

25.00.30
УДК 591.594

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ
(ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Зекореев Р.Х.

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Высокогорный геофизический институт» г. Нальчик, Россия
zeri54@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ В РАЙОНЕ КАРЬЕРА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК

DOI: 10.37493/2308-4758.2022.3.7

Введение.

Выбросы промышленных предприятий, открытых горных разработок, автотранспорта и др. способны изменить электрические свойства приземного слоя атмосферы и иметь нежелательные экологические последствия для окружающей среды и технических объектов. Исследования электрического состояния атмосферы в ясную погоду проводились в районе Мукуланского карьера на Северном Кавказе. В ходе исследования наблюдались повышенные значения напряженности электрического поля, обусловленные по-видимому процессом электризации аэрозольных частиц разных размеров, образующихся в процессе механического разрушения и дробления частиц горной породы.

Материалы и методы исследований.

Измерения напряженности электрического поля атмосферы, который является одним из важных параметров атмосферного электричества, проводились с помощью флюксметра ротационного типа, на высоте 2542 м. При этом особое внимание уделялось достоверности полученных результатов в ходе этих измерений. Применялась методика проведения атмосферно-электрических измерений, исключающая ошибки, вносимые различными факторами, такими как способ размещения измерительной аппаратуры, неоднородность рельефа местности, метеоусловия пункта наблюдения, который находился в слое обмена воздушных масс и турбулентной диффузии.

**Результаты исследования
и их обсуждение.**

Анализ полученных результатов в дни с невозмущенной ясной погодой показал, что единственным фактором, влияющим на унитарный ход напряженности поля на такой высоте, остается карьер открытых горных разработок, где в такие дни постоянно идет интенсивное пылеобразование и связанная с ним электризация аэрозольных частиц разных размеров. Если процессы электризации протекают достаточно интенсивно и длительно, то в приземном слое атмосферы накапливается избыточный объемный заряд, который способствует формированию повышенных значений электрического поля у поверхности земли. Среднее значение напряженности электрического поля составил 600-700 В/м, которая превышает на порядок, результаты измерений, проведенные на таких высотах другими исследователями в условиях невозмущен-

ной погоды. Отмечены также локальные изменения напряженности поля при подходе к измерительной площадке, визуально наблюдаемого облака пыли, что проявилось в синхронных изменениях напряженности поля, при котором ее значение снижается и достигает иногда отрицательных значений и восстанавливается через некоторое время до своих средних значений. Локальные изменения поля вызваны действием отрицательного объемного заряда сосредоточенного в облаке пыли, состоящим из крупных частиц, средний размер которых оценивался по скорости оседания аэрозольных частиц и составил около 30 мкм. Обнаружено, что существует прямая связь между напряженностью поля и концентрацией аэрозольных частиц, образующихся при механическом разрушении горных пород, в результате которого происходит электризация частиц.

Выводы. Исследования электрического состояния, проведенные в районе Мукуланского карьера, показали, что в условиях хорошей погоды наблюдается электризация в приземном слое атмосферы. Аэрозольные частицы приобретают заряд в процессе механического разрушения частиц горных пород и нарушения контакта между ними. Одновременно происходит селективная зарядка и захват легких аэроионов воздуха в зависимости от их размеров и макроразделение в поле гравитационных сил, с одной стороны, быстрое оседание крупных частиц, заряженных отрицательно на поверхность земли, а с другой стороны мелкие частицы, которые могут сутками находиться во взвешенном состоянии в атмосфере, заряженные положительным знаком, что приводит к уменьшению проводимости воздуха и соответственно росту напряженности поля в районе карьера.

Ключевые слова: Атмосферное электричество, электризация, напряженность поля, флюксметр, объемный заряд, карьер, аэрозольные частицы, горная порода.

Zekoreev R.KH. Federal state budgetary institution
«High Mountain Geophysical institute».
Russian, Nalchik

Investigation of the state of the electric field of the atmosphere in the area of open pit mining

Introduction. Emissions from industrial enterprises, open pit mining, vehicles, etc. can change the electrical properties of the surface layer of the atmosphere and have undesirable environmental consequences for the environment and technical facilities. Studies of the electrical state of the atmosphere in clear weather were carried out in the area of the Mukulan quarry in the North Caucasus. In the course of the study, increased values of the electric field strength were observed, apparently due to the process of electrization of aerosol particles of different sizes, formed in the process of mechanical destruction and crushing of rock particles.

Materials and research methods.

Measurements of the electric field strength of the atmosphere, which is one of the important parameters of atmospheric electricity, were carried out using a rotary type fluxmeter at an altitude of 2542 m. At the same time, special attention was paid to the reliability of the results obtained during these measurements. A technique was used for conducting atmospheric-electrical measurements, which excludes errors introduced by various factors, such as the method of placing the measuring equipment, the heterogeneity of the terrain, the weather conditions of the observation point, which was located in the layer of air mass exchange and turbulent diffusion.

Results of the study and their discussion.

An analysis of the results obtained on days with undisturbed clear weather showed that the only factor influencing the unitary course of the field strength at such a height remains the open pit mining, where on such days there is constant intense dust formation and the associated electrization of aerosol particles of different sizes. If the processes of electrification proceed intensively and for a long time, then an excess space charge accumulates in the surface layer of the atmosphere, which contributes to the formation of increased values of the electric field near the earth's surface. The average value of the electric field strength was 600-700 V/m, which exceeds by an order of magnitude the results of measurements carried out at such heights by other researchers in undisturbed weather conditions. Local changes in the field strength were also noted when approaching the measuring site, a visually observed cloud of dust, which manifested itself in synchronous changes in the field strength, at which its value decreases and sometimes reaches negative values and recovers after some time to its average values. Local changes in the field are caused by the action of a negative space charge concentrated in a dust cloud consisting of large particles, the average size of which was estimated from the settling rate of aerosol particles and amounted to about 30 μm . It was found that there is a direct relationship between the field strength and the concentration of aerosol particles formed during the mechanical destruction of rocks, as a result of which the particles are electrified.

Conclusions.

Studies of the electrical state carried out in the area of the Mukulan quarry showed that in good weather conditions, electrization is observed in the surface layer of the atmosphere. Aerosol particles acquire a charge in the process of mechanical destruction of rock particles and disruption of contact between them. At the same time, selective charging and capture of light air ions, depending on their size, and macroseparation in the field of gravitational forces occur, on the one hand, the rapid settling of large particles charged negatively on the earth's surface, and on the other hand, small particles that can be in suspension for days in the atmosphere, charged with a positive sign, which leads to a decrease in air conductivity and, accordingly, an increase in the field strength in the quarry area.

Key words:

Atmospheric electricity, electrization, field strength, fluxmeter, space charge, quarry, aerosol particles, mountain breed.

Введение

Исследования процессов атмосферного электричества происходящих в приземном слое атмосферы продолжает привлекать внимание исследователей и практиков в связи с тем, что не во всем ясна природа атмосферно-электрических явлений и процессов. Данные и методы атмосферного электричества могут использоваться в разных областях науки и техники таких, как физика атмосферы, метеорология, сейсмология, разработка горнорудных месторождений и др. Так эффективная защита объектов народного хозяйства от статического электричества и грозových разрядов требует все более лучшего понимания взаимодействия объекта со средой, все более точного знания параметров атмосферного электричества. Исследования показали, что выбросы промышленных предприятий, открытых горных разработок, автотранспорта и др. способны изменить электрические свойства приземного слоя атмосферы.

Одним из важных электрических параметров приземного слоя атмосферы является напряженность электрического поля, которая легче всего поддается измерению по сравнению с другими параметрами, например, как объемный заряд. Электрическое поле атмосферы в приземном слое в отсутствие нарушений погоды, т.е. при отсутствии грозы, дождя, тумана, облачности принимается однородным, и в этих условиях обычно рассматривается вертикальная составляющая вектора напряженности электрического поля. Так напряженность поля в ясные дни с невозмущенной погодой у поверхности земли максимальна и достигает в среднем 120-130 В/м и убывает с высотой. Значения напряженности поля испытывают регулярные суточные изменения и это происходит по всему земному шару, и эти изменения получили название унитарной вариации электрического поля у поверхности Земли [5]. Кроме регулярных колебаний, напряженность поля даже в условиях хорошей погоды испытывает довольно значительные нерегулярные изменения, связанные с изменением состояния атмосферы, различными аэрозольными включениями и т.д. На величину напряженности поля оказывает влияние концентрация ионов, аэрозольных частиц и турбулентное состояние атмосферы [7].

Образованию заряженных областей в приземном слое атмосферы предшествуют процессы, приводящие к электризации атмос-

ферного воздуха и аэрозоля всегда присутствующих в нем. Если процессы электризации будут протекать достаточно интенсивно и длительно, а процессы рекомбинации зарядов и их диссипации – сравнительно медленно, возможно накопление объемного заряда в приземном слое атмосферы, которое способствуют формированию электрического поля у поверхности земли. Несмотря на большое внимание, уделяемое данному вопросу, до сих пор окончательно не установлен механизм формирования электрического поля в нижней атмосфере. Представляется вероятным, что существует не одна, а ряд причин, по которым происходит электризация и формирование электрического поля в нижней атмосфере.

Все многообразие процессов электризации частиц оказалось можно свести к двум физическим процессам: электризации связанной с захватом частицами аэроионов и электризации, связанной с процессом обмена зарядами между частицами, возникающая либо после разрыва контакта между ними, либо после их разрушения [4].

Электризация, связанная с захватом частицами аэроионов может возникать, если потоки положительных или отрицательных аэроионов на частицу при ее нулевом заряде не равны. Причиной неравенства могут быть, во-первых, разная концентрация и разная подвижность положительных и отрицательных аэроионов и во-вторых, различная способность частицы данного вида захватывать аэроионы разных полярностей. Кроме того, электризация частицы возникает также потому, что сам процесс захвата аэроиона частицей носит случайный характер. Условия равновесия наступают при некотором определенном распределении зарядов на частицах. Этот процесс электризации наиболее подробно исследован теоретически, при ряде упрощающих предположений об условиях на границе частица-воздух и о равномерном распределении концентрации аэроионов в пространстве вблизи частицы [12, 16]. Справедливость полученного выражения проверялась в лабораторных условиях и оказалось, что для частиц микронных размеров оно справедливо. Однако многочисленные измерения зарядов частиц в слоистых облаках и туманах, проведенные в основном советскими исследователями показали, что абсолютные средние значения зарядов примерно на порядок больше предсказываемых теорией.

Применив теорию случайных блужданий к задаче о накоплении заряда на частицах и предположив возможность коагуляции одноименно заряженных в микронном диапазоне их размеров авторы [6, 14] указали путь расширения дисперсии в распределении зарядов на частицах и, таким образом, путь роста среднего абсолютного заряда на частицах.

Представляет интерес непосредственное или косвенное измерение электрических зарядов на частицах. Заряды частиц радиусом 10–100 мкм практически не измерялись. Однако именно в этом диапазоне размеров происходит переход от сравнительно небольших значений зарядов на мелких частицах к достаточно большим зарядам частиц нижнего слоя атмосферы. Величины этих зарядов на частицах невозможно объяснить только электризацией за счет захвата аэроионов.

Исследования в этой области показали, что наряду с вышеуказанным механизмом в приземном слое атмосферы идет процесс электризации связанный с обменом зарядами между частицами при нарушении контакта между ними или разрушении частиц приводит к появлению зарядов на частицах, участвующих в данном акте. Величина зарядов, возникающих на частицах при нарушении контакта между ними или разрушении частиц, пропорциональны разности химических потенциалов, емкости между ними в момент разрыва контакта и зависят от соотношения размеров частиц, их электропроводности и скорости разделения аэрозольных частиц в пространстве.

В пользу контактной электризации говорят наблюдения, проведенные во время пылевых бурь в некоторых тропических областях, в результате которых выявлены значительные эффекты. Показано, что напряженность электрического поля зависит от химической природы пыли [2]. Так, кислотная пыль вызывает образование отрицательного значения напряженности поля, а щелочная пыль – положительного. Эффект возникает вследствие разделения в пространстве, с одной стороны, крупных частиц пыли, заряженных одним знаком электричества, а с другой – мелких частиц пыли или воздуха, заряженных другим знаком. Такие эффекты, описанные выше, могут возникать при открытых разработках горных пород, за счет сильной запыленности в районе карьера.

В литературе существует достаточное количество исследований величин атмосферного электричества в приземном слое воздуха в различных регионах. В нашей стране в течение 1957-1984 гг. была организована сеть пунктов наблюдения на базе существующей наземной метеорологической сети, на которых проводились измерения напряженности поля и полярной электропроводности воздуха [18]. Анализ результатов этих исследований за этот период показывает, что значения напряженности поля, характерные для данного пункта, за последние 20 лет практически не изменились, а среднегодовые значения электропроводности воздуха за тот же период испытали существенное уменьшение, за исключением пункта наблюдения в Душети. Уменьшение электропроводности воздуха может быть интерпретировано как соответствующее увеличение концентрации в воздухе аэрозольных частиц субоптического диапазона размеров (радиус 0,01–0,2 мкм). В работе также отмечается, что отсутствие регулярных измерений напряженности поля и электропроводности воздуха в свободной атмосфере затрудняет полную интерпретацию результатов измерений в приземном слое атмосферы.

Также на протяжении нескольких десятилетий проводятся комплексные исследования атмосферно-электрических параметров в приземном слое атмосферы на территории Ростовской области. Предметом исследований являлось изучение влияния загрязнения воздушного бассейна г. Ростов-на-Дону и других территорий на атмосферно-электрические характеристики с целью использования этих характеристик как индикаторов общего загрязнения атмосферы [8]. При исследовании влияния аэрозольного загрязнения атмосферы на электрические характеристики было отмечено уменьшение полярных электропроводностей при увеличении содержания аэрозолей. На основании данных автоматизированных измерений исследовались временные вариации напряженности поля и полярных электропроводностей атмосферы при различных периодах осреднения. При этом обнаружены существование разных периодичностей в полученных спектрограммах, например, периодичность соответствующая 2,5 часам. В работе также отмечается, что экспериментальные данные могут быть использованы при моделировании

электродного слоя, что позволит сократить некоторое несоответствие между теорией и экспериментом.

В настоящее время в исследованиях атмосферного электричества в приземном слое атмосферы уделяется внимание вопросам математического моделирования. Показано, что использование различных типов моделей дает определенное представление о закономерностях протекания электрических процессов в приземном слое атмосферы. Впервые стационарная модель электродного эффекта в случае присутствия в атмосфере аэрозольных частиц была построена в работах Швейдлера и Шольца [11]. Общим в этих работах являются допущения о равных подвижностях положительных и отрицательных ионов и постоянной интенсивности ионообразования, а также пренебрежение рекомбинацией легких ионов и ограничения на значения коэффициентов взаимодействия легких ионов с тяжелыми ядрами. Для преодоления физических допущений, упрощающих математическую модель Хоппель применил численный метод для решения уравнений, описывающие стационарный электродный эффект, при этом он отказался от условия, что количество тяжелых ионов превышает число легких ионов и не отбросил рекомбинационный член. В работе [19] был рассмотрен случай турбулентного электродного эффекта при наличии аэрозольных частиц в атмосфере, что существенно сокращает несоответствие теории и эксперимента. В исследовании проведенной в работе [11] также отмечается, что наличие в атмосфере концентрации аэрозольных частиц более $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ оказывает заметное влияние на распределение электрических характеристик вблизи поверхности земли. Объемный заряд, создаваемый тяжелыми ионами, образовавшимися за счет соединения аэрозоля с аэроионами, начинает оказывать существенное влияние при концентрациях, превышающих 10^9 м^{-3} .

Исследования элементов атмосферного электричества также проводились в горных районах в нашей стране с 50-х годов в Приэльбрусье: на пике Терскол, Ледовой базе и пике Чегет. Эти наблюдательные пункты являются глобально-репрезентативными в электрическом отношении, то есть пунктами наблюдения, на которых в условиях невозмущенной погоды проявляется унитарная вариация напряженности поля. Обычно выбор таких пунктов наблюдения

обусловлен отсутствием поблизости постоянных источников антропогенного загрязнения атмосферы. Из анализа результатов круглосуточной регистрации напряженности поля на станции Терскол (высота 2200 м) летом в ясную погоду видно, что средние значения поля составляют 30 В/м [9]. Результаты измерений параметров атмосферного электричества, проводившиеся на пике Чегет (высота 3040 м) показывают, что суточный ход напряженности поля хорошо коррелирует с унитарной вариацией атмосферного потенциала и мало отличается от измеренных значений поля на таких же высотах, за исключением тех случаев, когда ветер имеет северное или северо-восточное направление, где на расстоянии около 40 км расположен промышленный объект [1], который оказывает влияние на значения напряженности поля. Исследования, проведенные в Восточной Сибири [15], также показывают, что наибольшие значения напряженности поля наблюдаются на карьере открытых разработок мрамора (Слюдянка), где загрязненность воздуха аэрозольными частицами весьма велика.

Из вышеизложенного следует, что многофакторность процессов, происходящих в приземном слое атмосферы усложняет их описание и интерпретацию экспериментальных данных. Поэтому при проведении исследований по атмосферному электричеству важны обоснованная систематизация полученных материалов и отбор однородных массивов данных. Опыт исследований многих авторов показывает, что крайне важно учитывать термодинамическую устойчивость нижних слоев атмосферы, а также присутствие и концентрацию аэрозольных частиц в этом слое.

Материалы и методы исследований

Наши исследования состояния электрического поля проводились на промышленном объекте, на которую указывают авторы [1], этим объектом является Мукуланский карьер на Северном Кавказе, где ведутся открытые горные разработки вольфрамово-молибденных руд, который расположен на высоте около 2500 м над уровнем моря. Пункт наблюдения находился в непосредственной близости от карьера открытых разработок, на территории КРП-2, на высоте 2542 м, где происходят интенсивные процессы пылеоб-

разования, что оказывает заметное влияние на электрическое состояние атмосферы в районе карьера.

Проводились измерения напряженности электрического поля, как одного из важных параметров атмосферного электричества в приземном слое атмосферы. Для контроля электрического состояния атмосферы в районе карьера использовался электростатический флюксметр ротационного типа, который размещался на специально подобранной ровной площадке размером 5х5 м, для исключения влияния неоднородностей поверхности на результаты измерений. Измерительная пластина флюксметра располагалась на одном уровне с измерительной площадкой, для исключения влияния искажений поля, вносимый самим флюксметром. Для исключения влияния помех различного происхождения измерительный блок имел надежное заземление, также измерительная пластина флюксметра протиралась периодически спиртом, что позволило исключать ошибки измерения, возникающие за счет оседания аэрозольных частиц. Перед каждым измерением проводилась тщательная градуировка флюксметра и регистрирующего самопишущего прибора НЗ38-6П.

Ввиду того, что измерения проводились в горах, вертикальное электрическое поле, формируемое над криволинейной поверхностью, становится неоднородным, которое может отразиться на результатах измерений. Для исключения ошибки, вносимой за счет неоднородности рельефа местности, проводился эксперимент по определению коэффициента искажения. Эксперимент показал, что коэффициент искажения мало зависит от измеряемого поля, и ошибка измерения составляет около 5%, которая учитывается в результатах измерений. В связи с тем, что карьер находится в непосредственной близости к областям образования облачности, в слое обмена воздушных масс проводился ежедневный контроль за метеорологическим состоянием в районе карьера. Для определения основного фактора, формирующего повышенные значения напряженности поля в районе карьера, необходимо было проводить измерения в ясные дни с невозмущенной погодой, когда должна была проявляться, только унитарная вариация электрического поля на такой высоте.

Результаты исследования и их обсуждение

Эксперименты проводились в летний сезон 1990 года в дни невозмущенной ясной погодой, например, такой день выдался на 25 июля. Погода над карьером 25 июля определялась переменной кучевой облачностью, нижняя граница которой находилась на высоте около 4 км, что оказывало заметное влияние на величину напряженности поля. До 12 часов значения поля составляли 900 В/м в среднем. После 12 и до 17 часов в районе карьера и непосредственно над карьером установилась ясная погода. При создавшихся условиях единственным фактором, влияющим на унитарный ход напряженности поля на такой высоте, остается карьер открытых разработок, где постоянно идет интенсивное пылеобразование и связанный с ним процесс электризации аэрозольных частиц. Из рисунка 1 видно, что значение напряженности поля после 12 часов уменьшается до 600–700 В/м в среднем, что эти значения на порядок и более выше значений поля, измеренных в работе [8].

Анализ результатов измерений, проведенных на Мукуланском карьере и результаты исследования в Восточной Сибири, показывают, что существует прямая связь между напряженностью поля и концентрацией аэрозольных частиц у поверхности земли. С ростом содержания аэрозольных частиц в атмосфере и, следовательно, с уменьшением концентрации легких аэроионов должна расти напряженность электрического поля, что и наблюдалось в ходе эксперимента. Известно, что плотность вертикального тока проводимости $j = E\lambda$ в условиях невозмущенной погоды мало отличается от среднего значения [3]. Изменение удельной проводимости λ при неизменном значении j должно вызвать изменение напряженности поля E зависящее в этом случае от концентрации аэрозольных частиц Z . Аналитически коррелятивная зависимость между напряженностью поля E и концентрацией аэрозольных частиц определяется соотношением [1]:

$$E = \frac{2\pi Ddj}{ewI} Z$$

где D –

коэффициент диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$);

d –

средний диаметр аэрозольных частиц (м);

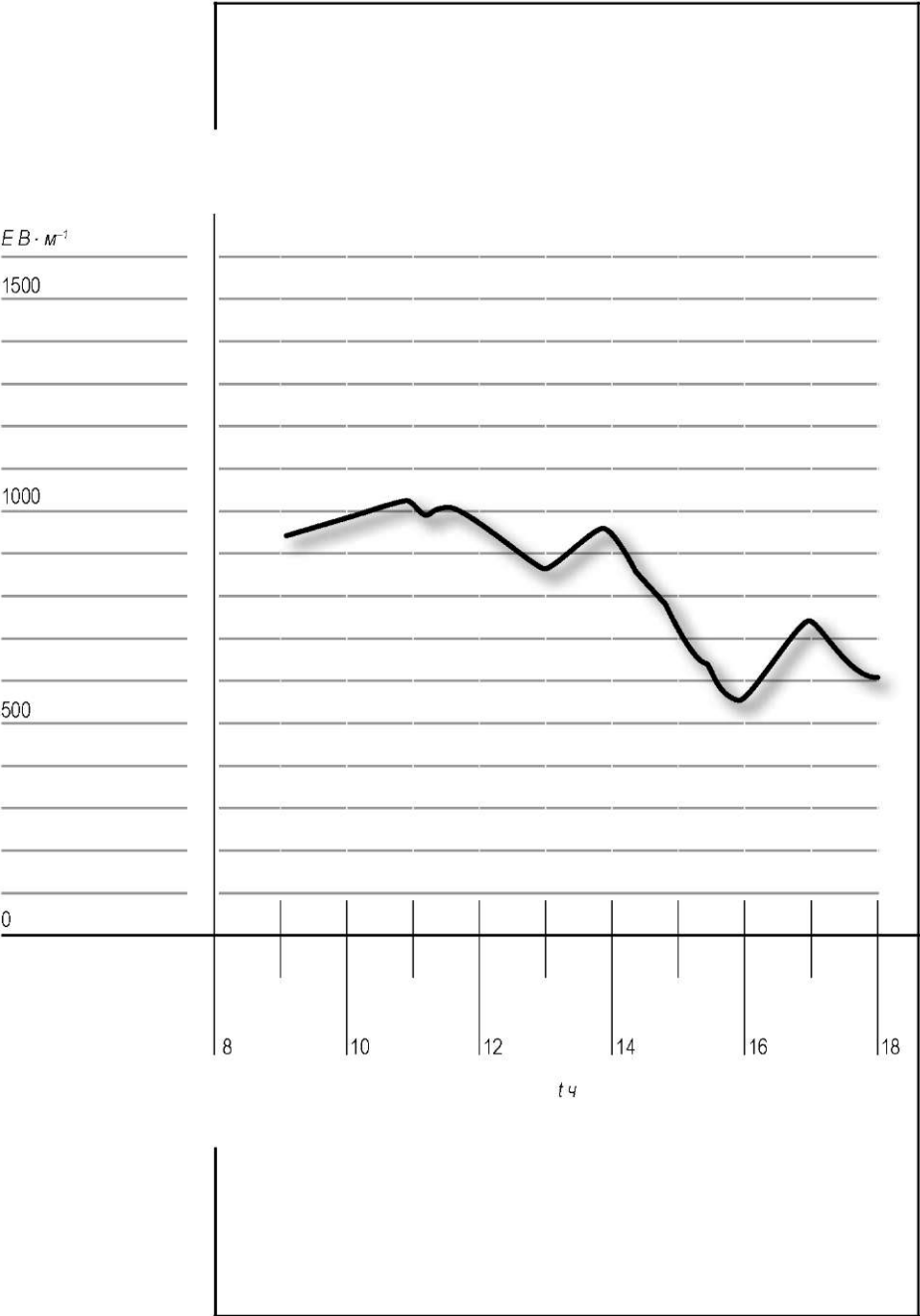


Рис. 1. Средний часовой ход напряженности электрического поля в районе Мукуланского карьера 25 июля 1990 г.
Fig. 1. The average hourly variation of the electric field strength in the area of the Mukulan quarry on July 25, 1990

e –	величина элементарного заряда (К);
w –	средняя подвижность легких ионов ($\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$); I – интенсивность ионообразования ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$);
j –	плотность тока проводимости ($\text{А}/\text{м}^2$);
Z –	концентрация аэрозольных частиц (м^{-3}).

По экспериментальным данным полученным при непосредственных измерениях в горах и при самолетных зондированиях [1, 3] концентрация аэрозольных частиц, средний диаметр которых равен 0,25 мкм, составляет $(1,5 - 3) \cdot 10^9 \text{м}^{-3}$. Расчетное значение напряженности поля, при таких концентрациях аэрозольных частиц составила в среднем 675 В/м, что вполне согласуются с результатами измерения напряженности поля в районе карьера.

Исследования, проведенные разными авторами, показывают, что разрушение частиц горной породы и нарушение контакта между ними приводит к электризации, т.е. к появлению зарядов на частицах. Величины зарядов на частицах пропорциональны разности их химических потенциалов, электропроводности и скорости разделения частиц в пространстве. Скорость оседания аэрозольных частиц зависит от размера этих частиц, например, по данным работы [10], частицы диаметром 0,1 мкм оседают со скоростью $8,97 \cdot 10^{-5} \text{см/с}$, а частицы диаметром 10 мкм оседают со скоростью $3,03 \cdot 10^{-1} \text{см/с}$. Средний диаметр аэрозольных частиц, образующихся в результате механического разрушения горных пород составляет 0,1-0,2 мкм, следовательно, такие мелкие заряженные частицы могут находиться в атмосфере длительное время, исчисляемое сутками. Исследования влияния пылевых бурь на напряженность поля у земли показали также, что знак поля зависит от химической природы пыли [20] и наблюдаемый нами положительный знак избыточного объемного заряда является следствием этого эффекта. Если частицы с разными химическими потенциалами не имеют систематического различия в размерах, то, хотя в атмосфере появляется множество заряженных частиц, макроразделение зарядов в пространстве не происходит. Существование же систематического различия в размерах приводит к появлению в атмосфере избыточных объемных зарядов [17]. Накопление объемного заряда в атмосфере в районе карьера происхо-

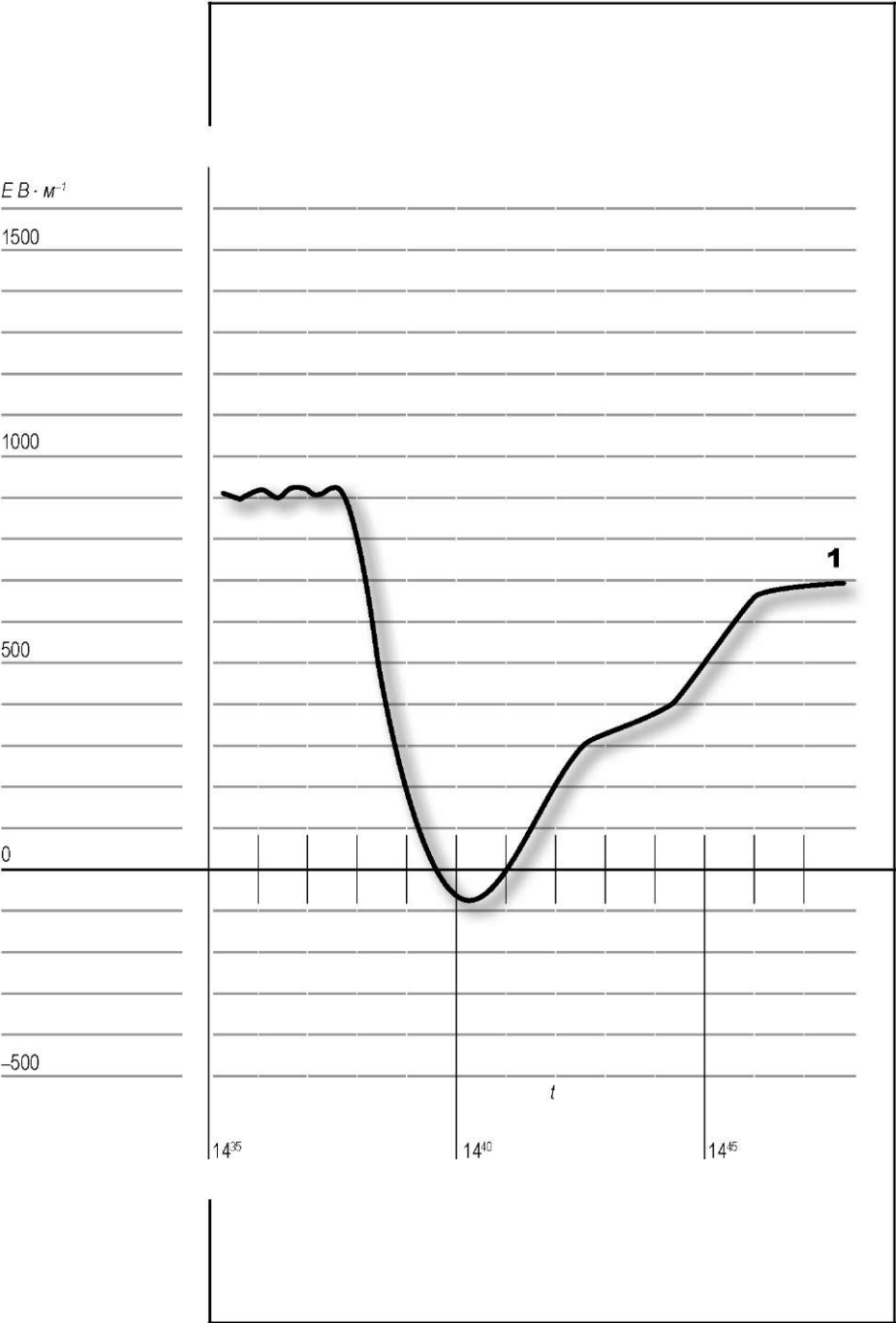


Рис. 2. Локальные изменения напряженности электрического поля 25 июля 1990 г.
Fig. 2. Local changes in the electric field strength on July 25, 1990

дит за счет селективной зарядки аэрозольных частиц разных размеров, одновременно с этим процессом происходит захват легких аэроионов воздуха и макроразделение в поле гравитационных сил из-за различия скоростей оседания, с одной стороны, крупных частиц пыли, заряженных одним знаком электричества, а с другой стороны, мелких частиц пыли и воздуха, заряженных другим знаком, что приводит к уменьшению проводимости воздуха и росту напряженности электрического поля в районе Мукуланского карьера.

В ходе исследования наблюдалось локальное изменение напряженности поля 25 июля, которое происходило при подходе визуально наблюдаемого плотного облака пыли на расстояние около 15 м от флюксметра и поднявшись на высоту 5–6 м выше измерительной площадки и продержалось около 8 минут, что проявилось в синхронных изменениях напряженности поля на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2 при подходе облака пыли ближе к флюксметру напряженность поля сначала падает, успевая при этом поменять свой знак, а затем восстанавливается до своих средних значений, пока облако пыли не осядет ниже уровня измерительной площадки. Отсюда видно, что скорость оседания этих крупных частиц аэрозоля составляет около 3 см/с, и тогда согласно [10] размеры таких крупных частиц составляет около 30 мкм. Этот эффект подтверждает тезис о селективной зарядке аэрозольных частиц в зависимости от их размеров [13], т.е. крупные частицы аэрозоля заряжаются отрицательным знаком и оседают быстро на земную поверхность, а более мелкие частицы аэрозоля остаются сутками во взвешенном состоянии в воздухе и заряжены положительным знаком, образуя избыточный положительный объемный заряд в приземном слое атмосферы в районе Мукуланского карьера.

Выводы

В ходе исследования были обнаружены повышенные средние значения напряженности поля в районе карьера, в ясные дни с невозмущенной погодой, которые составили 600–700 В/м, обусловленные наличием в приземном слое атмосферы избыточного объемного заряда, который формируется в процессе электризации аэрозольных частиц, при добыче и разработке горных пород.

Было выявлено, что процесс электризации протекает постоянно и происходит в результате механического разрушения и дробления горных пород на карьере. При этом одновременно с этим процессом происходит селективная зарядка аэрозольных частиц различных размеров разными знаками. Знак зарядки частиц зависит от размера и химической природы этих частиц, чему свидетельствует эффект, который проявился при локальных изменениях напряженности поля, при подходе и оседании визуально наблюдаемого облака пыли к измерительной площадке.

Дана оценка размера частиц пыли, по скорости оседания облака пыли, который составил около 30 мкм. Показано, что в приземном слое воздуха в районе действующего карьера, постоянно присутствуют мелкие частицы во взвешенном состоянии, размером 0,1–0,3 мкм, которые приобретают положительный заряд при разрушении, дроблении и за счет захвата легких аэроионов воздуха этими частицами, что приводит к уменьшению проводимости воздуха и росту напряженности поля, что и наблюдалось ходе измерений. Обнаружено, что существует прямая связь между напряженностью поля и концентрацией аэрозолей с систематическими различиями в размерах у поверхности земли, и что эти результаты хорошо согласуются с данными аналогичных исследований других авторов.

Измерение напряженности электрического поля в районе карьеров может представлять научный и практический интерес для оперативного контроля и своевременного предупреждения аэрозольного загрязнения атмосферы в районе карьеров и других промышленных объектов, которое представляет опасность для окружающей среды и некоторых технических средств и объектов.

Библиографический список

1. Аджиев А.Х., Вакалов И.А., Куповых Г.В., Мартынов А.А., Шварц Я.М. Наблюдения за атмосферным электричеством на высокогорном пункте пик Чегет // Тезисы докладов 4-го Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Нальчик, 1990. 380 с.
2. Зекореев Р.Х., Камбиев М.М., Машуков Х.Х. Некоторые результаты исследования параметров атмосферного элект-

- тричества в районе Мукуланского карьера (Северный Кавказ) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2010. Вып. 3. С. 43–46.
3. Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1965. 240 с.
 4. Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М. Электричество облаков. Ленинград: Гидрометеиздат, 1971. 93 с.
 5. Колоколов В.П. и др. Измерения электрического поля над Атлантическим и Индийским океанами // Метеорологические исследования. Москва: Изд-во МГК, 1982. № 27. С. 10–16.
 6. Левин Л.М. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. АН СССР. Москва: 1961. 267 с.
 7. Огуряева Л.В., Шварц Я.М. Анализ многолетнего хода величины атмосферного электричества в приземном слое. Регулярные измерения электропроводности воздуха // Метеорологические исследования. Москва: Изд-во МГК, 1982. № 27. С. 35–48.
 8. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкин И.Н., Кудринская Т.В., Петров Н.А. Результаты многолетних экспедиционных атмосферно-электрических исследований в приземном слое // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2010. Спецвыпуск. С. 73–76.
 9. Пудовкина И.Б. Некоторые результаты изучения аномалий электрического поля атмосферы в районе Баксанского ущелья // Труды Эльбрусской экспедиции. 1961. № 215.
 10. Райст П. Аэрозоли. Москва: Мир. 1987. С. 134–145.
 11. Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В., Морозов В.Н. Генерация объемного заряда вблизи поверхности земли с учетом взаимодействия аэрозольных частиц с аэроионами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2010. Спецвыпуск. С. 81–85.
 12. Седунов Ю.С. К теории диффузионного заряжения частиц произвольной формы // Инженерно-физический журнал. 1959. № 12. 57–63.
 13. Смирнов В.В. О физической природе эффекта селективного взаимодействия аэроионов и аэрозолей // Известия АН СССР Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 6. С. 622–626.
 14. Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Экспериментальное исследование дисперсности заряженных

частиц в потоке и на поверхности при электростатическом распылении // Наука. Инновации. Технологии. 2016. № 3. С. 89–95.

15. Филиппов А.Х., Кречетов А.А., Зарифова Н.Г. Результаты исследования атмосферного электричества в Восточной Сибири // Труды 2-го Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 279 с.
16. Фукс Н.А. О величине зарядов на частицах атмосферных аэроколлоидов // Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1947. №4. С. 341–348.
17. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
18. Шварц Я.М., Огуряева Л.В. Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // Метеорология и гидрология. 1987. № 7. С. 59–64.
19. Hoppel W.A., Gathman S.G. Determination of the eddy diffusion coefficients from atmospheric electrical measurements // J. Geoph. Res., 1971. Vol. 76. No. 6. P. 1467–1477.
20. Rudg W.A.D. On some sources of disturbance of the normal atmospheric potential gradient // Proc. Roy. soc. 1914. A. Vol. 90. P. 571–582.

References

1. Adzhiev A.Kh., Vakalov I.A., Kupovyh G.V., Martynov A.A., Shvarts Ya.M. Observations of atmospheric electricity at the high-mountain point Cheget Peak // Abstracts of the 4th All-Union Symposium on Atmospheric Electricity. Nalchik. 1990, 380 p.
2. Zekoreev R.Kh., Kambiev M.M., Mashukov Kh.Kh. Some results of the study of the parameters of atmospheric electricity in the area of the Mukulan quarry (Northern Caucasus) // News of universities. North Caucasian region. Series: Natural Sciences, 2010. Issue 3. P. 43–46.
3. Imyanitov I.M., Chubarina E. V. Electricity of the free atmosphere. L., Gidrometeoizdat, 1965, 240 p.
4. Imyanitov I.M., Chubarina E.V., Shvarts Ya.M. Cloud electricity. L.; Gidrometeoizdat, 1971, 93 p.
5. Kolokolov V.P. and other Measurements of the electric field over the Atlantic and Indian oceans. In: Meteorological Research. M., MGK Publishing House, 1982, No. 27, p. 10–16.

6. Levin L.M. Research on the physics of coarse aerosols. Academy of Sciences of the USSR. M., 1961, 267 p.
7. Oguryaeva L.V., Shvarts Ya.M. Analysis of the long-term variation of atmospheric electricity in the surface layer. Regular measurements of the electrical conductivity of the air. In: Meteorological Research. M., MGK Publishing House, 1982. No. 27. P. 35–48.
8. Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkin I.N., Kudrinskaya T.V., Petrov N.A. Results of long-term expeditionary atmospheric-electrical research in the surface layer // News of universities. North Caucasian region. Series: Natural Sciences, 2010, Special issue. P. 73–76.
9. Pudovkina I.B. Some results of the study of the anomalies of the electric field of the atmosphere in the region of the Baksan Gorge // Proceedings of the Elbrus expedition. 1961. No. 215.
10. Raist P. Aerosols. M.: Mir, 1987. P. 134–145.
11. Redin A.A., Klovo A.G., Kupovyh G.V., Morozov V.N. Space charge generation near the earth's surface, taking into account the interaction of aerosol particles with air ions // News of universities. North Caucasian region. Series: Natural Sciences, 2010, Special issue, p. 81–85.
12. Sedunov Yu.S. On the theory of diffusion charging of particles of arbitrary shape. Engineering Physics Journal, 1959. No. 12. P. 57–63.
13. Smirnov V.V. On the physical nature of the effect of selective interaction of air ions and aerosols // Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean. 1990, t. 26. No. 6. P. 622–626.
14. Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. Experimental study of the dispersion of charged particles in a flow and on a surface during electrostatic spraying // The science. Innovation. Technologies., 2016. No. 3. P. 89–95.
15. Filippov A.Kh., Krechetov A.A., Zarifova N.G. Results of the study of atmospheric electricity in Eastern Siberia. Proceedings of the 2nd All-Union Symposium on Atmospheric Electricity. L., Gidrometeoizdat, 1984, 279 p.
16. Fuchs N.A. On the value of charges on particles of atmospheric aerocolloids. Izv. USSR Academy of Sciences, ser. geogr. i geofiz, 1947. No. 4. P. 341–348.
17. Chalmers J. A. Atmospheric electricity. L., Gidrometeoizdat, 1974, 420 p.

18. Shvarts Ya.M., Oguryaeva L.V. Long-term variation of atmospheric electricity values in the surface layer // *Meteorology and Hydrology*. 1987. No. 7. P. 59–64.
19. Hoppel W.A., Gathman S.G. Determination of the eddy diffusion coefficients from atmospheric electrical measurements // *J. Geoph. Res.*, 1971. Vol. 76. No. 6. P. 1467–1477.
20. Rudg W.A.D. On some sources of disturbance of the normal atmospheric potential gradient // *proc. Roy. soc.* 1914, a. Vol. 90. P. 571–582.

Поступило в редакцию 30.05.2022,
принята к публикации 11.07.2022.

Об авторе

Зекореев Ризуан Хабилович, старший научный сотрудник лаборатории атмосферного электричества, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт». РФ, Кабардино-Лалкарская Республика, г Нальчик, пр. Ленина, 2.
E-mail: zeri54@mail.ru.
Тел. +7 (938) 694 66 74

About the author

Zekoreev Rizuan Khabilovich, Senior researcher, of the laboratory of atmospheric electricity of Federal state budgetary institution «High Mountain Geophysical institute». Russian Federation, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Lenin Ave, 2.
Tel. +7 (938) 694 66 74