

АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

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

Объемный заряд приземного воздуха обязан своим происхождением ионизации эксхалирующим почвенным радоном [1–3]. Молекулярный вес радиоактивного газа – 222 исключает возможность его обособленной субвертикальной миграции. Эксперименты последних лет показали, что ионизатор переносится пузырьковыми образованиями двух летучих газов – водородом и метаном [4–5].

Полученный материал позволяет построить модель водород-метан-радоновых и атмосферно-электрических связей. Субвертикальный поток водорода и метана захватывает радон с глубины 4–6 м и выносит его в приповерхностные слои грунта и атмосферу. Образующие при этом легкие ионы определяют полярные проводимости; их рекомбинация с нейтральными ядрами конденсации приводит к образованию тяжелых ионов, определяющих атмосферное электрическое поле – АЭП.

Содержание радона грунта не менее чем в 100 раз превышает содержание радона атмосферы [6, 7]. Это значит, что элементы приземного атмосферного электричества будут крайне чувствительны к изменениям плотности субвертикальных потоков газов-носителей – водорода и метана.

За период полевых работ 1999–2009 гг. на Калужской кольцевой структуре, в Щелково и в Ставропольском крае были отобраны 72 пробы почвенного воздуха для последующего лабораторного анализа на содержание водорода и метана. Коэффициент корреляции между двумя газами-носителями оказался достаточно высок: $k(\text{CH}_4; \text{H}_2)_{72} = 0,76$. Коэффициент корреляции между логарифмами $\text{Ln}(\text{H}_2)$ и $\text{Ln}(\text{CH}_4)$ очень высок: $k[\text{Ln}(\text{H}_2); \text{Ln}(\text{CH}_4)] = 0,96$. Линейная аппроксимация логарифмов измеренных значений содержаний водорода и метана в грунте с достоверностью $D = 0,92$ [4, 8] позволяет ввести выражение

$$\text{CH}_4 = 15,83 \exp[1,675 \text{Ln}(\text{H}_2)] [\text{об.}\%], \quad (1)$$

где концентрация водорода нормирована на 1 об.%. Пробы отбирались в различных районах, исследовались на разной аппаратуре, в разных лабораториях. С учетом диапазона перепада концентраций метана 10^{-6} – 10^{-2} об.%, совпадение измеренных и расчетных значений можно считать идеальным.

За электрические характеристики приземного слоя воздуха ответственен эксхалирующий почвенный радон. Поскольку транспорт ионизатора осуществляют два летучих газа, необходимо оценить степень участия в переносе каждого из них.

Оценка чувствительности АЭП к изменениям плотности водорода и метана

Пузырьковое образование водорода и метана несет на себе собственный вес. По грубой оценке вероятность выноса в атмосферу ионизатора водородом будет в 8 раз больше, чем метаном. В 2006–2007 гг. на Северо-Ставропольском ПХГ по результатам опроса 800 наблюдательных пикетов удалось установить, что на исследуемой территории 15% радона переносится метаном и 85% – водородом. Отсюда следует, что водород переносит в 5,7 раза больше ионизатора, чем метан.

С использованием данных полевых наблюдений проведем оценку чувствительности АЭП к изменениям содержания водорода и метана в приповерхностных слоях грунта. Для оценки возьмем ряд данных наблюдений:

- на кольцевом профиле, заложенном на линии прихода газа к аварийному газопроявлению, где метан, очевидно, доминировал в переносе радона в атмосферу (хутор Пелагиада, ул. Клубничная, 43);

- на профилях Северо-Ставропольского ПХГ, где концентрации газов-носителей сравнимы (профиль 18) и концентрация водорода заметно больше концентрации метана (профиль 4) [4];

- на территории 4-ой очереди Касимовского ПХГ, где были зарегистрированы сравнительно высокие концентрации метана – 10^{-3} – 10^{-2} об. %.

Для удобства сравнения сделанных оценок по чувствительности АЭП к изменениям содержания водорода и метана грунта все полученные результаты сведены в табл. 1 [9]. Представленные данные указывают, что основное влияние на вариации АЭП оказывают изменения содержания водорода грунта. Исключение составляет случай аварийного газопроявления, где содержание метана оказалось в 47 раз больше содержания водорода. Здесь вариации концентрации метана можно уверенно отслеживать по изменениям АЭП.

Принимая во внимание результаты табл. 1, оперативный контроль вариаций содержания метана грунта становится возможен по данным наблюдений АЭП, но обязательно в комплексе с наблюдениями водорода и радона грунта и атмосферы. Если на

исследуемой территории концентрации водорода и метана грунта связаны соотношением (1), то учет водорода в транспорте ионизатора можно не принимать во внимание.

Таблица 1

Чувствительность АЭП к изменениям концентраций водорода и метана в приповерхностных слоях грунта

	Средний водород об. %	Средний метан об. %	Чувствительность Е к изменениям водорода	Чувствительность Е к изменениям метана	H ₂ /CH ₄
Кольцевой профиль	0,000024	0,00113	–	$\Delta\text{CH}_4 = 9,02 \cdot 10^{-5}$ об. % – 8% от CH ₄ (сред) $\Delta E = 2,0$ В/м	0,02
Профиль 18	0,0000103	0,0000108	$\Delta\text{H}_2 = 4,0 \cdot 10^{-6}$ об. % – 2,6% от H ₂ (сред), $\Delta E = 2,0$ В/м	$\Delta\text{CH}_4 = 1,91 \cdot 10^{-6}$ об. % – 18% от CH ₄ (сред), $\Delta E = 2,0$ В/м	0,95
Профиль 4	0,000493	0,0000828	$\Delta\text{H}_2 = 1,48 \cdot 10^{-5}$ об. % – 2,8% от H ₂ (сред), $\Delta E = 2,0$ В/м	$\Delta\text{CH}_4 = 8,29 \cdot 10^{-5}$ об. % – 100% от CH ₄ (сред), $\Delta E = 0,26$ В/м	5,95
Скважины 433–431	0,00296	0,010052	В среднем для 3-х пар скважин 433–431, 427–431, 422–421 $\Delta\text{H}_2 = 0,000106$ об. % – 8,4% от H ₂ (сред) $\Delta E = 2$ В/м	$\Delta_{433;431}\text{CH}_4 = 0,00012$ об. % – 1,2% от CH ₄ (сред), $\Delta E = 2,0$ В/м	0,29
Скважины 427–431	0,00201	0,009103		$\Delta_{427;431}\text{CH}_4 = 0,000089$ об. % – 0,98% от CH ₄ (сред) $\Delta E = 2,0$ В/м	0,22
Скважины 422–421	0,00154	0,011758		$\Delta_{422;421}\text{CH}_4 = 0,00018$ об. % – 1,5% от CH ₄ (сред) $\Delta E = 2,0$ В/м	0,13

Атмосферно-электрический мониторинг нефтяных месторождений

Первые результаты профильных наблюдений АЭП над нефтяной залежью были получены на территории 3-го Речицкого нефтепромысла в Белоруссии [4, 8]. Измерения проводились дважды: первый раз в 1989 г.; повторно в 1992 г., после 3-х лет эксплуатации скважины (рис. 1). Как следовало ожидать, за 3 года спад поля над залежью существенно уменьшился – результат снижения внутрипластового давления в процессе эксплуатации, заводнения пласта, снижения плотности шлейфа углеводородов.

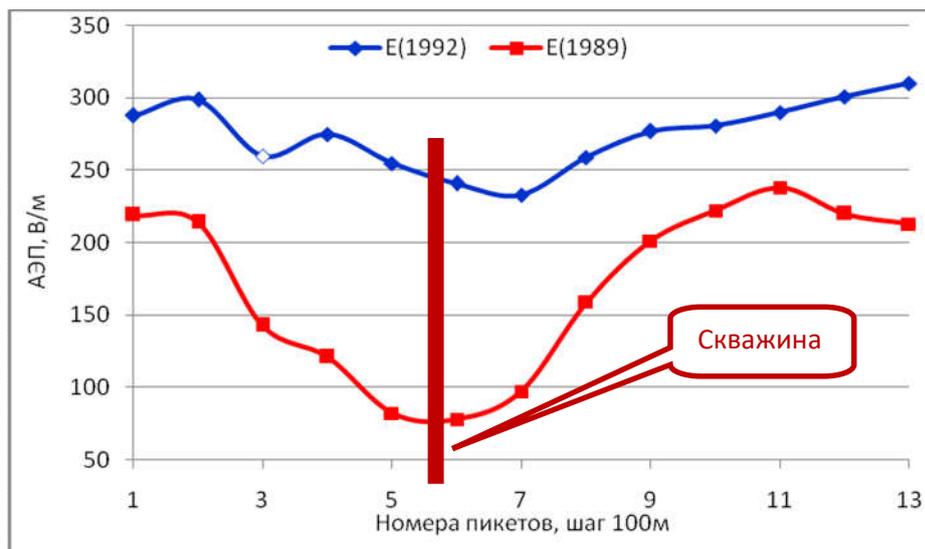


Рис. 1. Вариации атмосферного электрического поля у эксплуатационной скважины – 3-й Речицкий нефтепромысел (Белоруссия)

Следует обратить особое внимание на тенденцию к росту поля на уровне пикета 4. Наблюдаемый результат позволяет говорить о возможном отсечении области под пикетом 3 от основной залежи, о возможности образования целика.

Промежуточным звеном между метаном шлейфа нефтяной залежи и АЭП выступает почвенный радон. Пузырьковые образования газа-носителя не только выносят ионизатор в атмосферу, но и вызывают увеличение содержания радона в приповерхностных слоях грунта. Рассмотрим результаты одновременных наблюдений объемной активности радона грунта и АЭП, полученные на Александровском нефтяном месторождении в Белоруссии (рис. 2).

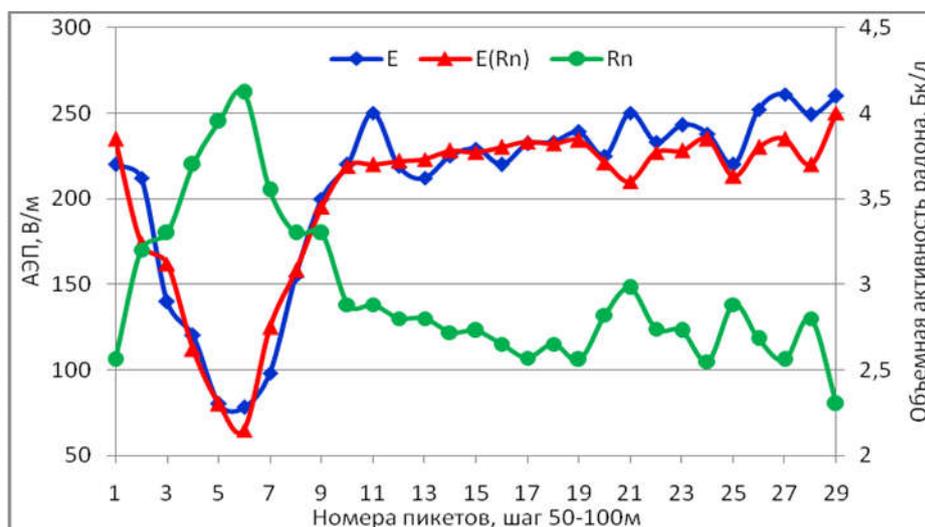


Рис. 2. Вариации атмосферного электрического поля и объемной активности радона грунта над Александровской нефтяной залежью (Белоруссия)

Из графиков видно, что в зоне пикетов 2–8 исследуемый профиль пересекает нефтяную залежь – малые значения поля из-за повышенного содержания радона грунта, транспортируемого метаном нефтяного шлейфа. Массивы данных наблюдений делились на две части – над залежью и вне залежи, и строились линейные аппроксимации АЭП, как функции объемной активности радона почвенного воздуха. С достоверностью $\sim 0,8$ эти аппроксимации запишутся в виде: $E(Rn)_{2-8} = 553,3 - 119,2 \cdot Rn [В/м]$ и $E(Rn)_{1,9-29} = 377,4 - 55,2 \cdot Rn [В/м]$ (см. рис. 2). Численные коэффициенты имеют размерность В/м; значения объемной активности радона грунта нормированы на 1 Бк/л.

Очевидно, что локальные значения АЭП на каждом пикете будут зависеть от суммы произведений радона грунта на локальное содержание газов-носителей. Из графика следует, что вне залежи среднее значение объемной активности радона грунта достаточно стабильно и составляет величину $Rn(ср)_{1,9-29} = 2,74 \pm 0,20 [Бк/л]$. Рост объемной активности радона грунта над нефтяной залежью объясняется участием в переносе радона метана нефтяного шлейфа.

Атмосферно-электрический мониторинг ПХГ

Первая система наблюдательных маршрутов профильных измерений поля над искусственной газовой залежью была заложена осенью 1999 г. на территории Щелковского ПХГ. Результаты наблюдений уверенно подтвердили наличие повышенного сброса радона над пластом-коллектором. Иллюстрация наблюдаемых вариаций поля и их повторяемость из года в год приведена на рис. 3: коэффициент корреляции между данными профильных измерений 1999 и 2000 гг. $\sim 0,8$.

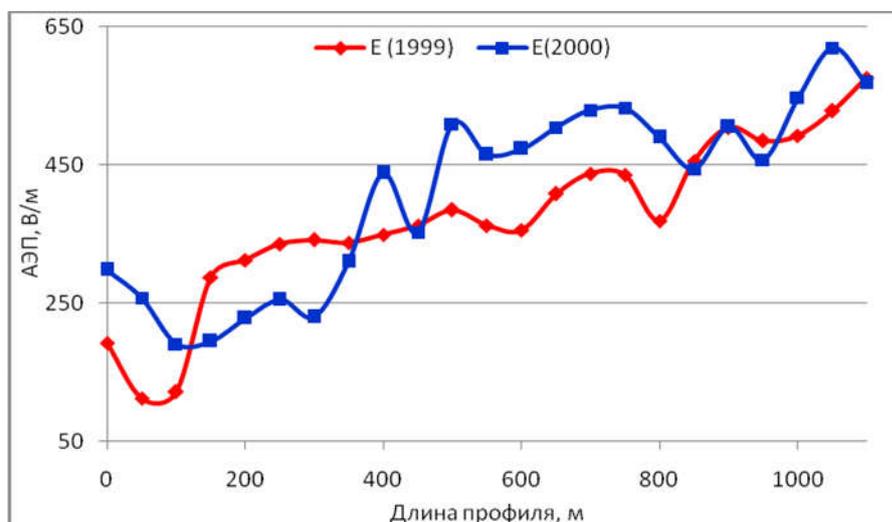


Рис. 3. Профильные вариации АЭП, зарегистрированные в 1999 и 2000 гг. на территории куста нагнетательных скважин Щелковского ПХГ

Всего на территории Щелковского ПХГ было заложено 11 профилей, на которых в 1999 г. среднее АЭП над объемом закачки $E(1999)_{o.z.} = 284$ В/м; среднее АЭП за пределами зоны объема закачки $E(1999) = 557$ В/м. В 2000 г. среднее АЭП над объемом закачки $E(2000)_{o.z.} = 368$ В/м; среднее АЭП за пределами объема закачки $E(2000) = 599$ В/м.

На Касимовском ПХГ среднее АЭП над объемом закачки $E_{o.z.} = 138$ В/м; среднее АЭП за пределами объема закачки $E = 212$ В/м.

Внесение в пласт-коллектор горючего газа с избыточным давлением естественно вызывает сжатие покрывающих пород, в том числе и порового пространства приповерхностных слоев грунта. Сжатие пор приведет к разгрузке защемленных там летучих газов в приповерхностную атмосферу.

В сентябре 2000 г. и в июле 2003 г. на одном из профилей Касимовского ПХГ, отрезок которого (1200–3200 м) лежит на линии от куста нагнетательных скважин к купольной части покрывки, наблюдались высокие значения АЭП (рис. 4). В июле 2003 г. на том же отрезке был зарегистрирован провал поля. Причина наблюдаемых отличий кроется во временной задержке момента времени измерений относительно цикла закачки горючего ископаемого. В 2003 г. измерения проводились через 2 месяца после начала закачки, когда газ активно уходил к купольной части покрывки; в сентябре 2000 г. газ уже ушел к куполу.

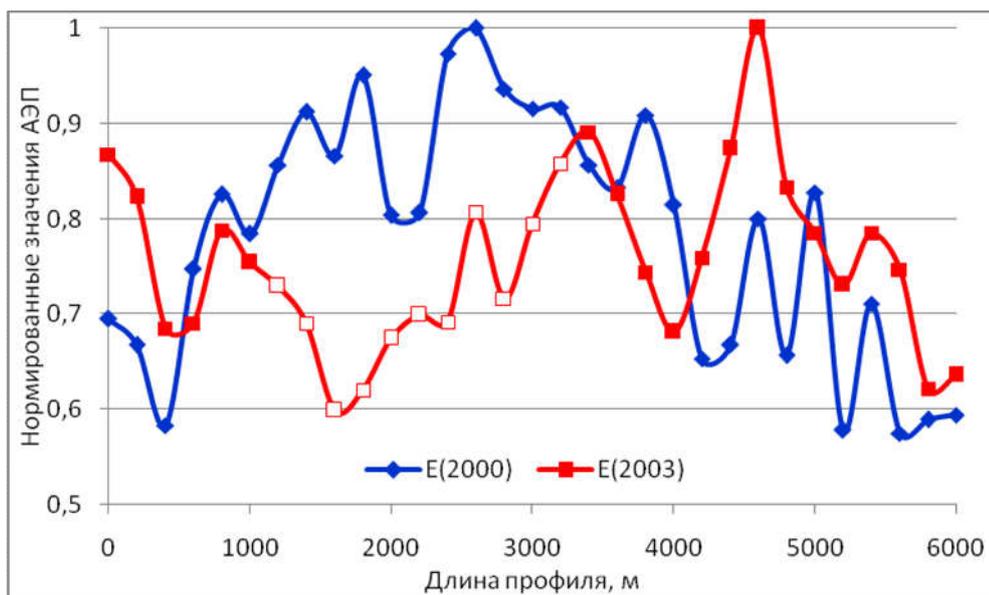


Рис. 4. Результаты профильных наблюдений АЭП на профиле, отрезок которого 1200–3200 м лежит на линии от куста нагнетательных скважин к купольной части покрывки

Аналогичный результат был получен 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 из 19 скважин) была проведена мобильная съемка атмосферного электрического поля, средние значения которого по выделенным 5 группам скважин представлены на рис. 5. Полученные данные позволяют утверждать, что на 7-й день после завершения закачки газ оставался только в зоне 421 и 431 скважин.

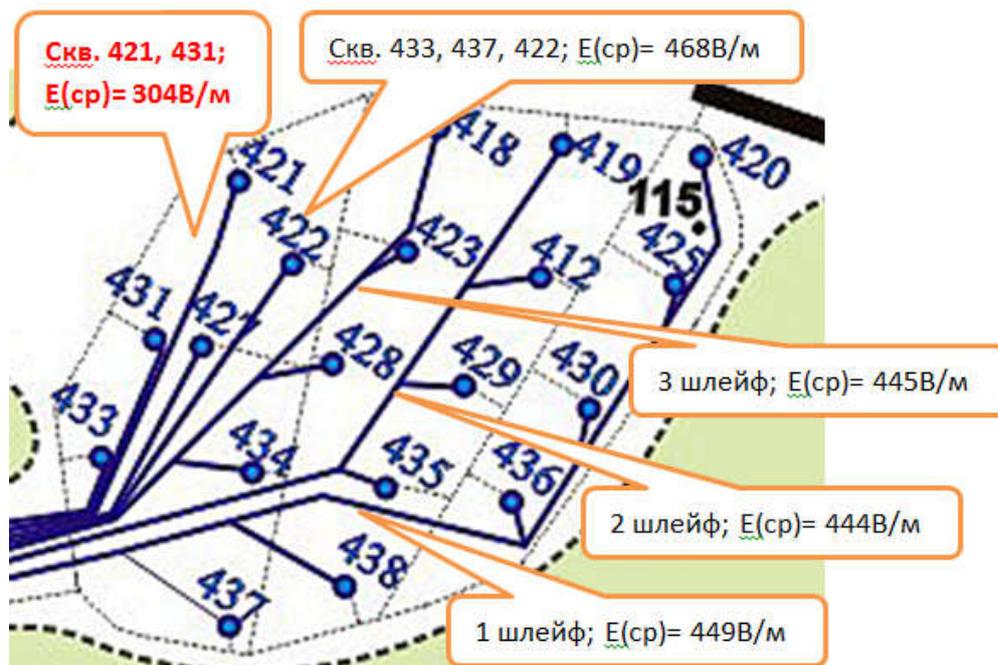


Рис. 5. Средние значения АЭП по выделенным 5 группам скважин на 7-ой день после завершения цикла закачки

Из четырех параметров, входящих в модельное представление связей газовых и электрических параметров Земли и атмосферы, три поддаются измерениям. Это значит, что четвертый параметр – метан поддается расчету как функция радона грунта и радона атмосферы, радона грунта и полярных проводимостей воздуха, радона грунта и обратной величины АЭП (рис. 6).

В северо-восточном и северном секторах исследуемой территории имеют место две ярко выраженные аномалии по метану (марка 1). Здесь профили пересекали заболоченные участки с присутствием метана биогенной природы.

Вторая по значимости аномалия наблюдается в юго-западном секторе (марка 2). Это территория хутора Рыздвяный, где возможны утечки бытового газа, усугубленные техногенной сейсмичностью автомобильного и железнодорожного транспорта.

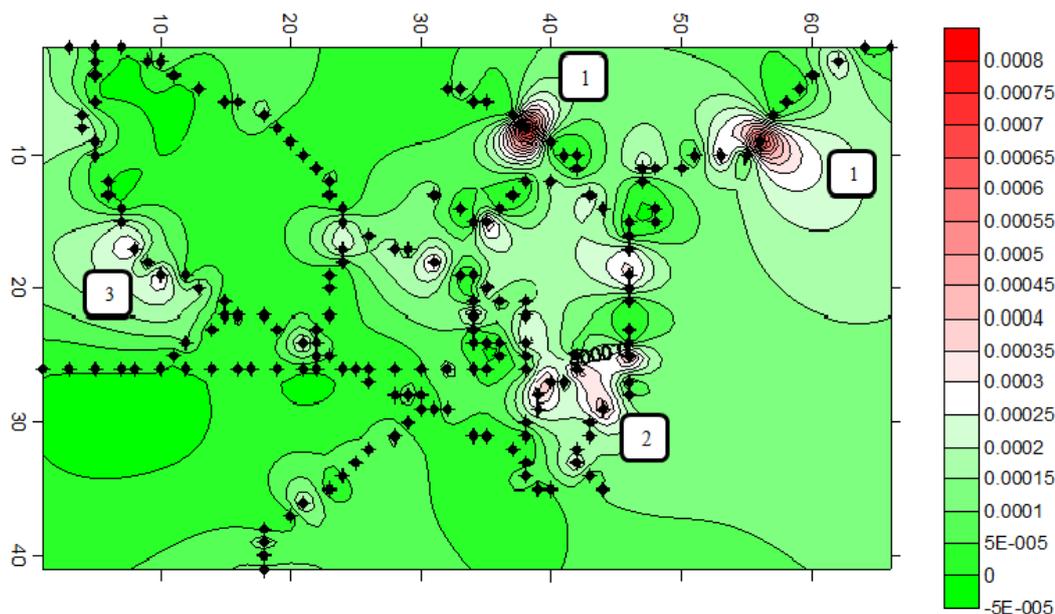


Рис. 6. 2D-представление распределения содержания метана грунта территории Северо-Ставропольского ПХГ [см³/л] по данным измерений 2006 г.

Наконец, техногенная аномалия по метану присутствует и на трассе дожимной компрессорной станции (марка 3) – следствие техногенной сейсмичности. По грубой оценке, на 95% площади (см. рис. 6) содержание метана равно (0–0,00002) см³/л.

Использование атмосферно-электрических наблюдений при решении экологических задач нефтегазового комплекса

Уже многие десятилетия практикуется подземное захоронение отходов нефтегазодобывающей промышленности и радиоактивных отходов. Приведенный обзор результатов полевых наблюдений уверенно доказывает, что процессы закачки флюида контрастно отражаются на вариациях элементов приземного атмосферного электричества (см. рис. 3, 4). В качестве примера рассмотрим результаты АЭП-профилирования над областью закачки отработанных рассолов, использованных для промывки теплообменных трубок ТЭЦ, на глубину ~ 1100 м (рис. 7).

Профиль проходил 2 раза (E1 и E2) с интервалом порядка двух часов. Из сравнения графиков видно, что основное растекание закачиваемых рассолов шло от области пикетов 14–20, где зарегистрировано максимальное снижение поля – следствие приповерхностных деформационных процессов.

В 2001–2002 гг. на территории Чкаловского аэродрома проводились профильные наблюдения АЭП. В июне 2001 г. в конце одного из профилей был зарегистрирован заметный спад сигнала E(06.2001), см. рис. 8. Причиной наблюдаемых изменений поля

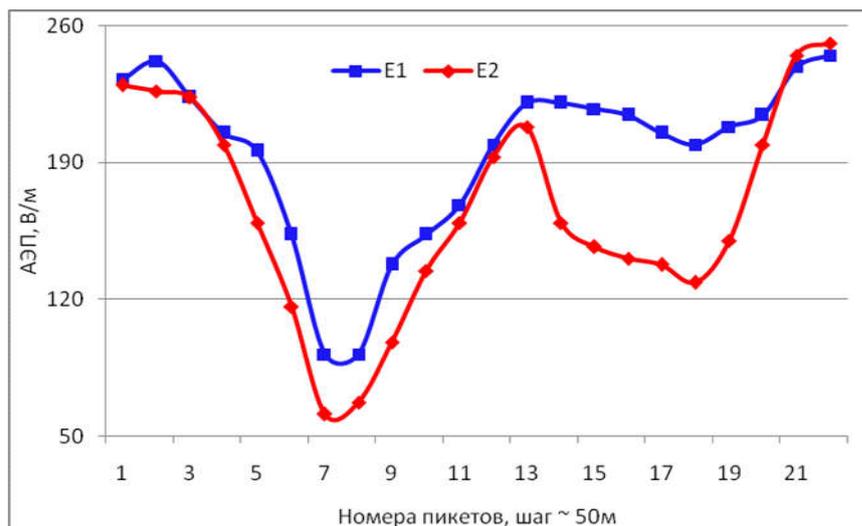


Рис. 7. Вариации АЭП на профиле, пересекающем зону закачки отработанных рассолов ТЭЦ

оказалось поступление в верховодку керосина из одной потерявшей герметичность стационарной топливной емкости. Присутствие керосина увеличило концентрацию метана в приповерхностных слоях грунта, что, в свою очередь, повлекло за собой рост эксхалации почвенного радона, т.е. регистрируемый спад АЭП.

В ходе очистных мероприятий содержание керосина в верховодке уменьшалось, что неизменно привело к росту АЭП. Из графиков E(08.2001) и E(04.2002) следует, что через 10 месяцев после начала разлива топлива оно оставалось в пределах наблюдательного профиля на отрезке 2100–2700 м. Простота и технологичность контроля за растеканием нефтепродуктов в приповерхностных слоях грунта по вариациям АЭП позволяет рекомендовать предлагаемый метод к практическому использованию.

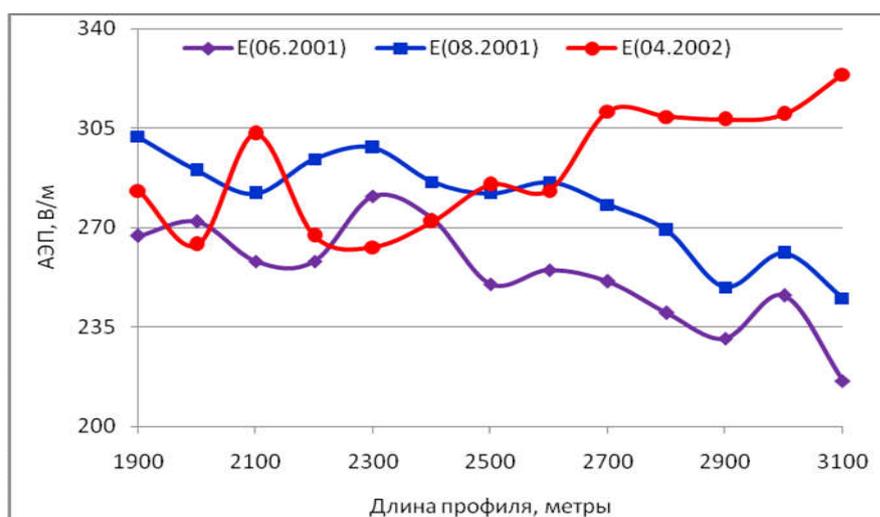


Рис. 8. Вариации АЭП над зоной утечки в верховодку керосина в ходе мероприятий по откачке горячего

Заключение

Построена модель связей водорода, метана, радона и атмосферного электрического поля. Согласно введенным модельным представлениям, неоднократно проверенным экспериментально, любое повышение содержания летучих газов-носителей (водорода и метана) в приповерхностных слоях грунта неизбежно приведет к повышенной эксхалляции почвенного радона в атмосферу, к спаду атмосферного электрического поля.

Причиной подобного повышения может быть шлейф нефтяной залежи, поступление метана из пласта-коллектора ПХГ из-за некачественной покрышки, сжатие порового пространства приповерхностных слоев грунта в ходе закачки и растекания горючего газа по пласту-коллектору газохранилища, подземное захоронение промстоков, аварийный разлив нефтепродуктов.

Простота производства мобильных профильных наблюдений атмосферного электрического поля позволяет картировать с поверхности Земли контур нефтяной залежи и динамику ее разработки, контролировать процесс растекания закачиваемого газа в пласт-коллектор ПХГ, зону распространения подземного захоронения промстоков, область аварийного разлива нефтепродуктов и процесс очистных мероприятий.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тверской П.Н.* Курс метеорологии. Л.: Гидрометиздат, 1951. 887 с.
2. *Френкель Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества. Л.: ГИТТА, 1949. 155 с.
3. *Баранов В.И.* Радиометрия. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 343 с.
4. *Зубарев А.П., Шулейкин В.Н.* Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. М.: Изд-во ООО «Газпром ПХГ», 2009. 264 с.
5. *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).

6. *Сисигина Т.И.* Измерения эксхалиции радона с поверхности горных пород // Вопросы ядерной метеорологии. М., 1962. С. 104–111.

7. *Сисигина Т.И.* Эксхалиция радона с поверхности нескольких типов почв Европейской части СССР и Казахстана // Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии. М., 1965. С. 40–48.

8. *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.

9. *Шулейкин В.Н.* Чувствительность атмосферного электрического поля к изменениям концентраций водорода и метана [Электронный ресурс] // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: Электрон. науч. журн. 2016. Вып. 1(13). 19 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 20.12.2017).