

УДК 551.594.1-13

В.Н. Шулейкин

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

О ПРИРОДЕ БИПОЛЯРНЫХ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассматриваются биполярные аномальные отклонения атмосферного электрического поля от фонового уровня за десятки минут, часы перед землетрясением. По принятой классификации, это краткосрочные предвестники землетрясений. Современные представления о природе объемного заряда приземной атмосферы объясняют наблюдаемое явление классическим и реверсивным электродными эффектами – следствием дефицита или избытка поступления в воздух основного ионизатора – почвенного радона. Установлено, что носителями радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу являются пузырьковые образования водорода и метана. Более того, реверсивный и аномальный классический электродные эффекты неоднократно регистрировались не только перед сейсмическими событиями, но и в сейсмостойкий период в разломных зонах, в ходе вариаций уровней грунтовых вод, при деформационных и сейсмоакустических процессах. Связи водорода, метана и радона с полем позволяют отнести его, как и перечисленные газовые параметры, к категории среднесрочных предвестников землетрясений.

Ключевые слова: атмосферное электрическое поле, водород, метан, классический и реверсивный электродные эффекты, уровень грунтовых вод, деформационные и сейсмоакустические процессы, прогноз, землетрясение.

Атмосферно-электрические наблюдения в геофизике. Интерес геофизиков к инструментальным наблюдениям параметров приземного атмосферного электричества возник в связи с проблемой прогноза землетрясений. Впервые аномальные возмущения атмосферного электрического потенциала перед сейсмическими событиями были зарегистрированы в 1885 и 1890 гг. в Токийской обсерватории [42, 43].

В отечественной научной литературе первые результаты наблюдений этих аномалий представлены Е.А. Чернявским [25–27]. Громадная работа по контролю атмосферного электрического потенциала в сейсмоактивном регионе была проведена В.Ф. Бончковским [2, 3] на Гармском прогностическом полигоне. Подробная историческая подборка результатов экспериментальных наблюдений по этому вопросу приведена в работах [19, 20] – регистрируемые аномалии по модулю в несколько раз превышают фоновый уровень, имеют длительность от десятков минут до часов перед землетрясением и биполярный характер.

Предваряя дальнейшее изложение материала, следует уточнить терминологию. Первые измерители электрических характеристик атмосферы были коллекторного типа [10, 21, 25] и регистрировали потенциал атмосферы относительно Земли на высоте установки измерительной пластины. Последние десятилетия в практику атмосферно-электрических наблюдений прочно вошли динамические конденсаторы – флюксометры [10, 21], регистрирующие, по терминологии общей физики, вертикальный градиент потенциала атмосферы [12]. В геофизике для этого параметра чаще используется термин атмосферное электрическое поле (АЭП).

Большое внимание к электромагнитным предвестникам землетрясений приходится на 1970–1980-е годы. Обобщение полученных к тому времени экспериментальных и теоретических результатов достаточно полно изложено в работах [16, 36]; введена временная классификация предвестников землетрясений, по которой АЭП относится к числу краткосрочных. При построении модельных механизмов аномальных возмущений электрических характеристик атмосферы перед сейсмическим событием использовались данные полевых наблюдений и результаты лабораторных исследований образцов горных пород. Однако удовлетворительного модельного представления природы регистрируемых аномальных вариаций АЭП так и не было получено.

Электродный эффект. Рассмотрим регистрируемые биполярные вариации АЭП с позиций современных представлений теории приземного атмосферного электричества. Объемный заряд приземной атмосферы обязан своим происхождением ионизации эксхалирующим почвенным радоном [21, 25]. Образующиеся при ионизации легкие ионы – время жизни 3–5 мин, определяют полярные проводимости воздуха. Рекомбинация легких ионов с нейтральными ядрами конденсации приводит к образованию тяжелых ионов – время жизни 40–50 мин. Тяжелые ионы ответственны за АЭП.

Поверхность Земли несет на себе отрицательный заряд, который приводит к перераспределению объемного заряда приземной атмосферы. Концентрация отрицательного заряда у земной поверхности равна нулю, концентрация положительного заряда – максимальна. По расчетам в зависимости от скорости ионизации, температуры, турбулентности выход объемных концентраций заряда на квазистабильный уровень может происходить на высотах не более 10 м [14, 15]. Область, выше которой объемные концентрации положительного и отрицательного за-

рядов выходят на близкий друг к другу фоновый уровень, определяется как зона проявления электродного эффекта.

Практически все измерения АЭП производятся на высотах первых дециметров–метров относительно поверхности Земли, т. е. по определению, выполняются в зоне действия электродного эффекта. Поэтому рассмотрение причин регистрируемых биполярных вариаций АЭП следует начинать с рассмотрения влияний электродного эффекта на вариации поля в указанном диапазоне высот.

Теория электродного эффекта разрабатывается с середины XX в. [37–41]; в наиболее полном виде ее можно найти в работах [13, 14]. В простейшем случае наличия в атмосфере только легких ионов электрическое состояние атмосферы описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} b_1 d/dz(En_1) &= q(z) - \alpha n_1 n_1, \\ -b_2 d/dz(En_2) &= q(z) - \alpha n_1 n_1, \\ dE/dz &= e/\varepsilon_0(n_1 - n_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где $b_{1,2}$ – подвижность положительных и отрицательных легких ионов; $q(z)$ – скорость ионообразования, определяемая содержанием радона в атмосферном воздухе; $n_{1,2}$ – объемная концентрация положительных и отрицательных легких ионов; E – атмосферное электрическое поле, АЭП; $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ – коэффициент рекомбинации легких ионов; z – вертикальная координата.

Граничные условия для системы уравнений (1) запишем в виде

$$n_{2(z=0)} = 0; \quad E_{z=0} = E_0; \quad n_1(\infty) = n_2(\infty) = [q(\infty)/\alpha]^{1/2}. \quad (2)$$

Решение системы уравнений (1) удается получить численным методом Рунге–Кутты четвертого порядка [12, 13]. Особый интерес представляет результат расчетов для случая разных подвижностей легких ионов: $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$; $b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$ и резкого спада скорости ионообразования с высотой $q = 7 \cdot 10^6 + 80 \cdot 10^6 \exp(-2,362z)$ пар ионов $\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. При этом в зоне проявления электродного эффекта появляется слой с избыточным содержанием отрицательного объемного заряда, в котором отношение $E(z)/E(\infty)$ становится меньше единицы.

Обратим внимание еще на одну оценку, сделанную в предположении, что ионизация у земной поверхности обеспечивается бета- и гамма-излучением приповерхностного слоя почвы и составляющих почвенного воздуха. Полагается, что бета-частицы диссипируют на высоте

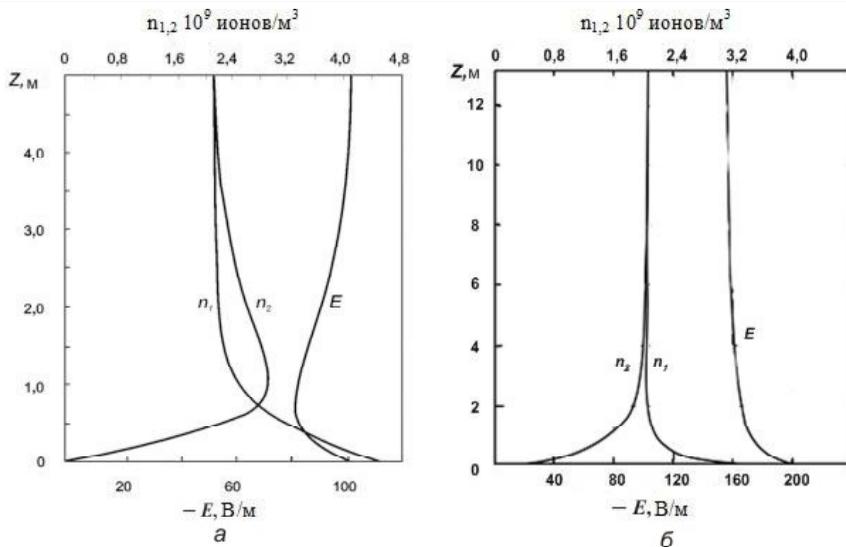


Рис. 1. Реверсивный и классический электродные эффекты при скоростях ионнообразования $q(z) = 7 \cdot 10^6 + 80 \cdot 10^6 \exp(-2,362z)$ пар ионов $\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и $q(z) = [7 \cdot 10^6 + 4,8 \cdot 10^6 \exp(-2,362z) + 50 \text{tg}(8 \cdot 10^{-8} \cdot z^{-4})]$ пар ионов $\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$

3 см относительно земной поверхности. Для скорости ионобразования $q = [7 \cdot 10^6 + 4,8 \cdot 10^6 \exp(-2,362z) + 50 \text{tg}(8 \cdot 10^{-8} \cdot z^{-4})]$ пар ионов $\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ решение показывает, что электродный эффект изменяется весьма незначительно. Зона проявления электродного эффекта в этом случае определяется высотой порядка 4–5 м относительно земной поверхности. Значения АЭП и плотности легких ионов для двух рассмотренных случаев представлены на рис. 1.

Пример вариаций АЭП в случае реверсивного электродного эффекта указывает на тенденцию к смене знака поля на высотах дециметров-метров относительно земной поверхности (рис. 1, а).

К сожалению, при расчетах более сложного случая – наличия в атмосфере тяжелых ионов, для реальных условий, когда концентрации тяжелых ионов на порядок больше концентрации легких, задача решению не поддается. Решение удастся получить только для сравнимых концентраций легких и тяжелых ионов [13, 14]. Тем не менее результаты многочисленных экспериментальных наблюдений, часть которых приведена ниже, убеждают, что реверсивный электродный эффект – достаточно часто наблюдаемое явление и причиной его могут быть не только такие

уникальные аномальные ситуации, как процесс подготовки землетрясения, но естественные или искусственные сравнительно низкоэнергетические геодинамические процессы.

Результаты наблюдений реверсивного и аномального классического электродных эффектов. Высокий молекулярный вес радона – 222 – исключает возможность его обособленной субвертикальной миграции в приповерхностные слои грунта и атмосферы. По мере подъема водно-газовых систем в зоны повышенной проницаемости горных пород растворенные в воде летучие газы стремятся обособиться в самостоятельные фазы в виде отдельных пузырьковых образований. При этом в пузырьках происходит падение давления с увеличением объема – площади контакта пузырьков с жидкостью. Пузырьки становятся природными дегазаторами, куда наряду с другими газами стекает и почвенный радон, образующийся в подземных водно-газовых системах при распаде растворенного радия [7, 8].

По оценкам [1], с учетом периода полураспада радона (3,825 сут) в приповерхностные слои грунта газ-эманация достигает земной поверхности из глубин от 4–6 м – диффузионный механизм переноса, до десятков метров относительно земной поверхности – конвективный механизм переноса. Те же пузырьковые образования выносят сотые, тысячные доли газа-эманации в приповерхностную атмосферу [7, 8, 11]. Согласно положениям теории приземного атмосферного электричества, эксхалирующий почвенный радон – единственный естественный ионизатор атмосферного воздуха [21–23]. В соответствии с оценками [21], в слое воздуха до высот 0,5 км ионизация на 75 % обязана гамма-излучению почвенного радона и на 25 % – космическому излучению; в слое в диапазоне высот (0,5–1,0) км ситуация меняется – 64 % воздуха ионизируется из космоса и только 36 % – почвенным радоном.

Долгое время считалось, что носителями радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу являются все летучие газы почвенного воздуха и пары воды [7, 11]. Однако эксперименты последних лет показали, что в качестве газов-носителей выступают только два из них – водород и радон [29–31]. Для иллюстрации проведем анализ данных полевых наблюдений радона почвенного воздуха и лабораторного анализа проб на содержание водорода, метана, диоксида углерода и азота [11]. Концентрации азота и диоксида углерода меняются в противофазе и охвачены жесткой корреляционной связью $k(N_2; CO_2) = (-0,99)$ при отсут-

стии корреляционной связи с содержаниями метана и водорода $|k(\text{H}; \text{N}_2, \text{CO}_2)| = 0,28; 0,29$. Коэффициент корреляции содержаний водорода и метана очень высок – $k(\text{H}; \text{CH}_4) = 0,96$; коэффициенты корреляции концентраций этих летучих газов с объемной активностью радона тоже достаточно велики: $k(\text{Rn}; \text{H}_2) = 0,84$; $k(\text{Rn}; \text{CH}_4) = 0,89$. Незначительный спад коэффициентов корреляции с объемной активностью радона имеет понятное физическое объяснение – точность лабораторного определения концентраций водорода и метана существенно выше точности полевых измерений объемной активности радона.

Радон является газом-эманацией, продуктом распада радия. Соответственно, его наличие в земной коре определяется распространением материнского вещества.

Ниже приведены данные исследований Биогеохимической лаборатории академика В.И. Вернадского по распространению радия в биосфере Земли, %:

Горные породы	$10^{-9}–10^{-10}$
Почвы	$10^{-10}–10^{-11}$
Растения	10^{-12}
Животные	10^{-13}
Воды рек и морей	$10^{-12}–10^{-14}$

В частности в глинистых породах – водоупорах водоносных горизонтов, среднее содержание радия составляет $1,3 \cdot 10^{-10}$ %, что всего лишь в 2 раза меньше, чем в гранитах – $2,58 \cdot 10^{-10}$ %.

Одной из причин проявления реверсивного электродного эффекта может быть близкий подход к земной поверхности грунтовых вод. В этом случае естественно ждать роста ионизации приземного воздуха из-за повышенного сброса в атмосферу почвенного радона.

В начале лета 2004 г. на оползне у южной окраины хутора Усть-Невинский (Ставропольский край) выполнялись комплексные наблюдения АЭП, радона и водорода почвенного воздуха [33, 34]. Метеорологическая ситуация не способствовала проведению работ: 04.06.04 закончился 3-дневный период дождей и наблюдения были начаты через 2 дня. Запись вариаций АЭП на одном из профилей, проложенном вниз по склону, 240 м, 25 наблюдательных пикетов (рис. 2, нижний график).

В области пикетов 13–17 наблюдения поля не проводились, поскольку профиль здесь проходил через заросший лесом участок, где поле экранируется кустами и деревьями. На пикетах 7 и 18–22 наблюдался спад

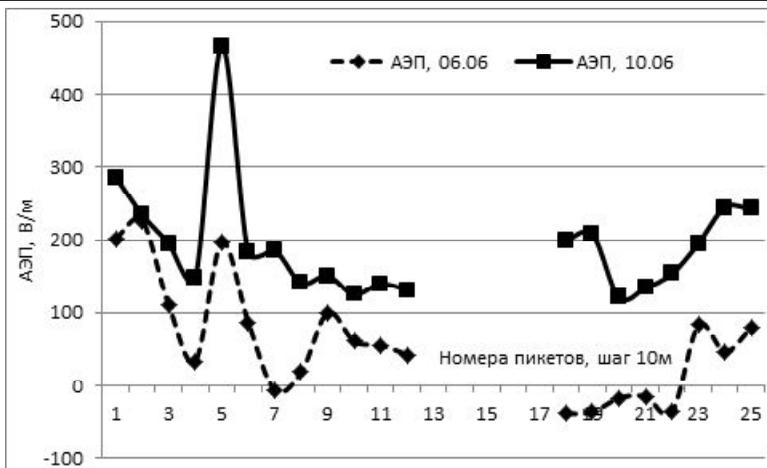


Рис. 2. Результаты наблюдений АЭП 6 и 10 июня 2004 г. по профилю длиной 240 м, секущему сверху вниз тело оползня

поля со сменой знака: пикет 7 – на заболоченном участке тела молодого, активного оползня; пикеты 18, 19 – в конце тела древнего оползня; пикет 19 – ниже кромки уступа оползня; пикеты 20–22 – на надпойменной террасе р. Кубань.

Одновременно с измерениями АЭП на профиле были отобраны радона и водорода почвенного воздуха из пробоотборных скважин глубиной 0,6 м. На пикетах с отрицательными значениями АЭП газовые пробы взять не удалось – на глубине 0,2–0,3 м в пробоотборных скважинах стояла вода.

Повторный цикл измерений на оползне был поставлен 10.06.04 (рис. 2, верхний график). Грунтовые воды практически ушли, значения АЭП меняли знак; средний фоновый уровень на пикетах 1–12 ($E_{1-12} = 199$ В/м) и 18–25 ($E_{18-25} = 187$ В/м) практически сравнялся.

При сравнении данных измерений 06.06.04 и 10.06.04 необходимо обратить внимание на разность между значениями поля по пикетам: по мере спуска по склону она заметно растет. По группе пикетов 1–12 средняя разность $\Delta E_{1-12} = 97$ В/м, по группе пикетов 18–25 – $\Delta E_{18-25} = 178$ В/м. Полученный результат понятен с физической точки зрения – в первую очередь обезвоживается верхняя часть склона. Очень показательна высокая чувствительность абсолютных значений АЭП к близости грунтовых вод к земной поверхности.

Представленный на рис. 2 результат – типичный пример проявления реверсивного электродного эффекта, связанный с близким подходом к земной поверхности грунтовых вод. Явление удалось зарегистрировать инструментально в виде отрицательных значений поля. Измерения выполнялись с использованием флюксметра “Градиент”, установленного для удобства транспортировки на садовую тачку – высота измерительных пластин ~ 0,55–0,6 м относительно земной поверхности.

Рассмотрим еще один пример проявления реверсивного электродного эффекта со сменой знака поля в результате техногенного воздействия на среду. На рис. 3 показаны временные вариации АЭП, зарегистрированные флюксметром “Поле-2” [32, 35]. В скважину на глубину 50 м производилась 30-минутная закачка 30 м³ воды с образованием гидроразрыва. На 20-й минуте относительно начала закачки наблюдается резкий спад сигнала со сменой знака поля до значений от –140 до –150 В/м. Причина спада поля – быстрые деформационные процессы в момент образования гидроразрыва (первые минуты после начала закачки), провоцирующие сжатие порового пространства и, соответственно, мощный локальный выброс ионизатора в атмосферу.

После начала закачки № 1 – 9 минута временной шкалы рис. 3, на 32-й–33-й минуте начинается спад поля со сменой знака, т. е. через 23–24 мин после начала закачки АЭП меняет знак на противоположный. Этот временной интервал соответствует половине времени жизни тяжелых ионов, ответственных за локальное поле (см. выше). Естественно,

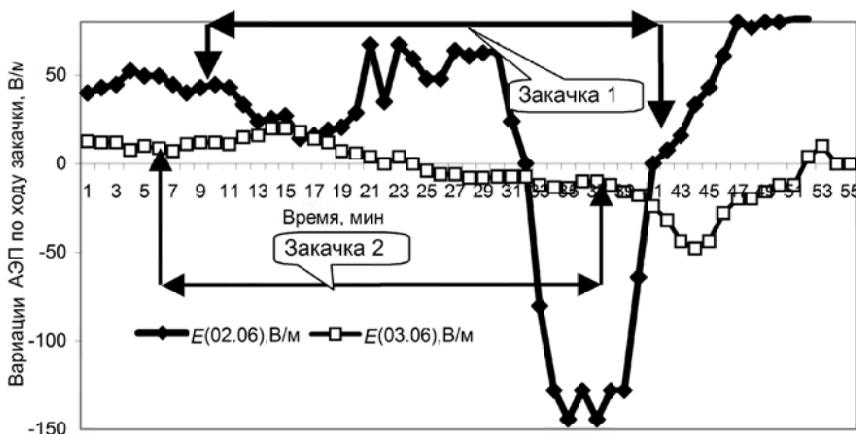


Рис. 3. Вариации атмосферного электрического поля у устья нагнетательной скважины в ходе 1-го и 2-го циклов закачки 30 м³ флюида в грунт на глубину 50 м

что максимальная плотность отрицательного объемного заряда и, соответственно, самое низкое отрицательное поле этого заряда наблюдаются в середине времени жизни тяжелых ионов.

Вероятно, основной выброс ионизатора в атмосферу проходил по затрубному пространству и локализовался у устья нагнетательной скважины – бурение скважины было закончено за сутки до начала эксперимента, скважина не цементировалась. Измерительный инструмент устанавливался непосредственно у устья скважины – высота измерительных пластин ~0,4 м относительно земной поверхности. В момент образования гидроразрыва в окрестности устья скважины установился резкий спад концентрации ионизатора с высотой, что было дополнительным условием образования слоя отрицательного объемного заряда.

Повторная закачка 30 м³ воды в зону гидроразрыва привела к аналогичным вариациям поля у устья нагнетательной скважины, с меньшими амплитудными перепадами, но с сохранением их относительных величин. В ходе закачки № 1 отношение модулей минимальных отрицательных значений поля к фону до начала цикла составляло ~4, при закачке № 2 отношение сохранилось на уровне величины (4–5).

Контроль АЭП у устья нагнетательной скважины проводился на территории станции захоронения радиоактивных отходов, где геологическая среда на время производства работ уже была достаточно насыщена радионуклидами. Измерения ставились в ясный солнечный день – облачность 0 баллов, практически полное безветрие, метеорологическая ситуация соответствовала условиям “хорошей погоды” [17,18], когда фоновые значения АЭП должны были составлять 100–150 В/м.

Тем не менее у устья нагнетательной скважины были зарегистрированы весьма низкие значения поля ~40 В/м еще до начала закачки № 1 – временной интервал до 9-й минуты (рис. 4); вследствие дополнительного сброса ионизатора из грунта в атмосферу после закачки № 1 к началу закачки № 2 фоновые значения еще упали в 4 раза до уровня ~10 В/м – временной интервал до 7-й минуты (см. рис. 3). Все это позволяет утверждать, что реверсивный электронный эффект, но без смены знака поля, на высоте измерительных пластин флюксметра имел место еще до начала экспериментов.

Специфика предприятия, на территории которого проводились наблюдения, не позволила оставить флюксметр на непрерывную регистрацию после 1-го цикла закачки. Продолжение наблюдений было начато утром

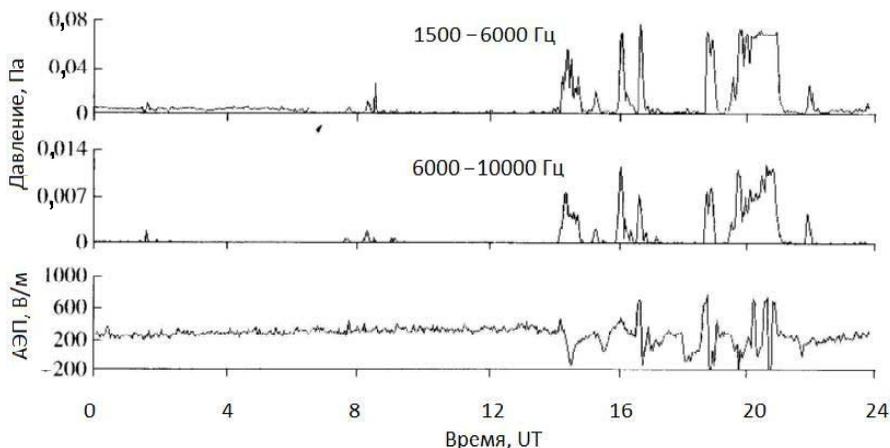


Рис. 4. Вариации АЭП, вызванные ростом уровня сейсмоакустических шумов в диапазоне частот 1,5–10 кГц [15]

следующего дня, через 18 ч после 1-го цикла закачки. Сброс избыточного давления из области гидроразрыва за этот временной интервала увеличил объемную концентрацию ионизатора в атмосферном воздухе – фоновый уровень поля на начало закачки № 2 ~10 В/м. Сжатие приповерхностных слоев грунта из-за уже образованного гидроразрыва было заметно меньше. В результате регистрируемые вариации АЭП в ходе 2-го цикла закачки наблюдались с 4-кратным ослаблением.

Очень близкий результат по временной задержке спада АЭП с переплюсовкой описан в работе [15]. Проводилась одновременная регистрация поля и акустических шумов в частотном диапазоне 1,5–10 кГц (рис. 4).

Синхронные записи этих двух параметров показывают, что через 20–30 мин после резкого увеличения уровня акустических шумов, около 14 ч UT, наблюдается спад поля со сменой знака. Другими словами, как и в случае гидроразрыва, стимулированный вынос ионизатора в атмосферу приводит к отрицательным значениям поля на середине времени жизни тяжелых ионов. Разница в том, что в качестве стимулирующего воздействия, приведшего к росту объемной концентрации тяжелых ионов, выступает акустическая эмиссия, а не избыточное давление.

На рис. 5 представлены результаты 3 повторных АЭП-профилеирований 19-километровой трассы Хасавьюрт–Дылым, Дагестан. Измерения выполнялись флюксометром “Поле-2”, установленном на крыше автомобиля УАЗ-452, – высота пластин измерительного инструмента 2,3–

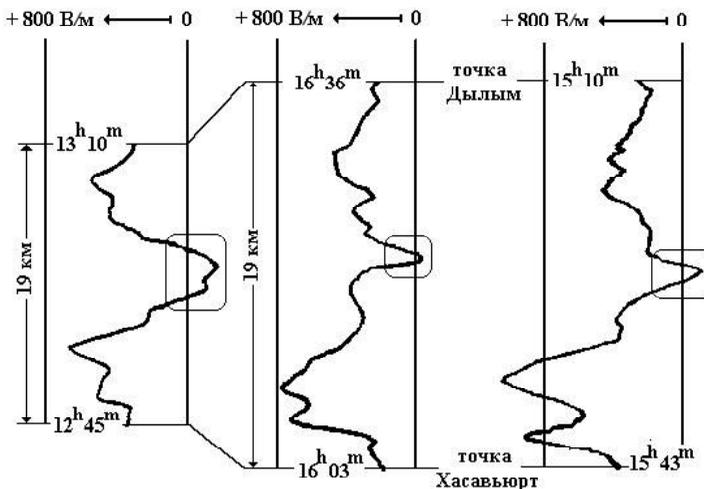


Рис. 5. Результаты повторных профильных измерений АЭП на маршруте Хасавьют–Дылым (Дагестан)

2,4 м относительно земной поверхности. Условия наблюдений были идеальны – открытая равнинная местность, отсутствие транспорта на трассе, – метеорологическая ситуация соответствовала условиям “хорошей погоды” [16, 17].

В центральной части маршрута на отрезке протяженностью ~1 км зарегистрирован уверенно повторяющийся спад поля со сменой знака до величины $\sim(-100)$ В/м. Здесь наблюдательный профиль пересекает разломную зону р. Акташ. В зоне разлома естественно ожидать интенсификации воздухообмена почва/атмосфера – интенсификации глубинных субвертикальных потоков водорода и метана, что в итоге и приводит к аномальному выносу ионизатора в приповерхностную атмосферу – где на километровом отрезке зарегистрированы отрицательные значения АЭП.

Аналогичные эффекты, но на меньших амплитудных перепадах зарегистрированы в Белоруссии, под г. Гомель [7]. При пересечении Александровской разломной структуры здесь наблюдается практически двукратный спад поля относительно фона, регистрируемого на бортах разлома. То же имело место при АЭП-профилировании Рыльско-Кимрского разлома на Калужской кольцевой структуре [11].

Аномально высокие значения АЭП – классический электродный эффект при дефиците ионизатора в атмосфере – удалось наблюдать в

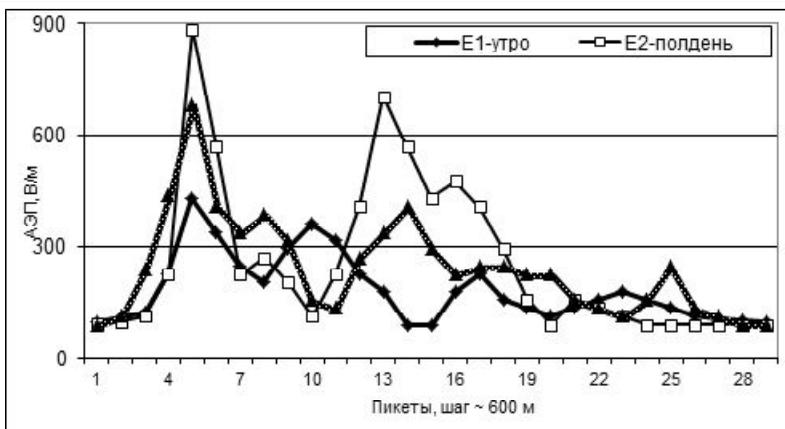


Рис. 6. Пространственные вариации АЭП на трассе Светлогорск–Узнож над зоной городского водозабора

ходе профільних АЭП-наблюдений на трассе Узнож–Светлогорск, Белоруссия. Профиль проходил вблизи городской водозаборной станции: глубина эксплуатационного горизонта порядка 80 м при мощности около 20 м [32, 33]. Наблюдения проводились с использованием двух измерительных инструментов – стационарного и мобильного флюксометров “Поле-2”. Стационарный флюксометр непрерывно работал в контрольной точке – на полигоне “Узнож”, мобильный – устанавливался на крыше автомобиля УАЗ-452 и использовался для контроля АЭП на трассе.

На рис. 6 представлены три отобранных примера вариаций поля на профиле 17,2 км. Метеорологическая ситуация при проведении наблюдений соответствовала условиям “хорошей погоды”. Зарегистрированный стационарным флюксометром фон АЭП в контрольной точке варьировал от 90 до 110 В/м.

Обращают на себя внимание пиковые амплитуды поля в непосредственной близости от водозаборной станции – отметка 5 наблюдательного профиля, 2,4 км от его начала. В утренние часы, днем и вечером эти пиковые амплитуды доходят до значений ~400 В/м, ~900 В/м и ~600 В/м. Причина аномально высоких значений поля – наличие депрессионной воронки, образованной в эксплуатационном пласте при водозаборе и вытянутой в направлении Светлогорск–Узнож. Понятно, что депрессионная воронка минимизирует воздухообмен почва–атмосфера, что и приводит к спаду эксхалиции почвенного радона.

Заключення. Примеры реверсивного электродного эффекта наглядно иллюстрируют возможность смены знака АЭП в результате близкого подхода к земной поверхности грунтовых вод, деформационных процессов, акустической эмиссии, интенсификации воздухообмена почва–атмосфера в разломной зоне. Дополнительные примеры последнего явления, но уже без смены знака АЭП, представлены [7, 11], где наблюдательные профили пересекали Александровский (Белоруссия) и Рыльско-Кимрский разломы (Калужская кольцевая структура).

Классический электродный эффект с аномально высокими значениями поля – следствие минимизации воздухообмена почва–атмосфера. Причиной его проявления может быть спад уровня грунтовых вод – наличие депрессионной воронки у городской водозаборной станции г. Светлогорск, Белоруссия.

Все отмеченные стимулирующие процессы характерны для эпицентральной зоны готовящегося землетрясения [9], где они могут протекать существенно интенсивнее. Как отрицательные, так и положительные амплитудные возмущения АЭП вызываются избыточной или недостаточной эксхалацией почвенного радона и могут достигать многих сотен вольт на метр. Отклик параметров приземного атмосферного электричества на изменение режима эксхалации почвенного радона будет наблюдаться с запаздыванием в минуты при изменении полярной проводимости воздуха и с запаздыванием 20–30 мин при изменении АЭП.

Приведенные примеры описаны с позиции радонового механизма ионизации приземной атмосферы. Почвенный радон и один из его носителей – водород, в свою очередь, по упомянутой выше классификации, характеризуются как среднесрочный предвестниковый параметр. При этом ввиду малых глубин, из которых радон поступает в приповерхностные слои грунта и атмосферу, его следует, видимо, рассматривать как трассер, отслеживающий интенсификацию сброса в атмосферу летучих газов-носителей.

В работах [4–6, 22], выполненных в сейсмоактивных регионах, отмечены трендовые вариации содержания водорода в приповерхностных слоях грунта длительностью декады–месяцы перед сейсмическими событиями. Представленные факты заставляют рассматривать параметры приземного атмосферного электричества не только как возможный краткосрочный предвестник, но и как среднесрочный предвестник землетрясений. Характерные для радона и водорода долговременные трен-

довые вариации перед сейсмическими событиями неизбежно должны отразиться в аналогичных вариациях АЭП или полярной проводимости приземного воздуха.

1. *Баранов В.И.* Радиометрия. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 343 с.
2. *Бончковский В.Ф.* Землетрясения и методы их изучения. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – 88 с.
3. *Бончковский В.Ф.* Измерения градиента электрического потенциала в атмосфере, как один из возможных предвестников землетрясений // Тр. Геофиз. ин-та. – 1954. – № 25 (125). – С 192–206.
4. *Войтов Г.И., Николаев И.Н., Рудаков В.П. и др.* О потоке водорода в приземную атмосферу в геодинамически различных геоструктурных зонах Земли // Докл. РАН 1995. – Т. 344, № 1. – С. 110–114.
5. *Войтов Г.И., Рудаков В.П.* Водород атмосферы подпочвенных отложений, его мониторинг и прикладные возможности // Изв. РАН. Физика Земли. – 2000. – № 6. – С. 83–91.
6. *Войтов Г.И.* Нестабильности потоков метана в холодной дегазации Земли // Геохимия. – 2000. – № 3. – С. 309–316.
7. *Войтов Г.И., Гусев А.С., Шулейкин В.Н. и др.* Эманационные (водород-радоновые) и электрические эффекты над сложнопостроенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны предразломных поднятий, Белоруссия) // Докл. РАН. – 2000. – Т. 370, № 1. – С. 105–108.
8. *Гергедава Ш.К., Бузинов С.Н., Шулейкин В.Н. и др.* Нетрадиционная геофизика для подземных хранилищ газа // Нефть, газ и бизнес. – 2001. – № 5(43). – С. 2–6.
9. *Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонических землетрясений. – М.: Наука, 1991. – 219 с.
10. *Имянитов И.М., Чубарина Е.В.* Электричество свободной атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965. – 240 с.
11. *Козлова Н.С., Рудаков В.П., Шулейкин В.Н. и др.* Эманационные и электрические эффекты в атмосфере подпочв над Калужской импактной кольцевой структурой // Рос. журн. наук о Земле. – 1999. – Т. 1, № 6. – С. 503–510.
12. *Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.* Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1976. – 255 с.
13. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: ТРТУ, 1998. – 122 с.
14. *Куповых Г.В.* Электродный эффект в приземном слое атмосферы: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Нальчик, 2005. – 35 с.
15. *Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А. и др.* О связи высокочастотной акустической эмиссии с электрическим полем в приземном слое атмосферы // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 5. – С. 71–76.
16. *Поиск электромагнитных предвестников землетрясений* // Под ред. проф. М.Б. Гохберга. – М.: Ин-т физики Земли АН СССР, 1988. – 243 с.
17. *Руководство по наземным наблюдениям за элементами атмосферного электричества.* – Л.: ГГО им. А.И. Воейкова, 1960. – 95 с.

18. Семенов К.А. Хорошая погода и элементы атмосферного электричества // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. – 1982. – Вып. 455. – С. 112–119.
19. Сидорин А.Я. О возмущениях градиента электрического потенциала атмосферы на Гармском полигоне в 1949–1950 гг. // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. – М.: ОИФЗ РАН, 2000. – С. 148–165.
20. Сидорин А.Я. Возмущения атмосферного электрического потенциала и землетрясения на Гармском полигоне // Сейсмические приборы. – М.: ОИФЗ РАН, 2000. – Вып. 33. – С. 78–95.
21. Тверской П.Н. Курс метеорологии. – Л.: Гидрометиздат, 1951. – 887 с.
22. Стыро Б.И. Вопросы ядерной метеорологии. – Вильнюс, 1959. – 418 с.
23. Стыро Б.И. Самоочищение атмосферы от радиоактивных загрязнений. – Л., 1968.
24. Урдуханов Р.И., Войтов Г.И. Водород атмосферы подпочв в реакции на Дагестанские землетрясения 23.12.1998, 31.01.21.02 и 15.04.1999 г. // Изв. РАН. Физика Земли. – 2001. – № 4. – С. 77–80.
25. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометиздат, 1974. – 247 с.
26. Чернявский Е.А. Электрическая буря // Бюл. САГУ. – 1925. – № 10. – С. 157–162.
27. Чернявский Е.А. Атмосферно-электрические и электротеллурические явления при землетрясениях // Социалист. наука и техника. – 1935. – № 12.
28. Чернявский Е.А. Атмосферно-электрические предвестники землетрясений // Метеорология и гидрология в Узбекистане. – Ташкент: ФАН, 1955. – С. 317–327.
29. Шулейкин В.Н. Косвенный контроль концентрации метана над углеводородными скоплениями – методика, метрология // Материалы Междунар. конф. “Фундаментальные проблемы нефтегазовой гидрологии”. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 551–555.
30. Шулейкин В.Н. Результаты косвенного контроля метана на территориях ПХГ// Материалы Междунар. конф. “Фундаментальные проблемы нефтегазовой гидрологии”. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 555–559.
31. Шулейкин В.Н., Рuzниченко А.П., Пуцина Л.В. О связях метана, водорода и радона почвенного воздуха // Материалы Всерос. конф. “Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы”. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 544–547.
32. Шулейкин В.Н., Шубик Б.М., Барабанов В.Л. Физико-технические проблемы геофизики нефти и газа. – М.: ООО “ФЭД”, 2005. – 198 с.
33. Шулейкин В.Н., Зиновьев В.В., Варягов С.А. и др. Оценка напряженного состояния оползня, спровоцированного прокладкой трубопровода, по результатам нетрадиционных геофизических наблюдений // Технологии ТЭК. – 2005.
34. Шулейкин В.Н., Рuzниченко А.П., Пуцина Л.В. Атмосферно-электрический и газовый мониторинг напряженного состояния среды в зоне прокладки трубопровода // Геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса. – М., 2005. – С. 164–173.
35. Шулейкин В.Н. Атмосферное электричество и физика Земли. – М.: ООО “ФЭД”, 2006. – 159 с.
36. Электромагнитные предвестники землетрясений // Под ред. акад. М.А. Садовского. – М.: Наука, 1982. – 88 с.
37. Chalmers J.A. The theory of electrode effect. I // J. Atm. and Terr. Phys. – 1966. – Vol. 28. – P. 565–572.
38. Chalmers J.A. The theory of electrode effect. II // Ibid. – 1966. – Vol. 28. – P. 573–579.
39. Chalmers J.A. The theory of electrode effect. III // Ibid. – 1966. – Vol. 28. – P. 1029–1033.

40. *Chalmers J.A.* The theory of electrode effect. IV // *Ibid.* – 1967. – Vol. 29. – P. 217–219.
41. *Crozier W.D.* Atmospheric Electrical Profiles below Three Meters // *J. Geophys. Res.* – 1965. – Vol. 70, N 20. – P. 2785–2790.
42. *Milne J.* Seismic experiments // *Trans. Seismol. Soc. Jap.* – 1885. – P.1.
43. *Milne J.* Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena // *Ibid.* – 1890. – Vol. 15. – P. 135–162.

Про природу біполярних варіацій атмосферного електричного поля В.М. Шулейкін

Розглянуто біполярні аномальні відхилення атмосферного електричного поля від фонового рівня за десятки хвилин, години перед землетрусом. За прийнятою класифікацією, це короткострокові передвісники землетрусів. Сучасні уявлення про природу об'ємного заряду приземної атмосфери пояснюють спостережуване явище класичним і реверсивним електродними ефектами – наслідком дефіциту або надлишку надходження у повітря основного іонізатора – ґрунтового радону. Встановлено, що носіями радону у приповерхневій шарі ґрунту і атмосфери є бульбашкові утворення водню і метану. Більш того, реверсивний і аномальний класичний електродні ефекти неодноразово зареєстровано не лише перед сейсмічними подіями, а й у сейсмоспокійний період у розломних зонах, у ході варіацій рівнів ґрунтових вод, за деформаційних і сейсмоакустичних процесів. Зв'язок водню, метану і радону з полем дає змогу віднести його, як і зазначені газові параметри, до категорії середньострокових передвісників землетрусів.

Ключові слова: атмосферне електричне поле, водень, метан, класичний і реверсивний електродні ефекти, рівень ґрунтових вод, деформаційні і сейсмоакустичні процеси, прогноз, землетрус.

The nature of bipolar variations of atmospheric electric field V.N. Shuleykin

The subject of this work are bipolar abnormal deviations of the atmospheric electric field from the background level in minutes and hours before earthquake. According to the accepted classification they are short-term foreshocks of an earthquake. Modern conceptions of the nature of the surface atmosphere volume charge explain observable phenomenon by classical and reversive electrode effect – i.e. deficiency or surplus of supply of the main ionizer – soil radon to the air. It is established that radon carriers to the near-surface layers of earth and the atmosphere are bubble formations of hydrogen and methane. Moreover, reversive and abnormal classical electrode effects were registered many times not just before seismic events, but also during the seismic quiet period in rupture zones, during variations of ground waters levels and deformation and seismoacoustic processes. Bonds of hydrogen, methane and radon with electric field allow to rate it, as well as the above-listed gas parameters, to the category of medium-term foreshocks of earthquakes.

Keyword: atmospheric electric field, hydrogen, methane, classical and reversive electrode effect, ground waters levels, deformation and seismoacoustic processes, foreshocks, earthquake.