки и положительного знака.

В работе [4] уменьшение напряженности поля при увеличении концентрации пыли в г. Иркутске объясняется другим механизмом – увеличением проводимости воздуха вследствие  $\gamma$ -радиоактивности пыли. В нашем случае такие черты явления, как уменьшение тока, смена знака напряженности

и тока, рассчитанное уменьшение проводимости во время пылевой бури, свидетельствуют в пользу нерadiационной электризации пыли.

### Заклучение

Наблюдались уменьшения величины градиента потенциала электрического поля и плотности атмосферного электрического тока и обращение их знака при поступлении пыли с хвостохранилища в место регистрации вблизи г. Апатиты. Пыль имеет эрозийное происхождение и образуется летом в сухую погоду при достаточно сильном ветре. Найденные значения проводимости воздуха близки к наблюдавшимся в средних широтах. Показано, что уменьшение величины и обращение знака градиента потенциала атмосферного электрического поля и тока могут быть объяснены объемным зарядом пылевого облака. Облако может быть отрицательно заряженным или электронейтральным, в последнем случае оно должно быть поляризовано определенным образом. Данный результат может быть важным для экологии Апатитского района.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиofизические методы исследований».

1. *Fenn B.* Атмосферная пыль. М.: Из-во иностр. лит-ры, 1961. 287 с.
2. *Ette A.I.I.* The effect of the Harmattan dust on atmospheric electric parameters // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1971. V. 33. N 2. P. 295–300.
3. *Harris D.J.* Atmospheric electric field measurement in Northern Nigeria during the dry season // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1971. V. 33. N 4. P. 581–588.
4. *Шаманский Ю.В.* Зависимость напряженности электрического поля атмосферы в Иркутске от аэрозоль-

- ного загрязнения // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16. № 7. С. 648–651.
5. *Miura T., Koyaguchi T.* Atmospheric electric potential gradient measurements of ash clouds generated by pyroclastic flows at Unzen volcano, Japan // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. N 14. P. 1789–1792.
6. *Смирнов В.В.* Электрическое поле пылевых струй // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1999. Т. 35. № 5. С. 616–623.
7. *Кречетов А.А., Шаманский Ю.В.* Градиент потенциала электрического поля атмосферы как индикатор загрязнения атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2005. Т. 18. № 1–2. С. 139–141.
8. *Ролдугин В.К.* Об измерении атмосферных токов при помощи сетчатого коллектора // *Техника и методика геофизического эксперимента.* Апатиты, 2003. С. 120.
9. *Tammet H., Israelsson S., Knudsen E., Tuomi T.J.* Effective area of a horizontal long-wire antenna collecting the atmospheric electric vertical current // *J. Geophys. Res.* D. 1996. V. 101. N 23. P. 29,671–29,67.
10. *Ролдугин В.К., Белоглазов М.И., Галахов А.А., Першаков Л.А., Шишаев В.А.* О наблюдениях атмосферного электричества на Кольском полуострове // *Пятая Российск. конф. по атмосферному электричеству.* Владимир, 2003. С. 130.
11. *Калинников В.Т., Николаев А.И., Захаров В.И.* Гидрометаллургическая комплексная переработка нетрадиционного титано-редкометалльного и алюмосиликатного сырья. Апатиты: КНЦ, 1999. 225 с.
12. *Шварц Я.М., Огуряева Л.В.* Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // *Метеорол. и гидрол.* 1987. № 7. С. 59–64.
13. *Guo Y., Barthakur N.N., Bhartendu S.* Using atmospheric electrical conductivity as an urban air pollution indicator // *J. Geophys. Res.* D. 1996. V. 101. N 4. P. 9197–9203.
14. *Чалмерс Дж. А.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 422 с.
15. *Burrows D.A., Hobbs P.V.* Electrical charges on snow particles // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75. N 24. P. 4499–4505.

### *V.K. Roldugin, L.A. Pershakov, S.A. Rumyantsev. Atmospheric electric field variations during nepheline dust storms near Apatity town.*

The observations of atmospheric electric field intensity and current density have been carried out in Apatity town of Murmansk region. It is found that an appearance of a dust storm, coming from the apatite-nepheline tailing dump, results in a decrease of electric field and current intensities, and their sign inversion. The dust has an erosion origin and is formed in conditions of dry weather with strong wind in summer. The regression comparison of electric field and current records permits one to determine the air conductivity value, and to investigate the contribution of the current, which is not the conductivity current. The obtained values of air conductivity are close to the observed ones in middle latitudes. It is shown that the value decrease and the sign inversion of the atmospheric electric field and current may be explained by a space charge of dust clouds.