

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ КАРТИРОВАНИЯ ЗОН ЛОКАЛИЗОВАННОЙ РАЗГРУЗКИ МЕТАНА В ЗЕМНОЙ КОРЕ

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

Газовая съемка традиционно используется для картирования зон локализованной разгрузки углеводородов. Отобранные образцы почвенного воздуха исследуются на месте на содержание метана с помощью инфракрасного газоанализатора типа ПГА-4 (чувствительность до 0,1% об.) и, одновременно, отправляются в лабораторию для последующего анализа меньших концентраций [1]. Естественно, что подобная процедура будет наиболее эффективна при получении результата в режиме реального времени.

Средний фоновый уровень содержания метана грунта составляет величину порядка $0,8 \cdot 10^{-4}$ % об. [2], что на три порядка ниже чувствительности газоанализатора. Лабораторный анализ на порядки повышает чувствительность и точность измерений, но лишает процедуру оперативности. Для продуктивного определения концентрации метана необходима работающая в оперативном режиме методика контроля содержания горючего газа в приповерхностных слоях грунта (от уровня, по меньшей мере, равного среднему фоновому содержанию летучего газа).

Рассмотрим возможность косвенного контроля содержания метана грунта с использованием результатов измерений характеристик Земли и атмосферы, полученных с необходимой точностью. Экспериментальные исследования последних лет позволили построить цепочку связей метана, водорода и радона почвенного воздуха и элементов приземного атмосферного электричества.

По расчетам и экспериментальным данным, транспорт радона в горной породе осуществляется со скоростью 40–60 см/сутки [3]. Высокий молекулярный вес радиоактивного газа – 222, что исключает возможность его обособленной субвертикальной миграции с подобными скоростями в приповерхностные слои грунта и атмосферу.

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. В ходе этого процесса в пузырьках происходит падение давления и увеличение объема (площади контакта пузырьков с жидкостью и горной породой). Пузырьки становятся природными

дегазаторами, в них наряду с другими газами стекает и почвенный радон, образующийся в подземных водно-газовых системах при распаде растворенного радия [4, 5].

Те же пузырьковые образования выносят сотые, тысячные доли газа-эманации в приповерхностную атмосферу [6, 7]. Здесь эксхалирующий почвенный радон выступает в качестве единственного ионизатора атмосферного воздуха [8, 9]. Образующиеся в процессе ионизации легкие ионы определяют полярную проводимость приземного воздуха; рекомбинация легких ионов с нейтральными ядрами конденсации приводит к образованию тяжелых ионов, ответственных за атмосферное электрическое поле (АЭП). Согласно оценкам [8], в слое воздуха до высот 0,5 км ионизация на 75% связана с гамма-излучением почвенного радона и на 25% – с космическим излучением; в слое в диапазоне высот 0,5–1,0 км ситуация меняется – 64% воздуха ионизируется из космоса и только 36% – почвенным радоном.

Важно подчеркнуть, что сотые–тысячные доли эксхалирующего почвенного радона обеспечивают нормальные фоновые уровни полярных проводимостей воздуха и АЭП. Отсюда следует, что перечисленные элементы приземного атмосферного электричества крайне чувствительны к изменению режима транспорта почвенного радона в приземную атмосферу.

Долгое время считалось, что носителями радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу являются все летучие газы почвенного воздуха [4, 5]. Однако эксперименты последних лет показали, что в качестве газов-носителей выступают только два из них – метан и водород [1, 10, 11]. Для иллюстрации проведем анализ данных комплексных полевых наблюдений радона почвенного воздуха и лабораторных исследований проб на содержание водорода, метана, двуокиси углерода и азота. Концентрации азота и двуокиси углерода меняются в противофазе и охвачены жесткой корреляционной связью – $k(N_2;CO_2) = (-0.99)$ при отсутствии корреляционной связи с метаном и водородом – $|k(H_2,CH_4;CO_2)| = 0.28; 0.29$. Коэффициент корреляции водорода и метана очень высок – $k(H_2;CH_4) = 0.96$; коэффициенты корреляции между концентрациями двух последних летучих газов с объемной активностью радона тоже достаточно велики: $k(Rn;H_2) = 0.84$, $k(Rn;CH_4) = 0.89$. Незначительное уменьшение коэффициентов корреляции летучих газов с объемной активностью радона имеет понятное физическое объяснение – точность лабораторного определения концентрации водорода и метана существенно выше точности полевых измерений объемной активности радона.

Полученный результат имеет понятный физический смысл. В ходе наблюдений с борта летательных аппаратов следы радона были обнаружены до высот первых км от поверхности Земли. Это значит, что пузырьки летучих газов, выносящих ионизатор в приземную атмосферу, способны всплывать в атмосферном воздухе вплоть до указанных высот. Т.е. плотность пузырьков газов–носителей должна быть меньше плотности атмосферного воздуха. К таким газам относятся указанные водород и метан, инертный газ гелий и пары воды. Поскольку радон также является инертным газом, замещение атома гелия атомом радона в процессе субвертикального подъема можно исключить.

Малая толщина слоя грунта, из которого идет испарение, при переносе радона парами воды способствует крайне незначительному изменению концентрации ионизатора в атмосфере. При этом инжекция водяного пара в приповерхностный воздух увеличит плотность нейтральных ядер конденсации, что незамедлительно приведет к росту АЭП. Испарение, в свою очередь, очистит поровое пространство, что будет способствовать сбросу накопленного радона в атмосферу и увеличению полярных проводимостей воздуха. Другими словами, процесс испарения способен влиять на изменение элементов приземного атмосферного электричества, но не вследствие переноса радона парами воды, а из-за трансформации ионного состава воздуха.

Присутствие радона в земной коре зависит от распространения материнского вещества. В табл. 1 приведены данные исследований Биогеохимической лаборатории академика В.И. Вернадского по распространению радия в биосфере Земли.

Таблица 1

Содержание радия в биосфере Земли

	Концентрация радия, %
1. Горные породы	$10^{-9} - 10^{-10}$
2. Почвы	$10^{-10} - 10^{-11}$
3. Растения	10^{-12}
4. Животные	10^{-13}
5. Воды рек и морей	$10^{-12} - 10^{-14}$

Из табл. 1 следует, что содержание радия в почвах всего лишь на порядок меньше, чем в горной породе. В частности в глине, являющейся водоупором водоносных

горизонтов, среднее содержание радия $1,3 \cdot 10^{-10} \%$, что всего лишь в два раза меньше, чем в гранитах ($2,58 \cdot 10^{-10} \%$) [12].

Представленный материал позволяет построить модель связей водород–метан–радоновых и атмосферно-электрических полей Земли и атмосферы (рис. 1). Субвертикальный поток водорода и метана захватывает атомы радона с глубины 4–6 м и выносит их в приповерхностные слои грунта и атмосферу, где радиоактивный газ становится единственным естественным ионизатором воздуха. Образующие при этом тяжелые ионы задают локальное АЭП: при дефиците ионизатора имеет место классический электродный эффект (рост поля до нормального фонового уровня на высотах до нескольких м относительно поверхности Земли); при избытке – реверсивный электродный эффект, проявляющийся в спаде поля вплоть до отрицательных значений [13–15], перегибе и последующем росте до фоновых значений.

Проведем грубую иллюстративную оценку чувствительности элементов приземного атмосферного электричества к режиму эксхалации почвенного радона. Изменение выноса ионизатора 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 приведут к двукратному изменению поля и полярных проводимостей. В рамках рассматриваемой модели это значит, что элементы приземного атмосферного электричества крайне чувствительны к вариациям плотности субвертикального потока водорода и метана.



Рис. 1. Представление связей водорода, метана, радона и элементов приземного атмосферного электричества в виде модели

Моделирование связей атмосферно–электрических и газовых параметров открывает возможности для косвенного контроля содержания метана грунта. Радон, водород, полярные проводимости и АЭП поддаются оперативным измерениям. Соответственно, с учетом результатов этих измерений может быть рассчитано содержание метана грунта.

Вариации метана грунта по системе наблюдательных пикетов будут получены в относительных единицах. Однако, если на отдельных наблюдательных пикетах (5–10%) провести параллельный отбор образцов почвенного воздуха (для последующего лабораторного анализа на содержание метана), то от относительных единиц можно успешно перейти к общепринятым абсолютным значениям концентрации.

Подобные работы неоднократно проводились на территориях Северо-Ставропольского и Касимовского ПХГ [1, 10]. Оценка точностных характеристик введенных рабочих формул для расчета содержания метана грунта показала, что для концентрации метана в диапазоне $(10^{-6}–10^{-5})\%$ об. относительная ошибка его косвенного определения составляет величину $\sim 28\%$; для концентраций метана $(10^{-3}–10^{-2})\%$ об. – примерно 14%.

Это значит, что точность оперативных измерений водорода, радона, полярных проводимостей воздуха и АЭП достаточна для увеличения чувствительности оперативного контроля содержания метана грунта на 4–5 порядков (по сравнению с возможностями современных полевых измерительных инструментов) [1].

На последнем этапе анализа связей метана, радона, водорода и параметров приземного атмосферного электричества рассмотрим еще один экспериментально установленный факт. В ходе многолетних наблюдений на Калужской кольцевой структуре, в Щелково (Московская область) и Ставропольском крае составлена база данных по содержанию водорода и метана в приповерхностных слоях грунта – 68 пар значений. Проанализируем связи этих двух летучих газов в диапазоне концентраций метана от 10^{-6} до $10^{-2}\%$ об. [1, 10, 11].

Коэффициент корреляции $(k(\text{CH}_4, \text{H})_{68} = 0,76)$ достаточно высок. Однако, если рассмотреть коэффициент корреляции между логарифмами $\text{Ln}(\text{H}_2)$, $\text{Ln}(\text{CH}_4)$, то коэффициент корреляции сразу увеличится до величины $k[\text{Ln}(\text{H}_2); \text{Ln}(\text{CH}_4)] = 0,96$. Построение линейной аппроксимации позволяет с достоверностью $D = 0,92$ ввести уравнение связи исследуемых параметров $\text{CH}_4 = \exp[1,675\text{Ln}(\text{H}_2) + 2,762]$, концентрации

водорода и метана нормированы на 1% об. На рис. 2 построены вариации измеренных и расчетных значений содержания метана грунта по 68 точечным массивам данных.

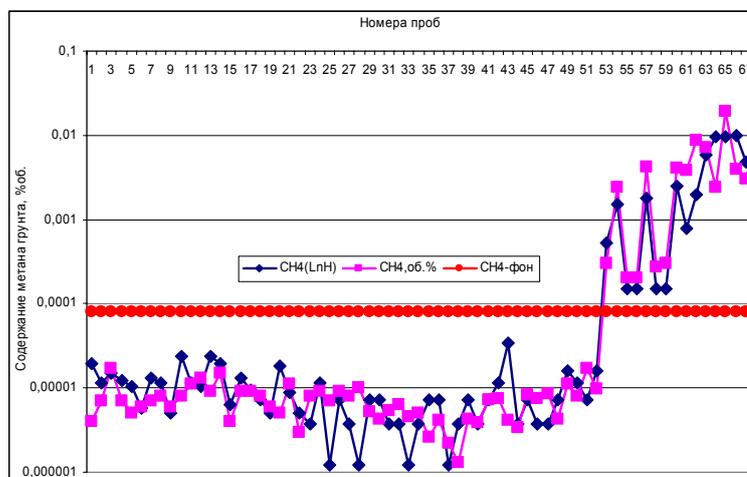


Рис. 2. Вариации расчетных и измеренных значений содержания метана грунта. Прямая линия – средний фоновый уровень метана грунта.

Принимая во внимание диапазон перепада рассматриваемых концентраций метана – 4 порядка, (10^{-6} – 10^{-2})% об., совпадение измеренных и расчетных значений можно считать идеальным. Полученная экспоненциальная связь между метаном и водородом понятна. В квазистабильном состоянии распределение газов глубинного субвертикального потока в геологической среде по мере приближения к дневной поверхности будет описываться «барометрической формулой», куда входит и плотность газа (в показатель экспоненты).

При малых концентрациях и незначительных их перепадах (как в 52 пробах, отобранных на Ставрополье) экспоненту достоверно можно аппроксимировать линейной зависимостью. Коэффициент корреляции расчетных значений содержания метана грунта, полученных по введенным выражениям, очень велик – $k\{CH_4[\exp(H)]; CH_4(H)\} = 0,98$.

Проиллюстрируем возможности картирования зон локализованной разгрузки метана с использованием данных моделирования по результатам оперативной съемки АЭП и радона.

На поле концентраций метана в тропосфере оказывает влияние нефтегазоносность недр [16, 17]. Например, содержание CH_4 в тропосфере над нефтяными и газовыми структурами в пределах Бухаро-Чарджоуской тектонической ступени [16] в 1,2–1,5 раза выше среднепланетарных. Другими словами, здесь имеет место избыточный сброс метана в приповерхностные слои грунта и атмосферу.

Натурные исследования показали, что на границе проекции контура нефтяной залежи на дневную поверхность имеет место перепад концентрации горючего газа в приповерхностных слоях грунта (рис. 3) [17]. Работы выполнялись путем отбора образцов почвенного воздуха для последующего лабораторного анализа на содержание метана. Уровень концентрации метана грунта может быть увеличен при дополнительном привнесении в среду вибросейсмического излучения. В работах использовались стандартные сейсморазведочные источники типа СВ 20/60, СВ 10/100, работающие в режиме СВИП-сигнала в частотном диапазоне 5–25Гц. Однако даже при этом концентрации метана грунта варьируют в пределах единиц 10^{-4} % об. Отношение средней концентрации метана над залежью и над вмещающими породами в режиме фонового отбора проб составляет примерно 1,7; а при вибровоздействии заметно выше (~2,8).

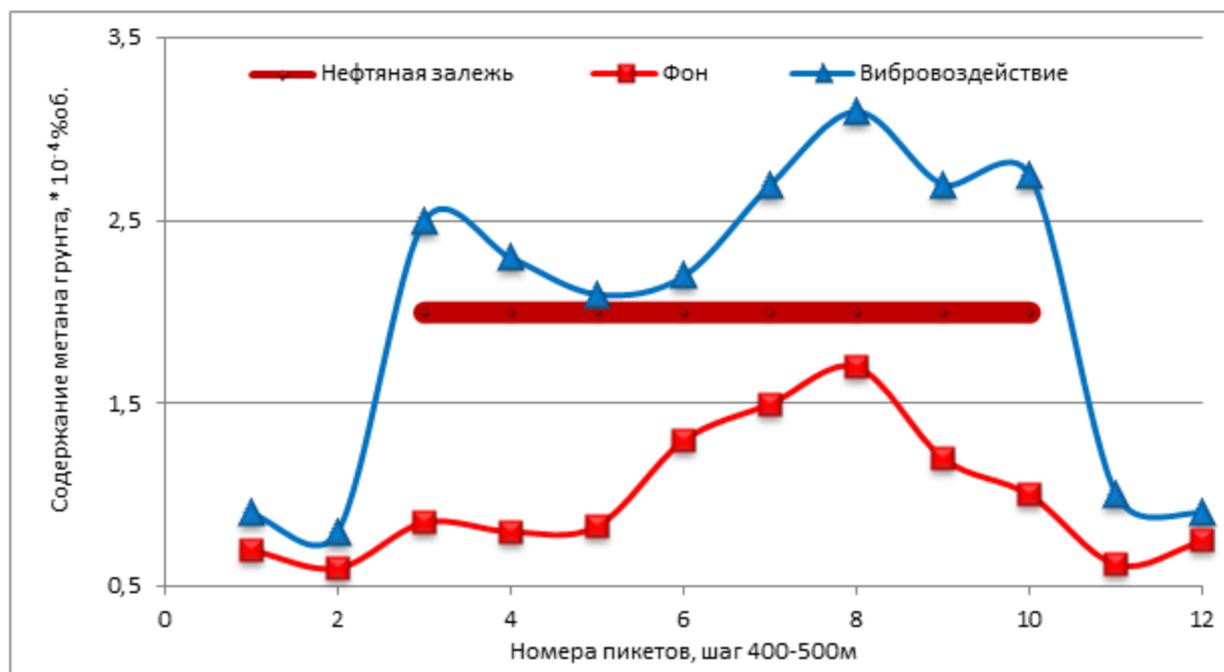


Рис. 3. Содержание метана грунта на профиле, секущем нефтяную залежь до (фон) и после вибровоздействия

Согласно результатам моделирования (см. рис. 1), избыточное поступление метана в атмосферу неизбежно должно отразиться на изменениях элементов приземного атмосферного электричества. Первые результаты профильных наблюдений АЭП были получены на территории 3-го Речицкого нефтепромысла (Белоруссия). Измерения проводились в 2 этапа: первый раз – летом 1989 года в непосредственной близости от только что запущенной в эксплуатацию новой скважины (рис. 4а); второй этап

наблюдений на том же профиле был проведен в 1992 году, после 3-х лет эксплуатации скважины. Как и следовало ожидать, за 3 года спад поля над залежью существенно уменьшился (снижение внутрипластового давления в процессе эксплуатации, заводнение пласта, снижение плотности шлейфа углеводородов).

Следует обратить особое внимание на тенденцию к росту поля на уровне пикета № 4 – рис. 4а. Наблюдаемый результат позволяет говорить о возможном отсечении области под пикетом № 3 от основной залежи.

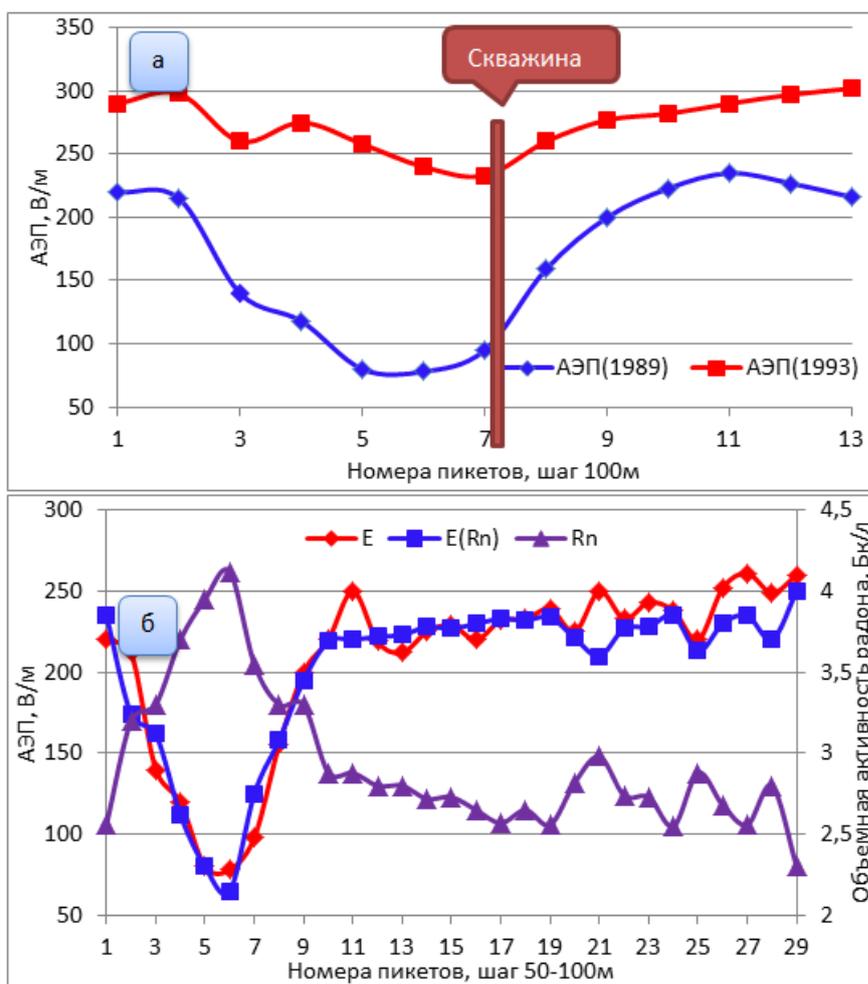


Рис. 4. Результаты профильных наблюдений атмосферного электрического поля и объемной активности радона над нефтяными залежами в Белоруссии:
а) 3-й Речицкий нефтепромысел; б) Александровское нефтяное месторождение

Промежуточным звеном между метаном в шлейфе нефтяной залежи и в 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.

Исследуемая территория не очень подходила для постановки измерений. С одной стороны, по ней были разбросаны многочисленные островки кустов и деревьев, способные экранировать поле. С другой стороны, встречались небольшие заболоченные участки, на которых мог присутствовать биогенный метан. Тем не менее, на исследуемой площади удалось расположить 29 наблюдательных пикетов, шаг между которыми варьировал в пределах 50–100м. Полученные результаты измерений представлены на рис. 4б.

Из графиков (см. рис. 4б) 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, линейные аппроксимации АЭП строились как функции объемной активности радона почвенного воздуха. С достоверностью ~ 0.8 эти аппроксимации можно записать в виде: $E(Rn)_{2-8} = 553,3 - 119,2 \cdot Rn$ и $E(Rn)_{1,9-29} = 377,4 - 55,2 \cdot Rn$ (см. рис. 4б). Численные коэффициенты имеют размерность В/м, значения объемной активности радона грунта нормированы на 1Бк/л.

Очевидно, что локальные значения АЭП на каждом пикете будут зависеть от произведений радона грунта на суммарное локальное содержание газов–носителей. Из графика (см. рис. 4б) следует, что вне залежи среднее значение объемной активности радона грунта достаточно стабильно и составляет величину $Rn(sp)_{1,9-29} = 2,74 \pm 0,20$ Бк/л. Рост объемной активности радона грунта над нефтяной залежью объясняется участием в переносе радона метана нефтяного шлейфа. Увеличение вклада метана нефтяного шлейфа в этот рост можно грубо оценить с учетом отношения свободных членов введенных аппроксимационных выражений $(553,3/377,4) \sim 1.5$. Это отношение сравнимо с показателями аналогичной оценки, выполненной по результатам измерений, представленных на рис. 3.

Данные полевых наблюдений, представленные на рис. 4, полностью укладываются в рамки модели связей газовых и электрических полей недр и атмосферы Земли (рис. 5). Однако в литературе встречаются примеры, когда над нефтяной залежью наблюдаются всплески АЭП. Примером тому могут служить вариации атмосферного электрического поля, зарегистрированные при исследованиях в районе структуры Сатыбальды-Карсак

(Гурьевский свод, Западный Казахстан) [19]. В северо-восточной части территории выявлена положительная аномалия АЭП, которая имеет юго-восточную протяженность и два четких максимума ~ 250 В/м. Здесь по результатам бурения были найдены промышленные запасы нефти.

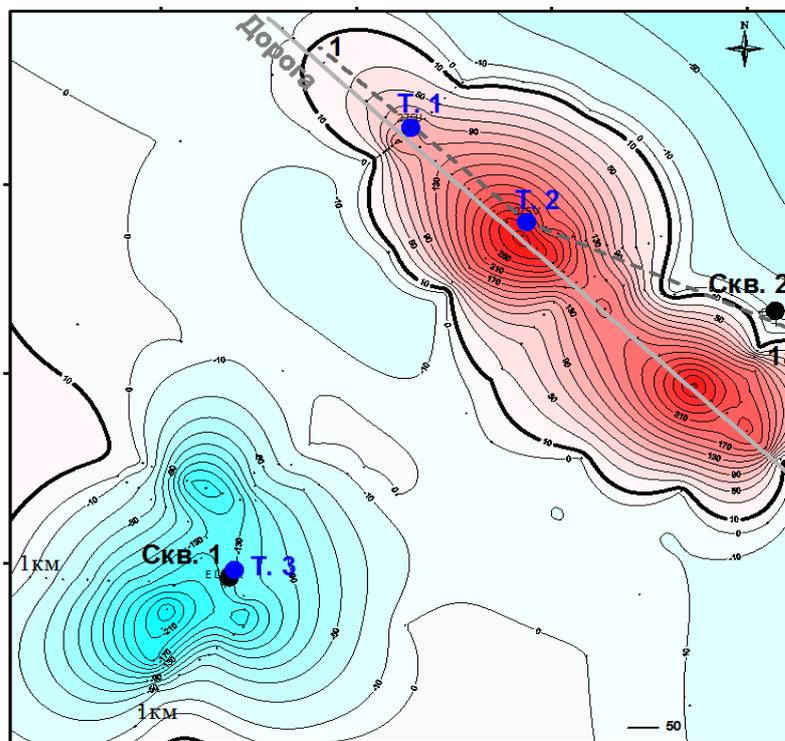


Рис. 5. Изолинии АЭП в районе структуры Сатыбальды-Карсак (Гурьевский свод, Западный Казахстан). Положительная аномалия АЭП ~ 250 В/м в северо-восточной части над продуктивной нефтяной залежью; отрицательная – (-110) В/м в юго-западной части [19]

На этом же участке, но в юго-западной части района выявлена еще одна аномалия, на этот раз отрицательная, неправильной формы. Ее значение в минимуме достигает (-110) В/м. По результатам разведки эта территория признана непродуктивной относительно промышленных запасов нефти (пласты-коллекторы насыщены минерализованной водой).

Структурный элемент Сатыбальды-Карсак расположен в северо-западной части солянокупольной структуры Карсак [20], перекрывающей нефтяную залежь. По данным электроразведки и бурения площадь соляного купола существенно больше суммарной площади всех выявленных нефтяных пластов. Герметичный соляной купол препятствует движению глубинного субвертикального потока летучих газов и шлейфов нефтяной залежи к поверхности Земли. Происходит накопление газов под куполом и их

последующий субвертикальный сброс по его периметру. Вероятнее всего, это и приводит к отрицательным значениям АЭП в юго-западной части исследуемой территории. В рассматриваемом случае глубинный и мелкий (от нефтяной залежи) субвертикальные потоки летучих газов регулируются соляным куполом, а не областью покрывки месторождения.

В рамках создаваемой модели проанализируем экспериментальные данные по влиянию газовой залежи на вариации АЭП. В период 1999–2009 гг. проводились многочисленные комплексные наблюдения водорода, радона, АЭП и полярных проводимостей атмосферного воздуха на территориях Щелковского, Касимовского и Северо-Ставропольского ПХГ.

Первая система наблюдательных маршрутов для профильных измерений АЭП была заложена осенью 1999 года на территории Щелковского ПХГ. Результаты наблюдений уверенно подтвердили правильность сформулированных выше положений при моделировании связей атмосферно–электрических и газовых параметров. Исследования системы в 2000 году показали высокий уровень повторяемости вариаций АЭП. Иллюстрация наблюдаемых вариаций поля приведена на рис. 6.

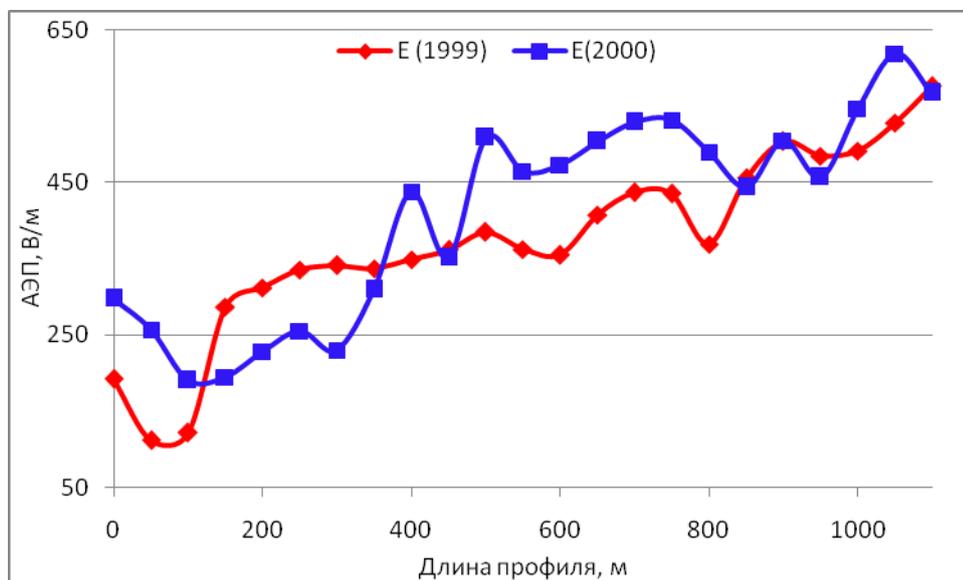


Рис. 6. Профильные вариации АЭП, зарегистрированные в 1999 и 2000 гг. на территории куста нагнетательных скважин Щелковского ПХГ

На графике дан пример наиболее контрастных вариаций АЭП на профиле, протяженностью 1,1 км (низкие уровни поля соответствуют положению профиля над зоной закачки, высокие – выходу профиля на борт зоны закачки).

Измерения 1999 и 2000 гг. проводились в последних числах первой декады сентября. Повторяемость результатов очень высокая, коэффициент корреляции между данными профильных изменений $\sim 0,7$. Более того, даже абсолютные значения поля близки друг к 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 $E(1999)^{0.3} = 284$ В/м; среднее значение АЭП вне зоны объема закачки $E(1999) = 557$ В/м. Аналогичные расчеты, проведенные по результатам наблюдений 2000 г., показывают 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 положение проекции пласта–коллектора на поверхность Земли.

Работы, начатые 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, 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. Средние значения поля за пределами проекции зоны объема закачки – 184–240 В/м.

Особый интерес представляют результаты сравнения вариаций поля, зарегистрированных на Касимовском ПХГ на профиле № 2 в 2000 и 2003 гг. (рис. 7). Центральная часть профиля проходит в непосредственной близости от куста нагнетательных скважин.

Абсолютные значения поля в 2000 г. практически в два–три раза выше, нежели чем подобные показатели, полученные в 2003 г. Для удобства сравнения вариаций поля они представлены на рис. 7 по двум шкалам. Наблюдения в 2000 г. проводились в сентябре месяце, засушливый период до начала работ и отсутствие осадков во время наблюдений

способствовали истощению содержания радона в приповерхностных слоях грунта и регистрации высоких значений поля (классический электродный эффект), см. рис. 1.

В 2003 г. наблюдения проводились в начале июля в очень жаркую погоду, когда практически каждый день гремели грозы, сопровождаемые сильными ливнями. Во время выпадения осадков приповерхностное поровое пространство тампонировалось водой, что задерживало эксхалляцию радона в атмосферу, способствовало накоплению ионизатора в приповерхностных слоях грунта. Во временные интервалы между дождями (когда проводились измерения) влага испарялась, а накопленный радон выносился в приземную атмосферу, что и приводило к низким значениям поля (реверсивный электродный эффект), см. рис. 1. Таким образом, разница абсолютных значений поля определялась исключительно погодными условиями в периоды наблюдений 2000 и 2003 гг. [1].

Коэффициент корреляции по всему массиву данных наблюдений на профиле 2000 и 2003 гг. не значим – $k = 0,14$. Однако если разбить данные измерений на две части по пикетам (1–3, 22–31) и (4–21), то коэффициенты корреляции становятся значимыми величинами $k(1-3, 22-31) = 0,82$ и $k(4-21) = 0,51$.

Если сравнить вариации поля по линии пикетов (4–21), то явный всплеск АЭП в 2000 г. сменяется в 2003 г. провалом. Причина наблюдаемых отличий кроется, скорее всего, во временной задержке измерений относительно начала цикла закачки горючего ископаемого. В 2000 г. измерения проводились с задержкой 4–5 месяцев, в 2003 г. – с задержкой 2 месяца относительно начала закачки.

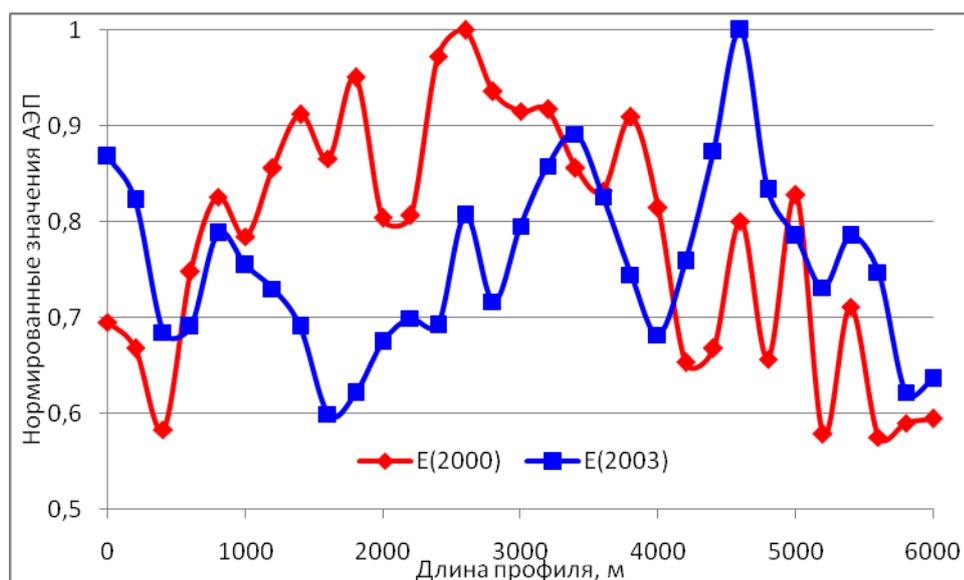


Рис. 7. Результаты наблюдений АЭП на профиле № 2, на траверсе куста нагнетательных скважин

По фронту закачки метана в пласта–коллектор крышка расклинивается, что приводит к нарушению ее герметичности. Естественно, что по линии нарушения герметичности имеет место незначительный сброс метана. По данным многочисленных экспериментальных наблюдений [21] сброшенный горючий газ достигает дневной поверхности с запаздыванием порядка 2-х месяцев. Отсюда зарегистрированный провал поля на уровне пикетов (4–21) следует, по-видимому, отнести к эффекту выноса ионизатора в приповерхностные слои атмосферы мелким потоком метана из пласта–коллектора, возникшим в апреле–мае 2003 г. при прохождении фронта объема закачки под наблюдательным отрезком профиля № 2.

Щелковское и Касимовское ПХГ относятся к числу искусственно выбранных образований, которые по своим характеристикам могли быть использованы в качестве буферных емкостей для хранения метана, необходимого для нужд промышленности и коммунального хозяйства. Одно из самых первых, Щелковское, за многие десятилетия эксплуатации, заметно потеряло герметичность крышечной области. В результате этого, практически по всей площади пласта–коллектора имеет место сброс горючего газа, достигающего в конечной итоге дневной поверхности и уходящего в атмосферу, и как следствие – уверенно регистрируемый провал АЭП внутри проекции контура объема закачки на поверхность Земли (рис. 6).

Касимовское ПХГ в этом плане является более благополучным. Здесь также имеют место потери горючих ископаемых, с одновременным накоплением метана в приповерхностных слоях грунта [21]. Свидетельство тому – зарегистрированный провал АЭП над объемом закачки (на ~ (50–100) В/м – см. выше).

Рассмотрим еще один пример, иллюстрирующий это явление. В сентябре 2009 г. на территории 4-й очереди Касимовского ПХГ проводились комплексные наблюдения АЭП, радона, водорода с выборочным отбором образцов почвенного воздуха для последующего лабораторного анализа на содержание метана и водорода. Измерения были начаты через два дня после завершения недельного цикла закачки. Использование результатов лабораторного анализа и введенное уравнение связи между концентрациями водорода и метана (см. рис. 2) позволили оценить величины фонового уровня метана грунта, которые следовало ожидать с учетом зарегистрированных значений содержания водорода. Оказалось, что расчетные величины концентрации метана на 22 наблюдательных пикетах на два порядка ниже зарегистрированных значений концентраций метана грунта

(диапазон изменений зарегистрированных значений $\text{CH}_4 \sim (1-5) \cdot 10^{-2} \% \text{ об.}$; диапазон изменений расчетных значений $\text{CH}_4 \sim (1-5) \cdot 10^{-4} \% \text{ об.}$).

Процесс закачки горючего газа в пласт-коллектор сопровождается сжатием покрывающих пород, в том числе и порового пространства приповерхностных слоев грунта. Естественно, что это сжатие сопровождается избыточным сбросом летучих газов, ионизатора, и, как следствие, спадом АЭП. Уход закаченного газа по пласту-коллектору от куста нагнетательных скважин приведет к обратным изменениям. Сброс летучих газов и вынос радона в приповерхностную атмосферу будет стабилизироваться, стремиться к фоновому уровню, поле возрастет до нормальных фоновых значений.

В ходе наблюдений на территории Касимовского ПХГ в сентябре 2009 г. пробы водорода и радона отбирались на 8 пикетах, расположенных по сторонам света и на удалении 20 м от ствола каждой из 20-ти наблюдательных скважин. 20 исследованных скважин были разделены на 5 групп, вытянутых в направлении С-ЮЗ. Предполагалось, что содержание водорода в приповерхностных слоях грунта будет пропорционально содержанию закаченного горючего газа в окрестности коллекторной области скважины. На рис. 8 представлены 5 круговых диаграмм усредненного содержания водорода грунта по выбранным линиям скважин. План расположения скважин представлен на рис. 9.

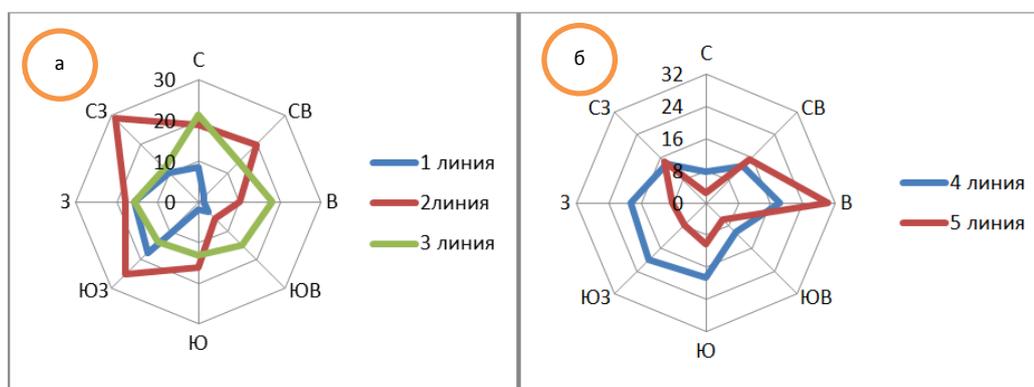


Рис. 8. Круговые диаграммы усредненного содержания водорода грунта на 1–2 и 3–5 линиях скважин

Первая усредненная круговая диаграмма содержания водорода грунта дана для скважин 1-ой линии (см. рис. 8а). В рамках сформулированных выше представлений, из нее следует, что закаченный газ уходит от скважин в секторе ЮЗ–СЗ. Следующая усредненная круговая диаграмма водорода дана для скважин 2-ой линии (см. рис. 8а). Согласно диаграмме основные направления ухода газа – ЮЗ, З, СЗ. Сравнение круговых диаграмм водорода на 1-ой и 2-ой линиях скважин указывает на доминирующее

направление ухода газа в секторе ЮЗ–СЗ. Усредненная круговая диаграмма водорода для 3-ей линии скважин также отображена на рис. 8а. Эта группа скважин ближе всего тяготеет к центру исследуемой площади. Диаграмма близка к круговой и симметрична относительно направления С–Ю. В направлениях СВ–В–ЮВ газ приходит к линии скважин; из сектора ЮЗ–З–СЗ – уходит.

Следующая выделенная группа скважин – 4-я линия, отображена на рис. 8б. Сектор диаграммы в направлениях СВ, В, ЮВ указывают на направления прихода газа со стороны 1–3-й линий скважин. Уход газа в основном происходит в направлениях Ю–ЮЗ–З–СЗ.

Наконец, усредненная диаграмма по группе скважин 5-й линии имеет ярко выраженный двухлепестковый характер, приход газа – в секторе СВ, В, его уход – в направлении СЗ.

Обратимся еще раз к круговым диаграммам содержания водорода вокруг каждой скважины и рассмотрим их в отдельности, без усреднения. Припишем каждой концентрации водорода вектор, идущий от ствола скважины, и рассчитаем сумму этих векторов. Ввиду очевидной динамики процесса распространения газа за 5 дней наблюдений сравнение абсолютных значений суммарных векторов не имеет смысла. Поэтому проведем анализ на качественном уровне и припишем всем векторам одинаковые значения – рис. 9.

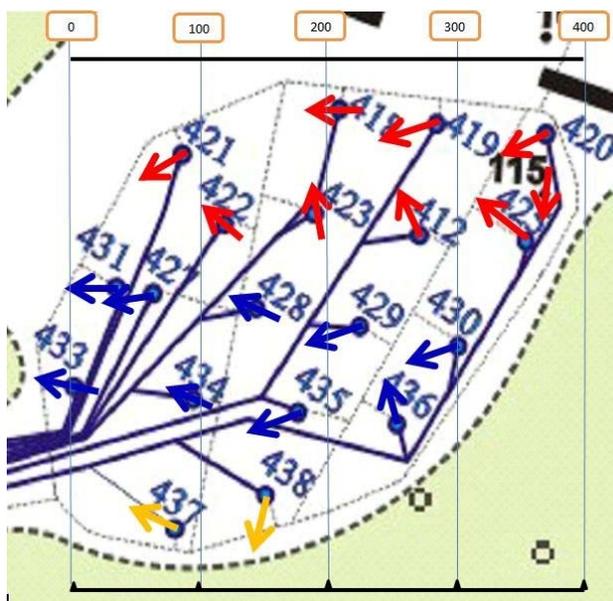


Рис. 9. Вектора распространения газа по пласту–коллектору Касимовского ПХГ

Полученные данные позволяют утверждать, что закачанный газ растекается по пласту–коллектору по двум потокам. В северной части исследуемой территории один поток охватывает область скважин 421, 418, 419, 420, 422, 423, 424 и 425 (красные векторы, см. рис. 9). Второй поток охватывает скважины 431, 427, 428, 429, 430, 436, 435, 434, 433 (синие векторы, см. рис. 9). Как и в предыдущих заключениях, уход газа с территории нагнетательных скважин происходит в направлениях З, СЗ. Исключение составляют две скважины – 437 и 438 (желтые векторы, см. рис. 9). Закачанный газ от 437 скважины, скорее всего, уходит в сторону второго выделенного потока. От 438 скважины газ через коллекторную область 437 скважины также может уходить в сторону второго потока. Однако здесь нельзя исключить возможность ухода газа в направлении Ю–ЮЗ.

Весьма показателен результат, полученный на 115 скважине, которая не использовалась в качестве нагнетательной. К ней газ приходит со стороны 420 скважины.

Через 7 суток после завершения цикла закачки на 4-й очереди Касимовского ПХГ вокруг каждой из 19-ти нагнетательных скважин в течение 2-х часов были сняты круговые диаграммы АЭП. Полученные значения поля усреднялись по каждой скважине. Нагнетательные скважины делились на 5 групп, каждая из которых была вытянута в направлении СВ–Ю. В табл. 2 представлены средние значения АЭП по каждой из групп нагнетательных скважин (1 группа расположена в ЮВ, 5 группа – в ЮЗ части 4-й очереди).

Таблица 2

**Средние значения АЭП по 5-ти группам нагнетательных скважин
4-й очереди Касимовского ПХГ**

	1 группа	2 группа	3 группа	4 группа	5 группа
АЭП, В/м	449	444	445	468	304

Из представленных в табл. 2 результатов видно, что через 7 суток после окончания цикла закачки метан оставался только в сфере действия 5-й группы нагнетательных скважин, которая ближе других к СЗ. Все это позволяет утверждать, что закачанный горючий газ от 4-й очереди Касимовского ПХГ уходит в СЗ–направлении. Более того, наличие масштаба на площади нагнетательных скважин (см. рис. 9), позволяет оценить скорость растекания газа по пласту–коллектору ~ (38–42) м/сутки.

Проанализируем результаты профильных измерений АЭП, выполненных в 2003, 2006–2007 гг. на территории Северо-Ставропольского ПХГ. Здесь в качестве буферного

резервуара используется пласт–коллектор Северо–Ставропольского месторождения, выработанный к концу XX века.

За многолетний период работы на Северо–Ставропольском ПХГ было заложено порядка 500 км профилей комплексных атмосферно–электрических и водород–радоновых наблюдений. В юго–западном секторе Северо–Ставропольского ПХГ один из наблюдательных профилей АЭП был выведен за границы горного отвода ПХГ [1].

Метеорологическая ситуация удовлетворяла условиям «хорошей погоды» [22–23]; исследуемая территория идеально подходила для атмосферно–электрических наблюдений (чистое поле, ближайшие посадки на расстоянии ~ 100 м от линии профиля). Первые 4 км профиля (пикеты 1–8) проходят над пластом–коллектором; пикеты 9–17 – вне проекции пласта–коллектора на поверхность Земли. На рис. 10 представлены измеренные и средние значения АЭП на 16–км профиле.

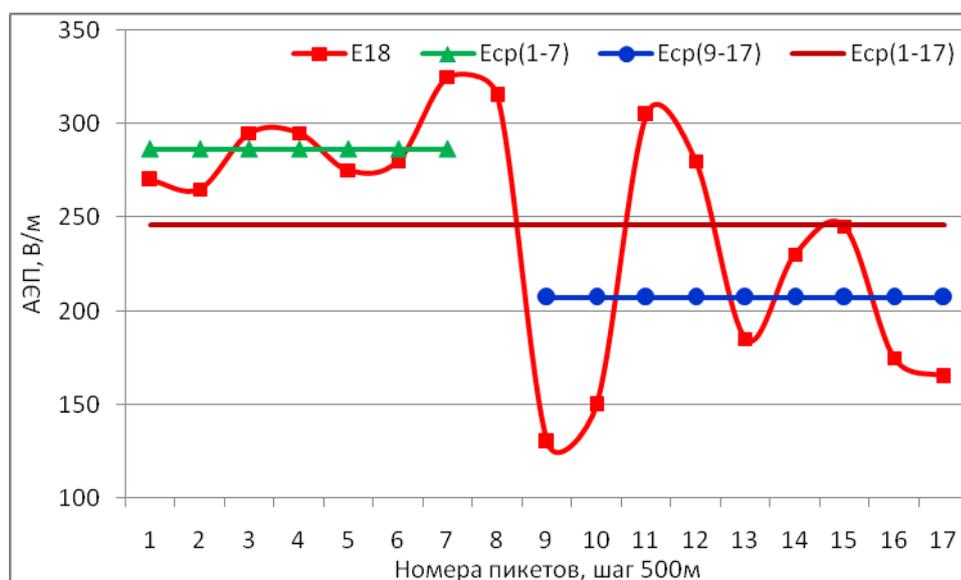


Рис. 10. Измеренные и средние значения АЭП на профиле, выходящем за пределы пласта–коллектора Северо–Ставропольского ПХГ (бывшего Северо–Ставропольского месторождения)

Средние значения поля вне зоны проекции пласта–коллектора на поверхность Земли ниже. Наблюдаемый результат позволяет сделать вывод, что поле над покрывочной областью бывшего Северо–Ставропольского месторождения заметно ниже (на $\Delta E = 61$ В/м), нежели чем за ее пределами. Более того, зарегистрированный спад поля имеет характер функции ($\sin x/x$).

Похожий результат уже был получен при профильных наблюдениях полярных проводимостей воздуха над искусственными и естественными разуплотнениями земной

коры – в «крест» линий метро и карстовых полостей [24]. По мере удаления от границы проекции зоны разуплотнения вариации контролируемого параметра претерпевали колебания, близкие функции $\sin x/x$. При этом длина четверти периода зарегистрированных на профиле колебаний соответствовала глубине заложения линии метро или глубине карстовой полости. В рассматриваемом случае длина четверти периода зарегистрированных колебаний АЭП соответствует величине 750 м при средней глубине пласта–коллектора ~ 800 м.

Заключение

АЭП и радон никогда не рассматривались в качестве геофизических параметров, отслеживающих вариации плотности субвертикального потока углеводородов к поверхности Земли и в атмосферу. Разработанная на основе теории приземного атмосферного электричества и данных комплексных наблюдений модель связей метана, водорода, радона и АЭП показывает, что две последние характеристики Земли и атмосферы крайне чувствительны к изменениям содержания метана почвенного воздуха. Согласно экспериментальным данным, АЭП и радон реагируют на изменения концентрации метана в приповерхностных слоях грунта уже на уровне $(10^{-6}-10^{-5})\%$ об. Таким образом, результаты оперативной съемки радона и (или) АЭП можно успешно использовать для картирования зон локализованной разгрузки метана в земной коре.

Эксперименты подтверждают правильность сформулированных положений.

1. По результатам профильной съемки АЭП удалось с поверхности Земли установить границы нефтяной залежи на 3-м Речицком нефтепромысле (Белоруссия), проследить динамику нефтеотбора в процессе трехлетней эксплуатации скважины;

2. Результаты профильной съемки АЭП и радона позволили с поверхности Земли установить границы Александровского нефтяного месторождения (Белоруссия);

3. По данным профильной съемки АЭП установлена граница проекции пласта–коллектора Северо-Ставропольского газового месторождения (ныне Северо-Ставропольского ПХГ) на поверхность Земли, выявление вариации поля при выходе за пределы границы проекции пласта–коллектора позволяет оценить глубину залегания пласта–коллектора.

Особый интерес представляют результаты наблюдений АЭП на территориях подземных ПХГ.

1. По материалам многопрофильных измерений поля удается картировать контур проекции пласта–коллектора на поверхность Земли;

2. Имеется возможность отследить с поверхности Земли процесс растекания горючего газа от куста нагнетательных скважин по пласту–коллектору.

Приборы для регистрации объемной активности радона грунта и атмосферы выпускаются отечественной промышленностью. Измерительные инструменты для наблюдений АЭП в промышленном масштабе не изготавливаются, но уже многие годы они создаются силами ОКБ Института физики Земли РАН, Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург), Владимирского государственного университета, Муромского филиала Владимирского государственного университета, Ростовского государственного университета. В последние десятилетия отработана методика мобильных непрерывных профильных измерений АЭП с борта автотранспортного средства, движущегося со скоростью до 30–40 км/час. Все это позволяет рекомендовать такие нетрадиционные для нефтегазовой геофизики параметры, как АЭП и радон, к активному использованию при картировании зон локализованной разгрузки углеводородов в земной коре.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зубарев А.П., Шулейкин В.Н.* Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. М.: Изд-во «Газпром ПХГ», 2009. 264 с.

2. *Гергедава Ш.К., Бузинов С.Н., Шулейкин В.Н., Войтов Г.И.* Нетрадиционная геофизика для подземных хранилищ газа // Нефть, газ и бизнес. 2001. № 5(43). С. 2-7.

3. *Баранов В.И.* Радиометрия. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 343 с.

4. *Войтов Г.И., Рудаков В.П., Шулейкин В.Н., Козлова Н.С., Баранова Л.В.* Эманационные и электрические эффекты в атмосфере подпочв над Калужской кольцевой структурой // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1, № 6. С. 503-510.

5. *Войтов Г.И., Гусев А.С., Шулейкин В.Н.* и др. Эманационные и электрические эффекты над сложнопостроенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны приразломных поднятий, Белоруссия) // ДАН РАН. 2000. Т. 370, № 1. С. 105-108.

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

7. *Сисигина Т.И.* Эксхалация радона с поверхности нескольких типов почв Европейской части СССР и Казахстана // Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии. М.: Атомиздат, 1965. С. 40-48.
8. *Тверской П.Н.* Курс метеорологии. Л.: Гидрометиздат, 1951. 887 с.
9. *Имянитов И.М., Чубарина Е.В.* Электричество свободной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 240 с.
10. *Шулейкин В.Н.* Бесконтактный метод контроля герметичности ПХГ и газовых скважин // Oil & Gas Journal Russia. 2012. № 6(61). С. 86-90.
11. *Шулейкин В.Н.* Атмосферное электрическое поле над скоплениями углеводородов // Электрон. науч. журнал «Георесурсы, геоэнергетика, геополитика». 2010. Вып. 2. 20 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru>.
12. *Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.* Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1976. 255 с.
13. *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.
14. *Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С.* Электродинамическая модель турбулентного приземного слоя при наличии многократно заряженных аэрозольных частиц // VII Всеросс. конф. по атмосферному электричеству: Сб. науч. тр. СПб. 2012. Т. 1. С. 199-201.
15. *Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С., Букантис А.А.* Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // VII Всеросс. конф. по атмосферному электричеству: Сб. науч. тр. СПб. 2012. Т. 1. С. 202-203.
16. *Войтов Г.И., Старобинец И.С., Усманов Р.И.* О плотности потоков CH_4 в атмосферу в нефтегазоносных регионах (на примере Аму-Дарьинской впадины) // ДАН СССР. 1990. Т. 313, № 6. С. 1444-1448.
17. *Войтов Г.И., Абдувалиев А.К., Аммосов С.М.* и др. О вариациях химического состава углеводородных газов в истощенных пластовых системах нефтяных месторождений Сель-Рохо (Западная Фергана) и Абузы (Краснодарский край) // ДАН СССР. 1990. Т. 313, № 5. С. 1085-1089.

18. 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. Т. 301, № 1. 1988. С. 62-68.
19. Широков Б.И. Атмосферное электричество и залежи углеводородов // Труды X Междунар. конф. по геоинформатике. Украина. Киев. 2011. S147.
20. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Таскинбаев К.М. Геоэлектрические исследования нефтеносных надсолевых и подсолевых отложений купольной структуры Карсак (Западный Казахстан) // Геоинформатика. 2004. № 3. С. 28-32.
21. Никонов А.И., Новаковский Б.А., Переверзев М.В. Геоинформационное эколого-геохимическое картографирование подземного хранилища газа // Геоинформатика. 2002. № 1. С.3-8.
22. Руководство по наземным наблюдениям за элементами атмосферного электричества. Л.: Изд-во ГГО им. А.И. Воейкова, 1960. 95 с.
23. Семенов К.А. Хорошая погода и элементы атмосферного электричества // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 1982. Вып. 455. С. 112-119.
24. Шулейкин В.Н. Результаты наблюдений полярных проводимостей почвенного воздуха в черте городской застройки // Развитие методов и средств экспериментальной геофизики: Сб. науч. тр. 1996. Вып. 2. С. 235-240.