

## АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОДЗЕМНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ

В.Н. Шулейкин  
ИПНГ РАН, e-mail: shvn1947@yandex.ru

### Введение

Уже многие десятилетия практикуется подземное захоронение отходов нефтегазодобывающей промышленности и радиоактивных отходов. [1–3]. Закачка флюида в землю приводит к сжатию покрывающих пород, уменьшению объема порового пространства приповерхностных слоев грунта. Этот процесс можно зарегистрировать по увеличению концентрации одного из летучих газов, в частности водорода, чувствительность современных датчиков которого достаточна для регистрации вариаций летучего газа в атмосферном воздухе [4, 5]. Однако оперативная регистрация содержания водорода занимает 5–7 минут, тогда как в рассматриваемой задаче получение информации необходимо в непрерывном режиме [2, 3].

В последние годы установлены жесткие связи между водородом, метаном, радоном и полярными проводимостями (ПП) и атмосферным электрическим полем (АЭП) [2, 3, 6], доказана высокая чувствительность элементов приземного атмосферного электричества к режиму эксхалиции радона. Рассмотрим ряд примеров вариаций элементов приземного атмосферного электричества над зонами закачки и отбора флюида с учетом сейсмических, гидрогеологических и метеорологических влияний на эксхалиционные процессы.

### Результаты наблюдений АЭП над областями закачки флюида

Пузырьковые образования водорода и метана являются единственными газами-носителями (с глубин 4–6 м) радона в приповерхностную атмосферу [2, 3]. К сожалению, на газохранилищах в искусственно выбранных пластах-коллекторах имеет место избыточный сброс горючего газа в покрывающие породы. Это значит, что сжатие приповерхностного порового пространства в процессе закачки приведет к росту эксхалиции радона еще и за счет метана. Нивелировки, проведенные на Краснопартизанском ПХГ (Украина), зафиксировали вертикальное поднятие грунта до 2 см [7], что подтверждает обязательное наличие сжатия. Рассмотрим, как это сказывается на вариациях АЭП над зоной объема закачки.

Работы, проводимые на территории одного из старейших подобных газохранилищ – Щелковском в 1999 и 2000 гг., подтверждают высказанное предположение: АЭП

первых 300–400 м (в зоне куста нагнетательных скважин) заметно ниже последующих значений (рис. 1).

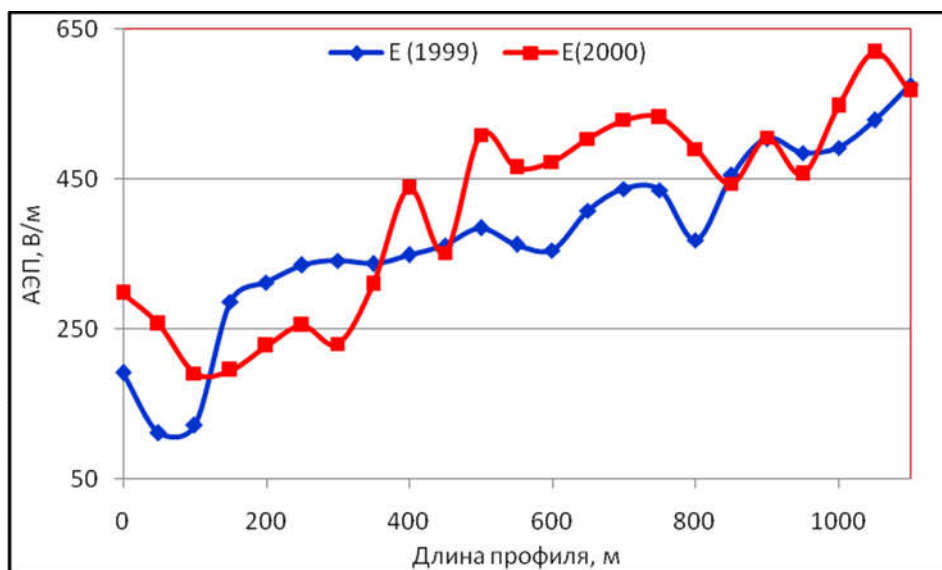


Рис. 1. Вариации АЭП на территории куста нагнетательных скважин Щелковского ПХГ

Всего на территории Щелковского ПХГ было заложено 11 профилей, на которых в 1999 и 2000 гг. проводились наблюдения АЭП. Средние значения поля над объемом закачки и за его пределами представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Средние значения поля над объемом закачки и за его пределами**

	АЭП над объемом закачки	АЭП за пределами объема закачки
Наблюдения 1999 г.	284 В/м	557 В/м
Наблюдения 2000 г.	368 В/м	599 В/м

В отличие от вариаций поля под Щелковым, над контуром Касимовского газохранилища провал АЭП менее контрастен. Средние значения поля по отрезкам трех профилей над объемом закачки – 138, 136 и 140 В/м. Значения поля за пределами проекции зоны объема закачки на поверхность – 184–240 В/м.

В сентябре 2009 г. на территории 4-й очереди Касимовского ПХГ на 7-й день после завершения недельного цикла закачки на 152 пикетах (8 пикетов вокруг каждой скважины) была проведена мобильная съемка АЭП. Средние значения поля по выделенным пяти группам скважин представлены на рис. 2. Полученный результат позволяет утверждать, что горючий газ за 7 дней после завершения цикла закачки

практически весь ушел к купольной части крыши, находящейся в юго-западном направлении от куста нагнетательных скважин. На момент наблюдений практически весь газ ушел к купольной части ПХГ, а его остатки находились только в зоне 421-й и 431-й скважин. Из величин АЭП (см. рис. 2) следует, что сжатие приповерхностного порового пространства происходит не только в ходе цикла закачки, но и после его завершения, при растекании горючего газа по пласту-коллектору.

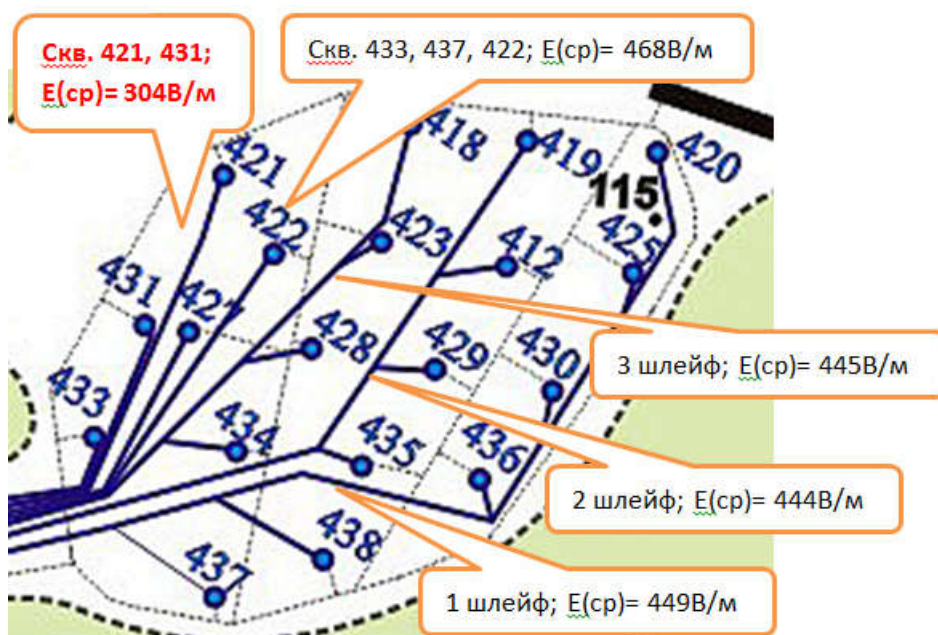


Рис. 2. Средние значения АЭП по выделенным пяти группам скважин на 7-й день после завершения цикла закачки

Аналогичный результат удалось наблюдать в сентябре 2000 г. и в начале июля 2003 г. на одном из профилей Касимовского ПХГ, отрезок которого лежит на линии от куста нагнетательных скважин к купольной части крыши (рис. 3). Для удобства сравнения вариации поля представлены в относительных единицах (нормированные на максимальное значение контролируемого параметра). Всплеск поля на отрезке 1200–3200 м в 2000 г. сменяется провалом в 2003 г. Причина наблюдаемых различий кроется во временной задержке измерений относительно цикла закачки горючего ископаемого. В 2003 г. измерения проводились с задержкой 2 месяца относительно начала закачки, когда газ активно уходил к купольной части крыши; в 2000 г. газ уже ушел к куполу.

Рассмотрим результаты наблюдений АЭП над зоной закачки флюида в грунт с образованием гидроразрыва. Закачка контрольного флюида – воды осуществлялась через нагнетательную скважину, забуренную на глубину 50 м, скорость закачки  $\sim 1 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

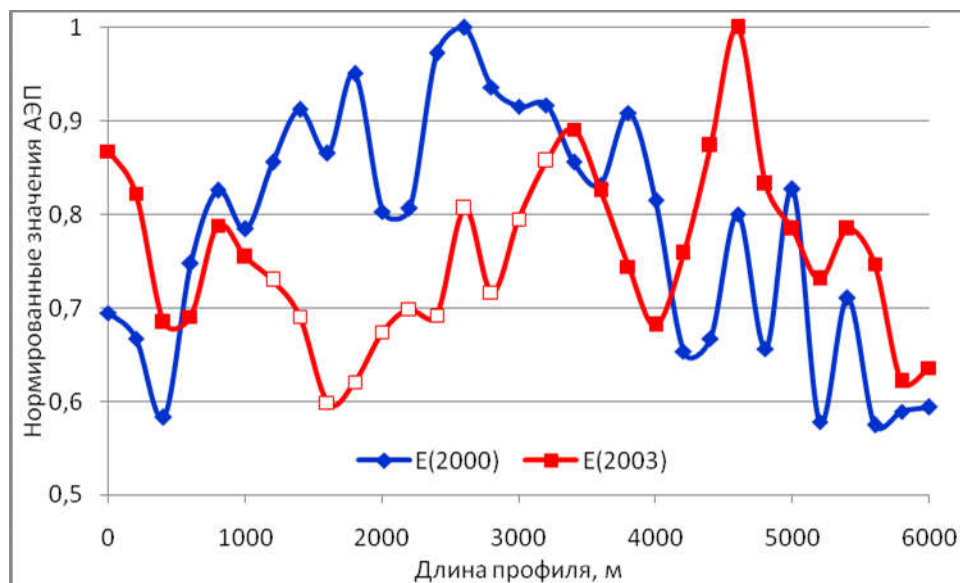


Рис. 3. Результаты профильных наблюдений АЭП на профиле, отрезок которого (1200–3200 м) лежит на линии от куста нагнетательных скважин к купольной части покрышки.

По скачку давления на устье нагнетательной скважины видно, что гидроразрыв образовался при давлении 10,5 атм (15,5 атм в зоне гидроразрыва) приблизительно через 2,5 минуты после начала закачки. Далее наблюдался спад давления на величину  $\sim 2,5$  атм с последующей стабилизацией на уровне 7,0 атм.

На рис. 4 представлены вариации АЭП, зарегистрированные у устья нагнетательной скважины флюксометром «Поле-2». Через 2,5–3,0 минуты после начала закачки наблюдается спад сигнала до (10–15) В/мот фонового уровня поля (40–50) В/м. Причиной зарегистрированного спада АЭП следует считать образование приповерхностного пылевого облака, несущего на себе отрицательный заряд при ударном воздействии гидроразрыва.

Особый интерес представляет резкий спад сигнала со сменой знака поля до величин порядка  $[(-140)–(-150)]$  В/м, который начинается приблизительно на 20-й минуте после начала закачки и достигает минимальных значений на 24–26-й минуте, – ярко выраженный реверсивный электродный эффект [1, 3, 8].

Деформационные процессы, вызванные началом закачки, и ударное воздействие гидроразрыва привели к мощному импульсному выбросу ионизатора. В этом случае максимальная плотность тяжелых ионов наблюдалась на середине их времени жизни – через 20–25 минут [1, 3].

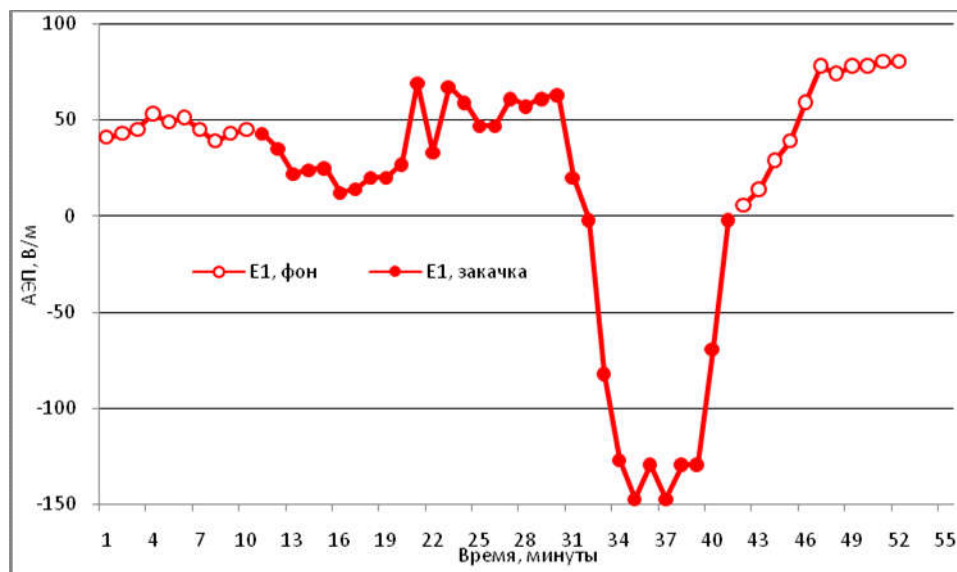


Рис. 4. Вариации атмосферного электрического поля в ходе цикла закачки  $30 \text{ м}^3$  флюида в грунт на глубину 50 м

По условиям работы, на предприятии флюксметр нельзя было оставить на непрерывную регистрацию на ночь. Однако утром следующего дня, через 15 часов, АЭП упало до фонового уровня  $\sim 10 \text{ В/м}$  – следствие ухода закаченного флюида в покрывающие породы с дополнительным выбросом ионизатора в атмосферу.

#### **Сейсмическое, гидрогеологическое и барическое влияние на изменения элементов приземного атмосферного электричества**

В декабре 1992 года в окрестности г. Сасово (Рязанская область) проводились профильные АЭП наблюдения (рис. 5). Один из профилей, протяженностью  $\sim 1000 \text{ м}$ , отходил под углом  $30^\circ$  от маневровых железнодорожных путей, на которых шло непрерывное формирование составов.

По мере удаления от железной дороги наблюдался уверенный рост АЭП; после разворота вариации поля зеркально повторились. Превышение сигнала в точке разворота над фоновым сигналом у железной дороги составило величину  $\sim 200 \text{ В/м}$ . Сейсмических наблюдений не проводилось, однако у железной дороги колебания ощущались «ногами», т.е. имели амплитуду не менее десятых долей миллиметра.

В процессе регистрации ПП над линией метро с глубиной заложения  $\sim 30 \text{ м}$  был зафиксирован рост сигнала на 30–40% от фонового уровня при прохождении поезда. Как и при наблюдениях в Сасово, причиной роста сигнала явилось увеличение эксхалации почвенного радона, стимулированное техногенными сейсмическими шумами (диапазон 5–25 Гц) – рис. 6.

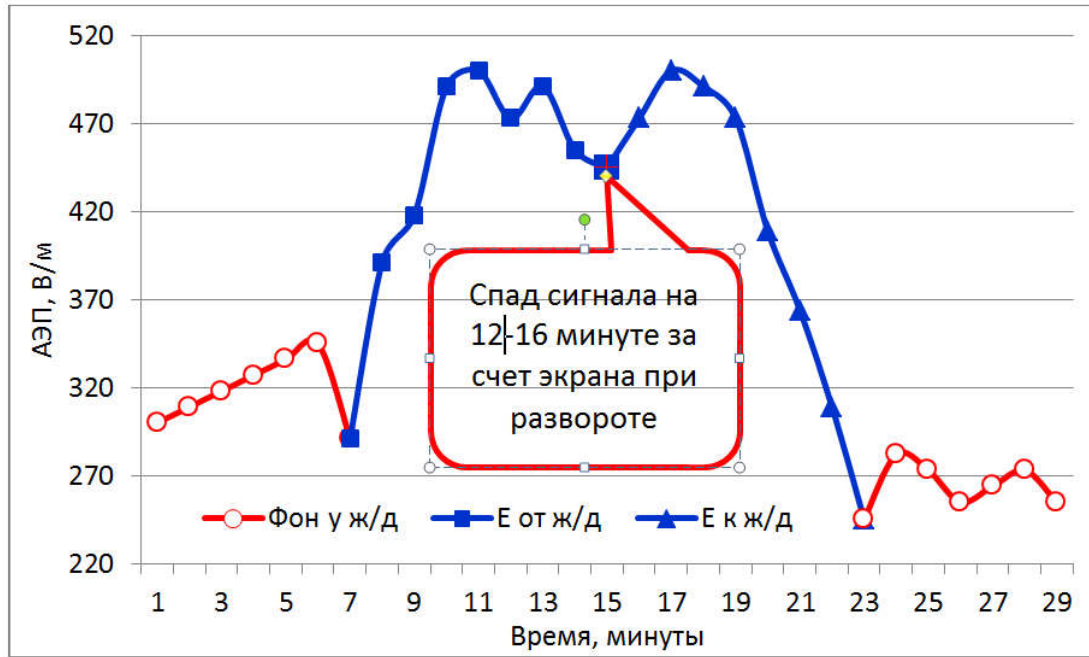


Рис. 5. Вариации АЭП на профиле от железнодорожных путей и обратно. 14-я–16-я минута записи – разворот

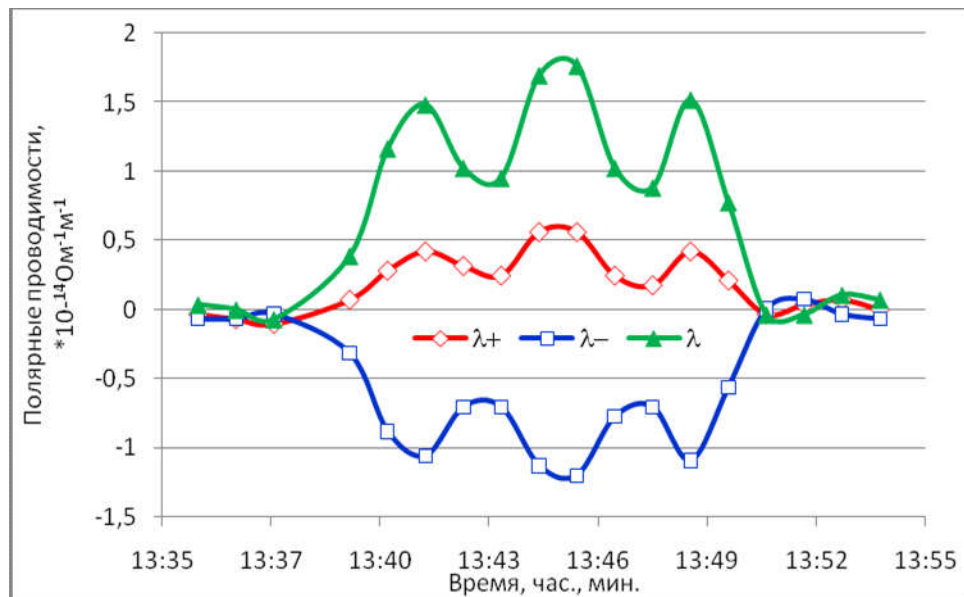


Рис. 6. Полярные проводимости воздуха над линией метро глубокого заложения. 13<sup>h</sup>41<sup>m</sup>, 13<sup>h</sup>45<sup>m</sup>, 13<sup>h</sup>49<sup>m</sup> – прохождение поезда метро; 13<sup>h</sup>36<sup>m</sup>–13<sup>h</sup>38<sup>m</sup>, 13<sup>h</sup>51<sup>m</sup>–13<sup>h</sup>54<sup>m</sup> – запись нуля

При гидроразрыве (рис. 4) АЭП достигало экстремальных значений на середине времени жизни тяжелых ионов. Время жизни легких ионов 3–5 минут [1, 9, 10], а их максимальные значения относительно фона до начала прохождения поезда достигаются через 1–2 минуты – также на середине времени жизни, но уже легких ионов.

Комплексный анализ результатов режимных наблюдений глобальных океанических микросейсм Северной Атлантики периодов 4–9 с (сейсмостанция Пулково, Ленинградская область), уровней воды в наблюдательных скважинах  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  и АЭП (обсерватория Воейково ГГО им. А.И. Воейкова, Ленинградская область) показал наличие связей между рассматриваемыми параметрами практически на всем 2-летнем массиве данных.

Таблица 2

**Модули коэффициентов корреляции уровней воды в скважинах, амплитуды микросейсм, измеренных и расчетных значений АЭП**

$k(z_1, E_{\text{изм}}) = 0,715$	$k(A, E_{\text{расчет}}) = 0,217$	<b><math>k[E_{\text{изм}}, E(z_1)] = 0,715</math></b>
$k(z_2, E_{\text{изм}}) = 0,272$	$k(z_1, E_{\text{расчет}}) = 0,925$	<b><math>k[E_{\text{изм}}, E(z_1, z_2)] = 0,776</math></b>
$k(z_3, E_{\text{изм}}) = 0,417$	$k(z_2, E_{\text{расчет}}) = 0,319$	<b><math>k[E_{\text{изм}}, E(z_1, z_2, z_3)] = 0,783</math></b>
$k(A, E_{\text{изм}}) = 0,112$	$k(z_3, E_{\text{расчет}}) = 0,517$	<b><math>k[E_{\text{изм}}, E(z_1, z_2, z_3, A)] = 0,786</math></b>

Из представленных в табл. 2 расчетов следует, что на вариации АЭП основное влияние оказывает изменение уровня верховодки  $z_1$  (зеркало  $\sim 6$  м). Однако в периоды микросейсмических бурь, длительностью 3–5 суток, ситуация резко меняется. Модули коэффициентов корреляции между амплитудой микроколебаний  $A$  и полем  $E_{\text{изм}}$  существенно больше:  $|k(E_{\text{изм}}, A)_{05-09.02}| = 0,7$ ,  $|k(E_{\text{изм}}, A)_{27.02-03.03}| = 0,84$  [2, 11, 12, 13]. Увеличение амплитуд микросейсм на порядок немедленно вызывает спад поля со сменой знака и совпадает по времени проявления с микросейсмической бурей.

При исследованиях напряженного состояния грунта у контрафорсов аварийного здания, построенного на насыпной ступени на левом берегу реки Москва, регистрировались ПП воздуха. Полагалось, что в состоянии сжатия полярные проводимости минимальны, в состоянии растяжения – максимальны. Установлено, что отношение контролируемых параметров выше и ниже работающего контрафорса у торца аварийного здания составляет порядок: эксхалляция радона над участком геологической среды в состоянии растяжения более чем в 10 раз выше его эксхалляции над участком в состоянии сжатия.

В ходе комплексных наблюдений акустических шумов в диапазонах 1,5–6,0 кГц, 6,0–10,0 кГц и АЭП камчатские исследователи зафиксировали спад поля со сменой знака после увеличения уровня шумов на порядки [14]. Минимальные отрицательные значения

поля достигаются примерно через 20 минут после роста акустического шума, а этот временной интервал близок к середине времени жизни тяжелых ионов (рис. 7).

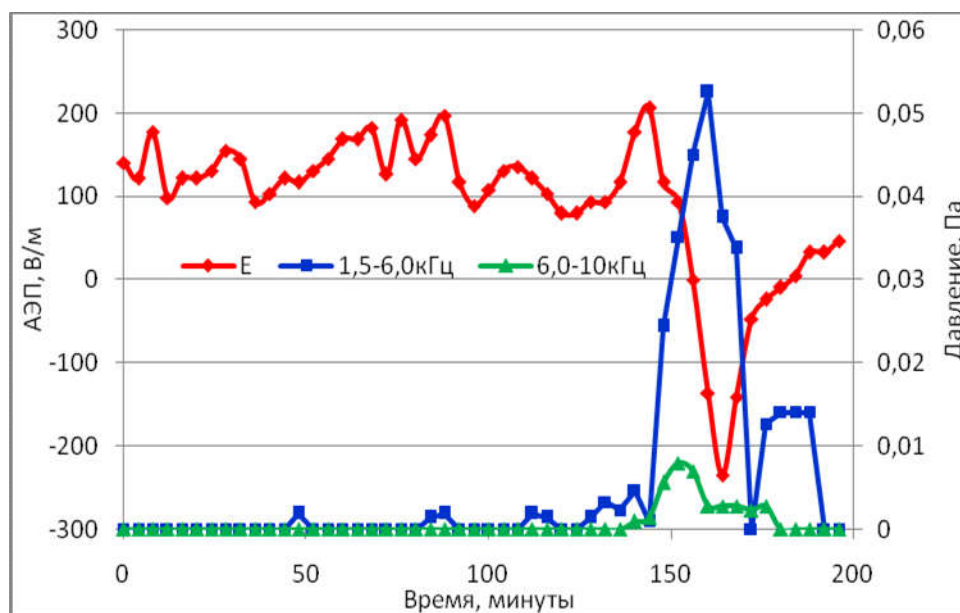


Рис. 7. Вариации АЭП и сейсмоакустических шумов

В случае ударного импульсного выброса ионизатора в приземную атмосферу минимум поля наступал позднее (см. рис. 3). В рассматриваемом случае увеличение уровня сейсмоакустических шумов шло сравнительно плавно в течение 16 минут: от уровня 0,0014 Па на 144-й минуте записи до 0,053 Па на 160-й минуте. В результате этого наступление минимума поля произошло несколько раньше.

При малых уровнях эксхалации почвенного радона на площадке закачки отходов уровень его поступления в приповерхностную атмосферу можно увеличить за счет микросейсмического воздействия. На первый взгляд, такие условия возникают во время микросейсмических бурь. Однако эти явления весьма редки – 4–5 микросейсмических бурь протяженностью 4–6 дней в зимнее время.

Реальная возможность интенсификации воздухообмена почва–атмосфера возникает с использованием вибраторов. По результатам наблюдений работы [15] вибровоздействие в диапазоне техногенных сейсмических шумов приводит к росту содержания метана грунта над фоном на 35%. Аналогичная оценка по данным рис. 2, усредненная по проходам трех поездов метро, приводит к цифрам  $\lambda_{\text{пм}}/\lambda_{\text{фон}} = 1,82$ .

Помимо микросейсмических процессов, на вариации элементов приземного атмосферного электричества будут влиять изменения уровней водоносных пластов при



падении атмосферного давления – подъем уровня водоносного горизонта выдавит в атмосферу почвенный воздух из порового пространства покрывающих пород.

Профильные работы июня 2003 года попали на период повышенной грозовой активности, при которой атмосферное давление падало на первые миллиметры ртутного столба. Контроль объемной активности радона атмосферы за десятки минут перед началом грозы показал увеличение в 7,6–15,3 раз. В работе [6] представлены массивы данных синхронных круглосуточных наблюдений радона грунта и атмосферного давления за четыре месяца 2002 г. и за период 24 февраля – 3 марта 2003 г. на Паратунском грабене (Камчатка). Коэффициенты корреляции между вариациями давления и радона грунта за август–октябрь 2002 г.  $k(Rn;P) = -0,38$ ; за период 24 февраля – 3 марта 2003 г.  $k(Rn;P) = -0,41$ , на первый взгляд, достаточно малы. Но, принимая во внимание тот факт, что на содержание радона грунта влияют и другие метеорологические и геофизические параметры – влажность, осадки, деформационные и сейсмические процессы, термальные воды Паратунки [12], даже полученные низкие абсолютные значения коэффициентов корреляции указывают на причинную связь атмосферного давления с содержанием радона грунта.

Для наглядной иллюстрации этих связей рассмотрим корреляцию между этими параметрами за 24, 25, и 26 февраля 2003 г. Коэффициенты корреляции между атмосферным давлением и концентрацией радона грунта  $k(Rn;P)_{24.02} = -0,69$ ,  $k(Rn;P)_{25.02} = -0,60$ ,  $k(Rn;P)_{26.02} = -0,24$ . Другими словами, 24 и 25 февраля основной причиной вариаций концентрации почвенного радона было атмосферное давление; 26 февраля доминировали прочие метеорологические и геофизические факторы, регулирующие поступление ионизатора в приповерхностные слои грунта.

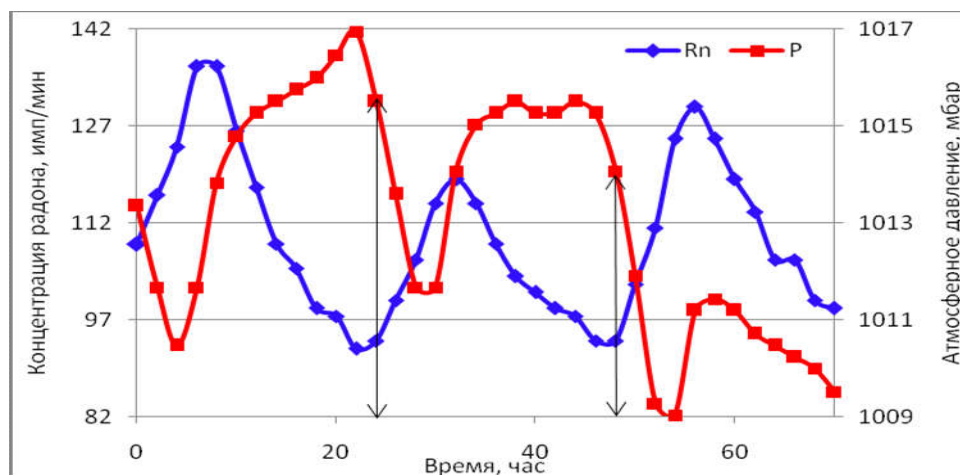


Рис. 8. Вариации концентрации почвенного радона и атмосферного давления за 24–26 февраля 2003 года (Паратунка, Камчатка)

## Заключение

В ходе подземного захоронения отходов при достаточном их объеме и глубине закачки происходит сжатие порового пространства приповерхностных слоев грунта. При этом неизбежно происходит сброс в атмосферу газов-носителей – водорода и метана и транспортируемого ими радона. Высокая чувствительность элементов приземного атмосферного электричества к изменению сброса ионизатора однозначно указывает на перспективность их использования для контроля сжатия приповерхностных слоев грунта. Увеличение концентрации эксхалации радона за счет его дополнительного выноса с глубин 4–6 м приведет к двукратному увеличению полярных проводимостей, что произойдет через 2–3 минуты после начала сжатия; атмосферное электрическое поле уменьшится в два раза, но уже через 20–30 минут после начала сжатия.

Аналогичных, но уже шумовых, эффектов следует ожидать при подъеме уровней не водонапорных горизонтов при падении атмосферного давления на миллиметры ртутного столба. Во избежание шумовых гидрогеологических влияний на изменения электрических характеристик работы необходимо проводить при стабильном атмосферном давлении.

Локальные гидрогеологические условия необходимо принимать во внимание при выборе места захоронения отходов. Близость к поверхности земли не водонапорного горизонта приведет к усилению изменений параметров приземного атмосферного электричества при стимуляции воздухообмена почва–атмосфера деформационными процессами.

При закачке отходов с образованием гидроразрыва реакцию атмосферно-электрических параметров следует ожидать в момент его образования. Ударная волна стимулирует выброс в атмосферу отрицательно заряженных пылевых образований, что выразится в спаде атмосферного электрического поля.

Наиболее контрастные изменения электрических характеристик будут наблюдаться на уровне перехода от классического к реверсивному электродному эффекту. Для искусственного вывода электрических характеристик атмосферы на этот уровень можно использовать вибросейсмическое воздействие, которое будет стимулировать воздухообмен почва–атмосфера. В соответствии с результатами выполненных оценок подобное усиление сигнала будет лежать на уровне 30–80% от локального уровня фона.

*Статья написана в рамках выполнения Государственного задания в сфере научной деятельности на 2017 г.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Зубарев А.П., Шулейкин В.Н.* Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. М.: Изд-во ООО «Газпром ПХГ». 2009. 264 с.
2. *Шулейкин В.Н.* Радон почвенного и атмосферного воздуха и дегазация Земли [Электронный ресурс] // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: Электрон. науч. журн. 2010. Вып. 1(1). 13 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 20.12.2017).
3. *Шулейкин В.Н., Шукин Г.Г., Куповых Г.В.* Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. СПб.: ЦОП РГГМУ, 2015. 206 с.
4. *Николаев И.Н., Литвинов А.В.* Методика измерений малых концентраций  $H_2$  и  $H_2S$  над поверхностью воды // Измерит. техника. 2004. № 5. С. 54–60.
5. *Николаев И.Н., Литвинов А.В., Халфин Т.М.* Автоматизированные газоанализаторы водорода в диапазоне объемных концентраций  $10^{-6}$ –1,0% // Измерит. техника. 2004. № 7. С. 54.
6. *Фирстов П.П., Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Бузевич А.В.* Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 1, вып. 7. С. 102–109.
7. *Никонов А.И., Новаковский Б.А., Переверзев М.В.* Геоинформационное эколого-геохимическое картографирование подземного хранилища газа // Геоинформатика. 2002. № 1. С. 3–8.
8. *Редин А.А.* Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Таганрог. 2011. 19 с.
9. *Тверской П.Н.* Курс метеорологии. Л.: Гидрометиздат, 1951. 887 с.
10. *Френкель Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества. Л.: ГИТТА, 1949. 155 с.
11. *Поликарпов А.М., Шулейкин В.Н.* Характеристики микроколебаний поверхности Земли // Труды Всесоюзной конференции «Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке». Владивосток, 1989. С. 94–95.

12. *Shuleikin V.N., Polikarpov A.M.* Global microvibrations of the Earth and local variations of atmospheric electricity // Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. Warszawa, 1991. D-35(238). P. 199–206.

13. *Shuleikin V.N., Shchukin G.G.* Interrelations between the atmospheric electric field, air pressure, and hydrogeological processes // Russ. Meteorol. Hydrol. 2017. Vol. 42, No. 1. P. 19–26.

14. *Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А., Руленко О.П., Шевцов Б.М., Щербина А.О.* О связи высокочастотной акустической эмиссии с электрическим полем в приземном слое атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 71–76.

15. *Аммосов С.М., Войтов Г.И., Коробейник Г.С., Кузнецов В.В., Николаев А.В., Федорова Г.С.* О двух типах газовой-геохимических эффектов в поле вибрационного источника сейсмических колебаний // ДАН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 62–68.