

БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ

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

В равнинных условиях единственным естественным ионизатором атмосферного воздуха является эксхалирующий почвенный радон [7,8]. Высокий молекулярный вес ионизатора – Rn^{222} исключает возможность его самопроизвольной субвертикальной миграции. Долгое время считалось, что перенос радона осуществляется пузырьковыми образованиями всех летучих газов почвенного воздуха и парами воды. Эксперименты последних лет показали, что в качестве газов-носителей радона выступают только два из них – водород и метан [9].

Концентрацию эксхалиции радона, которая по меньшей мере в 100 раз меньше его содержания в приповерхностных слоях грунта [5, 6], можно контролировать по первичному продукту ионизации – полярным проводимостям (ПП) атмосферного воздуха и по вторичному продукту - атмосферному электрическому полю (АЭП), являющемуся результатом рекомбинации легких ионов с нейтральными ядрами конденсации. Проведем грубую иллюстративную оценку чувствительности элементов приземного атмосферного электричества к режиму эксхалиции почвенного радона. Изменение выноса ионизатора в атмосферу в 2 раза практически не скажется на содержании радона грунта (вариации концентрации радона в приповерхностном слое грунта на сотые-тысячные доли невозможно зарегистрировать даже самыми современными измерительными инструментами). Однако в приповерхностной атмосфере подобные изменения, грубо, могут привести к двукратному изменению полярных проводимостей и поля. Это значит, что элементы приземного атмосферного электричества крайне чувствительны к вариациям плотности субвертикального потока водорода и метана.

В июне 1988 г. на станции захоронения радиоактивных отходов проводился комплексный эксперимент по контролю с поверхности Земли процесса закачки флюида (воды) в грунт с образованием гидроразрыва. Геологический разрез участка, на котором проводились наблюдения, представлен плотными суглинками четвертичных отложений московской и днепровской морен, залегающими до глубин 70 м. Закачка воды осуществлялась через нагнетательную скважину, пробуренную на глубину 50 м, скорость закачки составляла примерно $1 \text{ м}^3/\text{мин}$. Для контроля динамики процесса закачки и

образования гидроразрыва использовался комплекс электроразведочных, наклономерных и атмосферно-электрических наблюдений [9]. Контроль атмосферного электрического поля флюксометром «Поле-2», установленным возле устья нагнетательной скважины, оказался наиболее эффективным.

На рис. 1 (верхний график) представлены результаты изменения давления на устье нагнетательной скважины в ходе 1 и 2 циклов закачки флюида в грунт. Кривые изменения давления возле устья нагнетательной скважины в ходе двух закачек близки друг другу. По скачку давления видно, что в первом случае гидроразрыв образуется где-то через 2,5 мин. после начала закачки при давлении порядка 10,5 атм на устье скважины и 15,5 атм – в зоне гидроразрыва. Далее – спад на величину $\sim 2,5$ атм и устойчивое давление до конца закачки на уровне 7,0 атм. Во втором цикле закачки максимум давления меньше – примерно 7,5 атм и она наступает несколько раньше – где-то через 1,5 мин. после начала цикла закачки.

На нижнем графике (рис. 1) представлены временные вариации АЭП, зарегистрированные возле устья нагнетательной скважины флюксометром «Поле-2», установленным на Земле; высота измерительных пластин $\sim 0,4$ м. В ходе закачки 1 при фоновом уровне поля 40–50 В/м через 2,5–3,0 мин. после начала цикла наблюдался спад сигнала до 10–15 В/м. Наиболее вероятной причиной спада следует, видимо, назвать пылевое облако, несущее на себе отрицательный заряд – следствие сейсмического и деформационного воздействия при образовании гидроразрыва.

Бросается в глаза резкий спад сигнала со сменой знака поля до величин порядка (-150)–(-140) В/м приблизительно на 20-й минуте от начала закачки. Причина тому – сжатие порового пространства покрывающих пород, сопровождаемое мощным выбросом ионизатора в момент образования гидроразрыва.

Избыток эксхалирующего радона в приповерхностной атмосфере приводит к реверсивному электродному эффекту [2]. Локальное атмосферное электрическое поле в точке измерений определяется концентрацией тяжелых ионов, время жизни которых 40–50 мин. [7]. После начала закачки 1 – Е1 (11–12 минуты записи, см. рис. 1) спад поля со сменой знака происходит на 34–35 минутах, т.е. через временной интервал, сравнимый с половиной времени жизни тяжелых ионов. Естественно, что при кратковременном, импульсном выбросе ионизатора максимальная концентрация тяжелых ионов будет именно в середине времени их жизни. Похожий результат приведен в работе [1], где

причиной выброса ионизатора был не гидроразрыв, а резкое увеличение уровня сейсмоакустических шумов.

Ориентировочно, на 47–48 минутах после начала закачки АЭП возвращается к фоновому уровню, практически в два раза большему, нежели чем до закачки. Естественно, что в результате импульсного выброса радона при гидроразрыве концентрация ионизатора в приповерхностных слоях грунта заметно уменьшилась, что и привело впоследствии к росту фона АЭП.

Эксперимент проводился в конце рабочего дня. К сожалению, согласно условиям работы на территории предприятия, измерительный инструмент нельзя было оставить в режиме непрерывной регистрации до следующего дня. Запись поля на следующий день утром показывает, что за 15 часов после первой закачки фоновый уровень упал до величины примерно 10 В/м (рис. 1). В этот временной интервал шла активная инфильтрация воды из зоны гидроразрыва по трещинами и поровому пространству покрывающих пород, следствием чего явился многочасовой рост эксхалации ионизатора, что и привело к спаду АЭП.

Повторная закачка 30 м³ воды в зону гидроразрыва практически вызвала близкие по форме вариации поля, но с меньшими амплитудными перепадами. Если в ходе первой закачки отношение минимальных отрицательных полей к фону до начала цикла составляло величину примерно (-4), то во втором случае оно составило величину примерно (-4)–(-5). Вследствие наличия гидроразрыва деформационные процессы не носили импульсный характер, а шли по мере заполнения и расширения существующей трещины. В результате максимум АЭП наступил несколько позже, на 30-й минуте после начала закачки.

В период 1999-2009 гг. проводились многочисленные комплексные наблюдения АЭП и полярных проводимостей атмосферного воздуха на территориях Щелковского, Касимовского и Северо-Ставропольского газохранилищ (ПХГ).

Первая система наблюдательных маршрутов для профильных измерений атмосферного электрического поля была заложена осенью 1999 г. на территории Щелковского ПХГ [9]. Результаты наблюдений уверенно подтвердили правильность сформулированных выше модельных положений. Повторные наблюдения в 2000 г. показали высокий уровень повторяемости вариаций АЭП. Иллюстрация наблюдаемых вариаций поля приведена на рис. 2.

Графики являются примером наиболее контрастных вариаций АЭП на профиле, протяженностью 1,1 км (низкие уровни поля соответствуют положению профиля над зоной закачки, высокие – положению профиля – на борту зоны закачки).

Измерения проводились в последних числах первой декады сентября 1999 и 2000 гг. Повторяемость результатов очень высокая – коэффициент корреляции между данными профильных изменений составляет 0,8. Более того, даже абсолютные значения поля близки друг другу.

Всего на территории Щелковского ПХГ было заложено 11 профилей, на которых в 1999 и 2000 гг. проводились наблюдения АЭП. По данным наблюдений 1999 г. среднее АЭП над объемом закачки равнялось $E(1999)^{0.3} = 284$ В/м; среднее значение АЭП вне зоны объема закачки $E(1999) = 557$ В/м. Аналогичные расчеты по результатам наблюдений 2000 г. показали средние значения АЭП $E(2000) = 599$ В/м вне зоны закачки и $E(2000)^{0.3} = 368$ В/м. Таким образом, только по перепадам значений АЭП над зоной закачки над вмещающими породами можно по данным профильных наблюдений параметра оценить проекцию пласта-коллектора на дневную поверхность.

Работы, начатые в 1999 г. на Щелковском газохранилище, были продолжены в 2000 и 2003 гг. на территории Касимовского ПХГ. В отличие от вариаций поля под Щелковым, над контуром Касимовского газохранилища провал АЭП был менее контрастен. Тем не менее, если сравнить средние абсолютные значения поля над пластом-коллектором и за его пределами, то можно говорить о спаде АЭП, явно превышающем ошибки экспериментальной аппаратуры. Средние значения поля по отрезкам трех профилей над объемом закачки – 138 В/м, 136 В/м и 140 В/м. Значения поля за пределами проекции зоны объема закачки на поверхность – 184–240 В/м.

Геодезические наблюдения на территориях газохранилищ показали, что в период закачки уверенно регистрируются современные движения земной коры. В частности, нивелировки, проведенные на Краснопартизанском ПХГ (Украина), зафиксировали вертикальное поднятие грунта до 2 см.

Сам факт вертикальных движений, вызванных процессом закачки, понятен с физической точки зрения. Внесение в пласт-коллектор горючего газа с избыточным давлением, естественно, вызывает деформацию покрывающих пород, которая, в конечном итоге, достигает дневной поверхности. Здесь в первую очередь будет деформироваться (сжиматься) поровое пространство, заполненное летучими газами почвенного воздуха.

Разгрузка летучих газов будет идти в приповерхностную атмосферу, т. е. вызовет интенсификацию воздухообмена почва–атмосфера [9].

В сентябре 2009 г. на территории 4-й очереди Касимовского ПХГ проводился эксперимент для получения квазимгновенной картины воздухообмена почва–атмосфера на площади куста 19 нагнетательных скважин. На 7-й день после завершения недельного цикла закачки на 152 пикетах (8 пикетов вокруг каждой скважины) была проведена съемка атмосферного электрического поля. Поскольку эксхалирующий радон почвенного воздуха является единственным естественным ионизатором атмосферы, интенсификация воздухообмена приводит к спаду поля, а уменьшение воздухообмена – к увеличению значений поля. Средние значения поля для 5 линий скважин С-ЮЗ простираения даны в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения атмосферного электрического поля по 5-ти выделенным линиям нагнетательных скважин

	1 линия	2 линия	3 линия	4 линия	5 линия
E(ср), В/м	449	444	445	468	304

Через 7 суток после окончания цикла закачки метан оставался только под 5-й группой нагнетательных скважин. Все это позволяет утверждать, что закачанный горючий газ уходит от 4-й очереди Касимовского ПХГ через 5-ю линию скважин. Более того, можно оценить скорость ухода закачанного газа – примерно 38–42 м/сут.

Накопленный опыт бесконтактного контроля за процессом закачки жидкого и газообразного флюида в грунт позволяет сформулировать ряд рекомендаций.

1. Методика бесконтактного контроля растекания флюида по зоне гидроразрыва будет работать при закачке флюида объемом сотни м³ на глубину 1–2 км.

2. Основной принцип, заложенный в систему контроля, – использование эффекта сжатия приповерхностного порового пространства, неизбежно интенсифицирующего процесс газообмена почва–атмосфера.

3. В качестве контролируемых параметров выгоднее всего использовать элементы приземного атмосферного электричества: полярные проводимости воздуха и (или) атмосферное электрическое поле.

4. Перед началом работ по закачке флюида вокруг нагнетательной скважины, необходимо в условиях «хорошей погоды» [3, 4] снять круговые диаграммы контролируемого параметра на удалениях 5–10 м, 10–15 м и 15–20 м от скважины.

5. По выделенным профилям крайне важно провести наблюдения в первые десятки минут при первой закачке. Изменения полярных проводимостей и (или) атмосферного электрического поля в этот период будут наиболее контрастны и позволят уверенно выделить зону образованного гидроразрыва и конкретную площадь, для контроля при последующих закачках.

6. Предлагаемая методика успешно использовалась путем контроля АЭП при отборе природных рассолов с глубин примерно 800 м, и их последующей закачки на глубину примерно 1200 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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.

2. *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.

3. Руководство по наземным наблюдениям за элементами атмосферного электричества // Л.: Изд-во ГГО им. А.И. Воейкова, 1960. 95 с.

4. *Семенов К.А.* Хорошая погода и элементы атмосферного электричества // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 1982. Вып. 455. С. 112-119.

5. *Сисигина Т.И.* Измерения эксхалации радона с поверхности горных пород // Вопросы ядерной метеорологии: Сб. ст. М.: Госатомиздат, 1962. С. 104-111.

6. *Сисигина Т.И.* Эксхалация радона с поверхности нескольких типов почв Европейской части СССР и Казахстана // Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии: Сб. ст. М.: Атомиздат, 1965. С. 40-48.

7. *Тверской П.Н.* Курс метеорологии // Л.: Гидрометиздат, 1951. 887 с.

8. *Френкель Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества Л.: ГИТТА, 1949. 155 с.

9. Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов // СПб.: ЦОП РГГМУ, 2015. 205 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

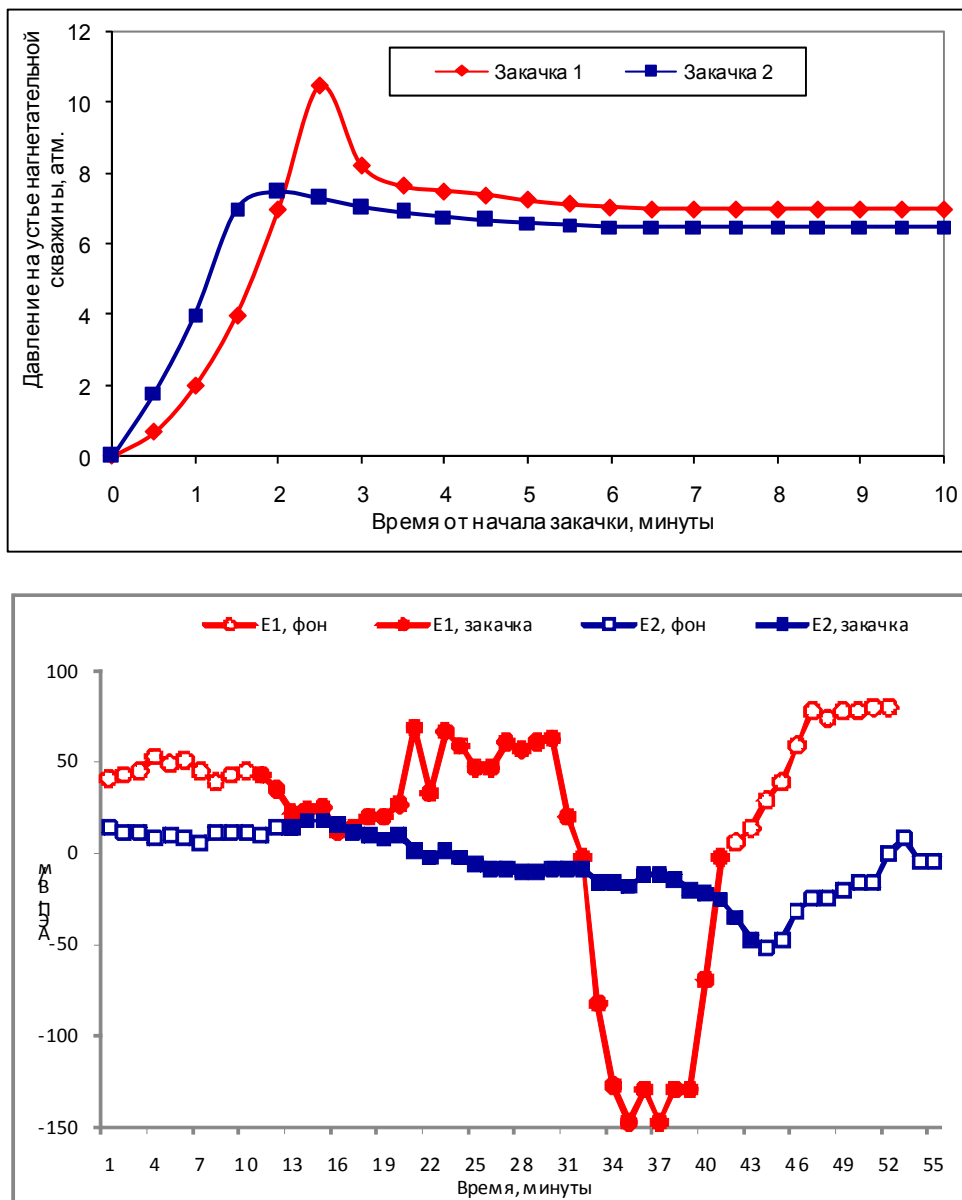


Рис. 1. Давление на устье нагнетательной скважины и атмосферное электрическое поле (АЭП) в ходе 1 и 2 циклов закачки

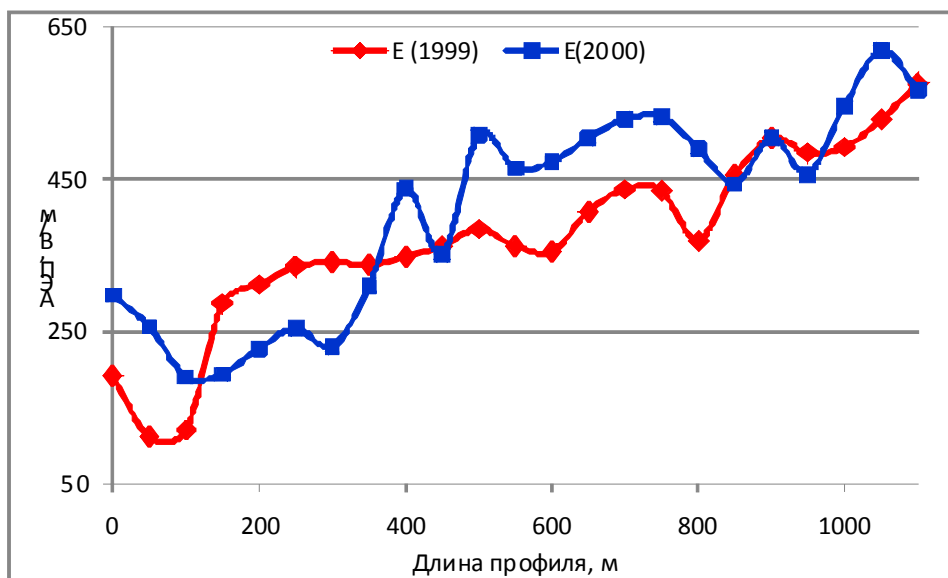


Рис. 2. Профильные вариации АЭП, зарегистрированные в 1999 и 2000 гг. на территории куста нагнетательных скважин Щелковского ПХГ