

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ К ИЗМЕНЕНИЯМ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВОДОРОДА И МЕТАНА

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

Объемный заряд приземного воздуха обязан своим происхождением ионизации эксхалирующим почвенным радоном [1–4]. Высокий молекулярный вес радона  $Rn^{222}$  исключает возможность его самопроизвольной субвертикальной миграции. Долгое время считалось, что перенос ионизатора в приповерхностные слои грунта и атмосферу осуществляется пузырьковыми образованиями всех летучих газов почвенного воздуха [5–7]. Эксперименты последних лет показали, что в качестве газов-носителей выступают только два из них – водород и метан [8–11]. Полученный результат позволил построить модельное приближение связей газовых и электрических характеристик грунта и атмосферы (рис. 1).



Рис. 1. Модельное представление связей водорода, метана, радона почвенного воздуха и атмосферного электрического поля

Субвертикальный поток водорода и метана захватывает атомы радона с глубины 4–6 метров и выносит их в приповерхностные слои грунта и атмосферу, где радиоактивный газ становится единственным естественным ионизатором воздуха [1, 3, 9,

11]. Образующие при этом легкие ионы определяют полярные проводимости воздуха; их рекомбинация с нейтральными ядрами конденсации приводит к образованию тяжелых ионов, определяющих атмосферное электрическое поле (АЭП). При дефиците ионизатора имеет место классический электродный эффект – плавный спад поля с выходом на нормальный фоновый уровень [12–14]; при избытке – реверсивный электродный эффект, проявляющийся в спаде поля (порой до отрицательных значений), перегибом и последующим ростом до фонового уровня [12–16].

Проведем грубую оценку чувствительности элементов приземного атмосферного электричества к режиму эксхалации почвенного радона. Содержание радона грунта не менее, чем в 100 раз превышает содержание радона атмосферы [17–18]. Изменение выноса ионизатора в атмосферу в 2 раза практически не скажется на содержании радона грунта. 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, в частности атмосферное электрическое поле, крайне чувствительны к изменению плотности субвертикального потока водорода и метана.

Используя материалы полевых наблюдений на территории Северо-Ставропольского и Касимовского ПХГ, рассмотрим чувствительность АЭП к изменениям концентраций водорода и метана в приповерхностных слоях грунта. Все измерения проводились с применением:

- датчика АЭП, флюксметра «Градиент» разработки и изготовления ГГО им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург (относительная ошибка единичного отсчета 5%);
- датчика объемной активности радона РГА-01 (относительная ошибка единичного отсчета 30%, путем троекратного усреднения она снижается до ~ 17%);
- датчик водорода ВСГ-01 разработки и изготовления МИФИ (относительная ошибка единичного отсчета ~ 10% [19–20]).

#### **Результаты атмосферно-электрических и водород-радоновых измерений на кольцевом профиле в зоне аварийного газопроявления с высоким содержанием метана**

Первый цикл измерений на территории Северо-Ставропольского газохранилища (на Пелагиадской структуре) был проведен в октябре 2001 г. Здесь на улице Клубничной (д. 43) хутора Пелагиада возникло аварийное газопроявление – грифон [8].

За несколько месяцев до начала работ на аварийном участке была забурена разгрузочная скважина № 1. Приходящий к ней метан отводился в сторону и сжигался. Схема расположения наблюдательного кольцевого профиля, заложенного в октябре 2001 г., представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема расположения разгрузочной скважины и кольцевого наблюдательного профиля на площадке у аварийного дома по ул. Клубничная, 43

Из опроса местных жителей следовало, что «возгорания земли» от брошенного окурка или спички неоднократно наблюдались на площади, расположенной на удалении 60–70м к востоку от аварийного дома и несколько севернее его. Чаще всего это «возгорание земли» возникало после взрывных работ на карьере «Пелагиадский маяк», расположенном выше по склону, на плато, на 1,0–1,5 км южнее исследуемой территории. Наблюдаемое явление понятно с физической точки зрения. Сейсмическое воздействие взрывов интенсифицировало воздухообмен почва–атмосфера, в том числе и наблюдаемый сброс метана в приповерхностную атмосферу [8].

В ходе изысканий специалистов Кавказтрансгаза было установлено вероятное направление прихода метана к разгрузочной скважине с северо-запада. Кольцевой профиль закладывался на эту вероятную линию прихода газа. На рис. 3 представлены

записи концентраций метана грунта (результаты лабораторного анализа образцов почвенного воздуха) и АЭП (результат усреднения после двух последовательных проходов кольцевого профиля).

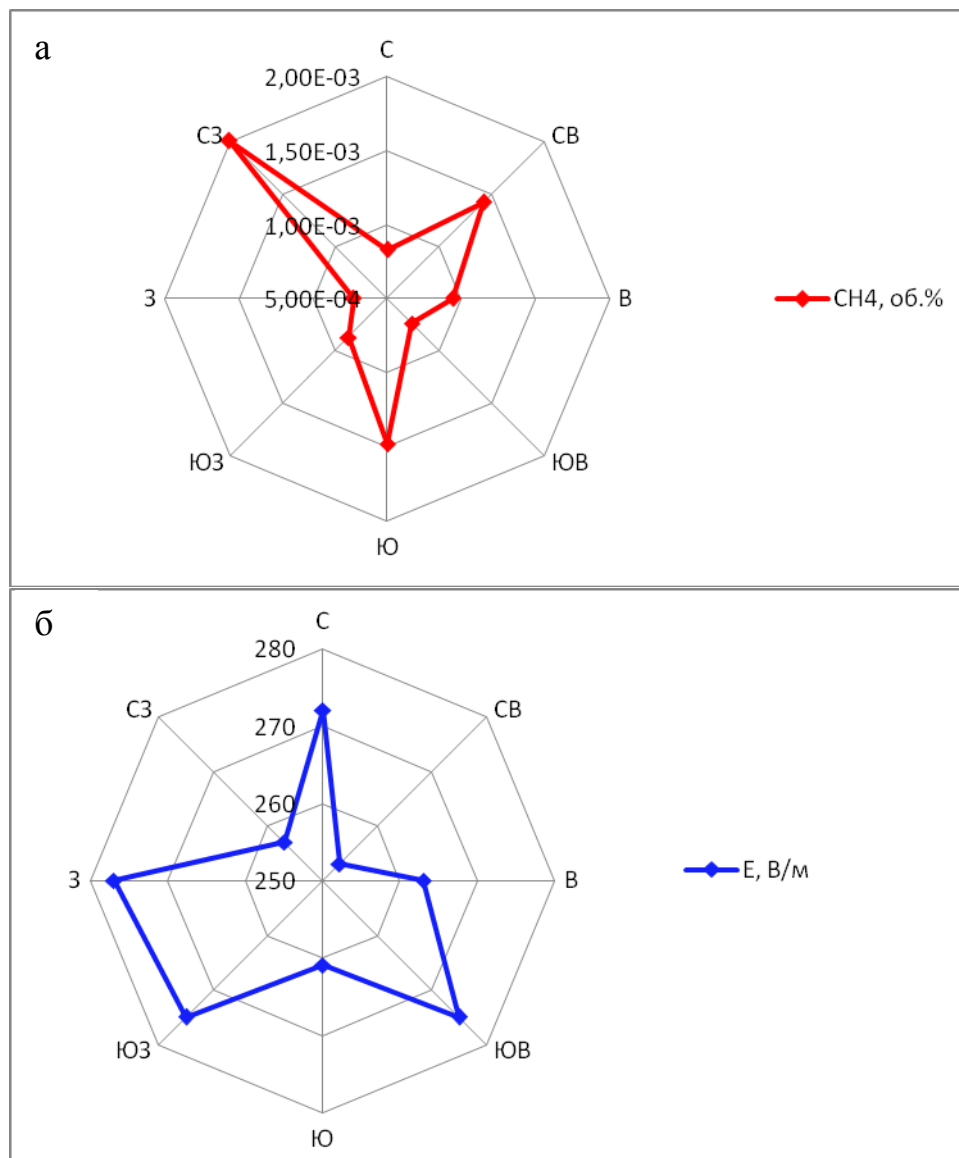


Рис. 3. Вариации концентраций: а – метана грунта (CH<sub>4</sub>) и б – атмосферного электрического поля (E) на кольцевом профиле ниже разгрузочной скважины № 1

На круговой диаграмме содержания метана грунта видно, что максимальные значения контролируемого параметра приходятся на:

- З–СЗ направление (направление прихода газа по данным Кавказтрансгаза);
- Ю направление, где концентрации метана несколько ниже (следствие работы разгрузочной скважины);

- СВ–В направление (направление на площадь разгрузки метана при проведении взрывных работ на карьере Пелагиадский маяк).

Вариации АЭП на кольцевом профиле в противофазе уверенно повторяют изменения содержания метана грунта  $k(\text{CH}_4; E) = -0,83$ . Единственное заметное отклонение зарегистрировано на СВ направлении, где по полю зарегистрировано самое низкое значение  $E_{\text{СВ}} = 253$  В/м. Причина тому чисто техническая: заезд на кольцевой профиль проходил под линией электропередач, которая частично экранировала регистрируемое АЭП.

Высокий уровень корреляции метана и АЭП позволяет утверждать, что на исследуемом участке перенос ионизатора осуществляется в основном пузырьковыми образованиями горючего газа; участие в переносе водорода минимально. Перепады концентраций метана оказывают основное влияние на изменения поля. На рис. 4 представлены данные наблюдений метана и АЭП и их степенная аппроксимация.

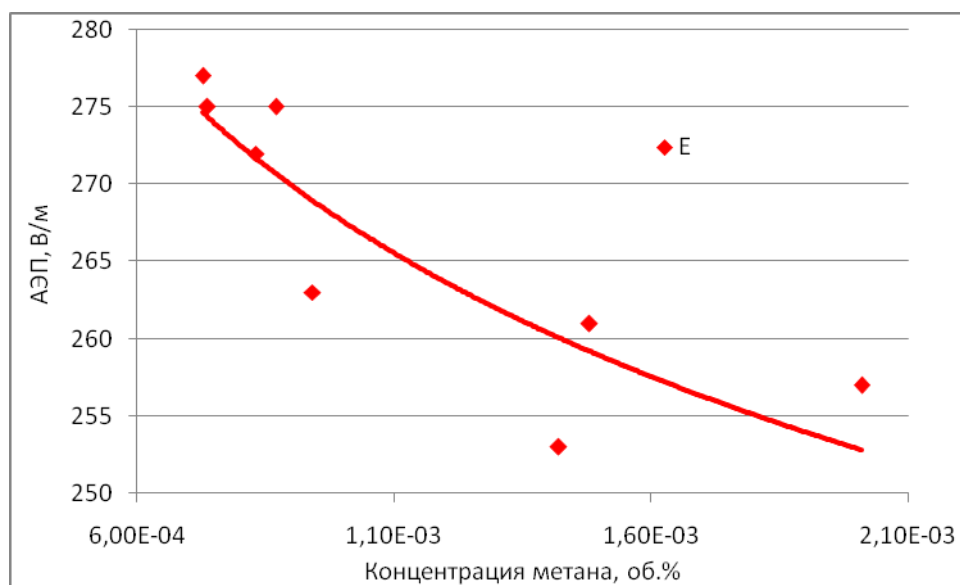


Рис. 4. Результаты наблюдений АЭП и концентрации метана на кольцевом профиле и их степенная аппроксимация

С достоверностью  $D = 0,78$  АЭП задается функцией  $E = 152,33\text{CH}_4^{-0,082}$  [В/м]; величина  $\text{CH}_4$  нормирована на 1 об.%. Производная поля по концентрации метана запишется в виде  $dE/d\text{CH}_4 = 152,33*(-0,082)\text{CH}_4^{-1,082}$  [В/м об.%.].

Практика многочисленных наблюдений АЭП показывает, что при снятии текущих показаний на наблюдательном пикете разброс вариаций поля не превышает  $\sim 0,5\text{--}1,0$  В/м; причины разброса чисто метеорологические, в первую очередь, изменения ветровой

нагрузки. Поэтому за пороговую величину поля, которая уверенно фиксировалась исключительно из-за вариаций плотности газа-носителя, было взято изменение АЭП  $\Delta E = 2$  В/м. Расчеты с использованием производной, полученной для средних значений концентрации метана на исследуемом профиле, приводят к изменениям концентрации метана  $\Delta CH_4 = 9,02 \cdot 10^{-5}$  об.%, что составляет 8% от среднего значения концентрации метана на 8 пикетах кольцевого профиля при изменении поля на пороговую величину  $\Delta E = 2,0$  В/м.

Наблюдения на площадке у аварийного дома положили начало использованию атмосферно-электрического и водород-радонового комплекса на Северо-Ставропольском ПХГ. Как отмечалось выше, для регистрации водорода грунта в комплексе использовался датчик ВСГ-01, разработки и изготовления МИФИ [19–20]. Датчик создавался для длительных непрерывных измерений содержания водорода, и методика использования его для оперативной съемки только отрабатывалась.

На кольцевом профиле были проведены измерения содержания водорода грунта на 8-ми наблюдательных пикетах, но полученные результаты не коррелировали ни с АЭП, ни с объемной активностью радона грунта и атмосферы. Причин полученного результата может быть две: недоработка методики измерений; малые концентрации содержания водорода грунта, минимизирующие его участие в переносе радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу (наблюдения проводились на площади аварийного сброса метана при работающей разгрузочной скважине). Второй вариант отмеченных причин уверенно укладывается в рассматриваемую модель газовых и атмосферно-электрических взаимодействий – отношение средних значений водорода на профиле к средним значениям метана  $H_2/CH_4 = 0,021$ .

### **Результаты измерений на профиле с близкими концентрациями газов-носителей**

Проведем идентичный анализ результатов наблюдений АЭП, радона и водорода на еще одном профиле с аномальными изменениями контролируемых параметров, вызванными геологическими особенностями. Это – профиль 18 на территории Северо-Ставропольского газохранилища, выходящий за границы проекции пласта-коллектора на поверхность Земли [8].

По результатам наблюдений 2006–2007 гг. на территории Северо-Ставропольского газохранилища с относительной ошибкой 28% была введена рабочая формула для оценки содержания метана как функция радона грунта –  $R_n$  и радона атмосферы –  $R_n(a)$

$$\text{CH}_4 = [\text{Rn}(a) - 0,1331]/(3187,1 * \text{Rn}) \text{ [об. \%]}, \quad (1)$$

где измеренные значения Rn и Rn(a) нормированы на 1 Бк/л. На рис. 5 приведены вариации АЭП и метана по всей длине профиля.

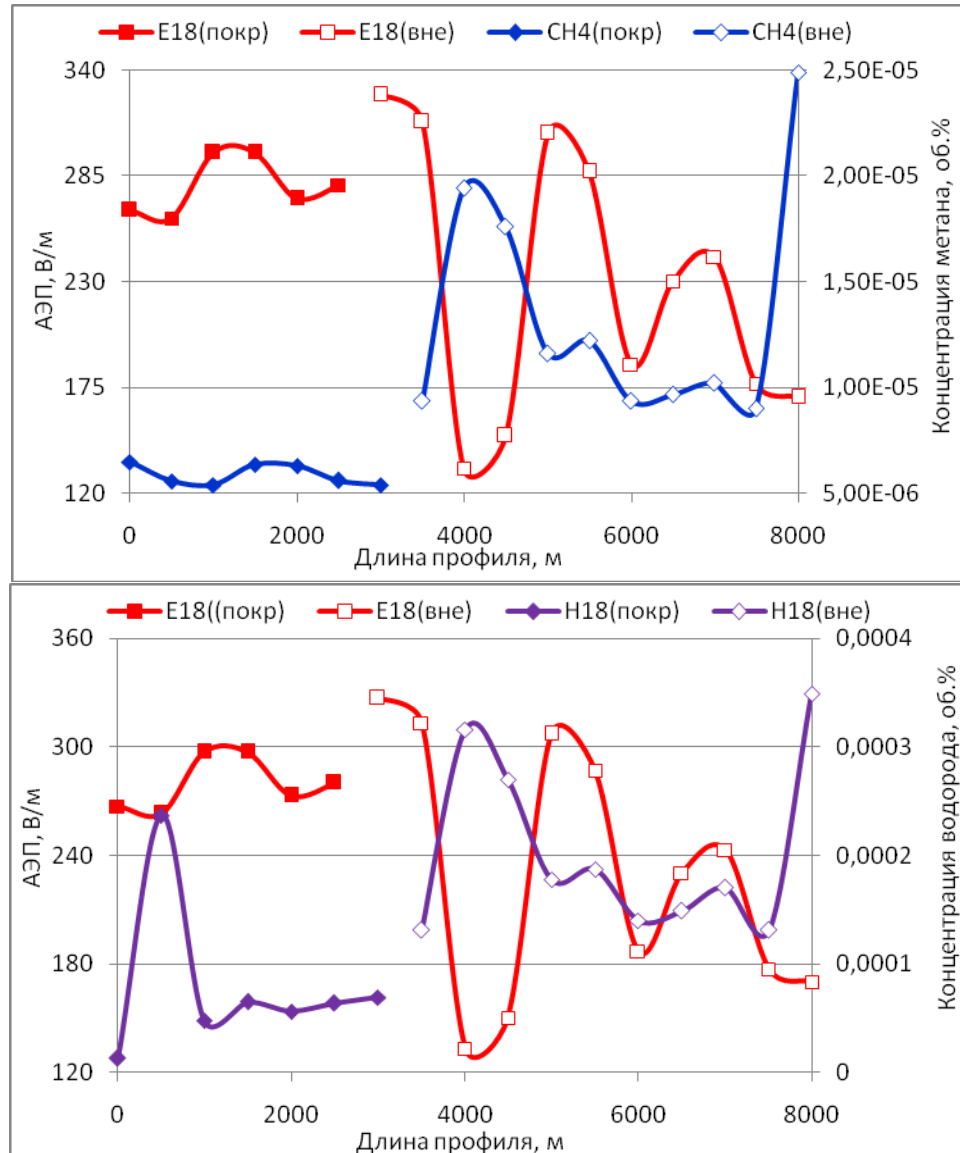


Рис. 5. Вариации АЭП и концентрации метана и водорода грунта на 8000 м профиля 18 в покрывной области и вне ее

По данным изменения АЭП и водорода проекция покрывной области газохранилища лежит между отметками 2500–3000 м. Представляет очевидный интерес сравнение абсолютных значений концентраций метана грунта на аварийном газопроявлении (см. рис. 2), над покрывной областью ПХГ и вне ее. Средняя концентрация метана на кольцевом профиле аварийного газопроявления  $\text{CH}_4(\text{газ}) = 1,13 \cdot 10^{-3}$  об.%; над покрывной областью –  $\text{CH}_4(\text{покр}) = 5,87 \cdot 10^{-6}$ ; вне покрывной

области –  $\text{CH}_4(\text{вне}) = 1,33 \cdot 10^{-5}$  об.%. Таким образом, на аварийном участке газопроявления содержание метана грунта в среднем в 221 раз больше, чем над покрывкой ПХГ, и в 98 раз больше, чем за пределами покрывки.

Из трех рассмотренных выше параметров АЭП и концентрация водорода грунта измерялись на наблюдательных пикетах профиля, а концентрация метана рассчитывалась как функция измеренных на тех же пикетах значений радона грунта и радона атмосферы (см. выражение 1). Модули коэффициентов корреляции АЭП и газовых параметров достаточно велики:  $k(E; \text{CH}_4) = 0,70$ ,  $k(E; \text{H}_2) = 0,67$ . Графики газовых параметров достаточно уверенно повторяют друг друга. Полученный результат подтверждает достоверность установленных причинных связей водорода, метана, радона и элементов приземного атмосферного электричества.

Исключение составляет высокое значение водорода на пикете с отметкой 500 м (см. рис. 5). Причина этого выброса, скорее всего, определяется чисто техническими особенностями измерительного инструмента. Профиль 18 был заложен в пределах посевной площади, куда, без сомнения, вносились органические удобрения. К сожалению, датчик водорода, помимо способности к измерению газа, обладает высокой чувствительностью еще и к сероводороду –  $\text{H}_2\text{S}$  [19]. Скорее всего, зарегистрированные высокие значения параметра АЭП на отметке 500 м связаны с тем, что на данном наблюдательном пикете в почве в большом количестве присутствовала разлагающаяся органика.

Обращает на себя внимание колебательный характер изменений концентрации метана грунта и АЭП после выхода профиля за пределы проекции покрывки газохранилища на земную поверхность. Подобное явление уже наблюдалось при профильных измерениях полярных проводимостей воздуха «в крест» с линиями метро [21]. Контролируемый параметр изменялся с удалением от подземного инженерного сооружения, близко к функции  $\cos X/X$ . Помимо основного максимума над подземным инженерным сооружением наблюдался побочный максимум; расстояние между максимумами было сравнимо с глубиной подземного инженерного сооружения.

По аналогии с подземным инженерным сооружением глубину залегания покрывки ПХГ следует оценить величиной  $\sim 1500$  м. По данным бурения глубина залегания покрывки Северо-Ставропольского газохранилища в купольной части оценивается величиной 800–1000 м.



Повторяя процедуру обработки данных наблюдений, проведем аппроксимацию результатов измерений АЭП как функции содержания метана грунта. С достоверностью  $D = 0,81$  поле аппроксимируется степенной функцией  $E = 0,712\text{CH}_4^{-0,501}$  [В/м]; значения метана нормированы на 1 об.%; производная поля по концентрации метана  $dE/d\text{CH}_4 = 0,712*(-0,501)*\text{CH}_4^{-1,501}$  [В/м об.%]. Тогда, для средней величины концентрации метана изменение поля на 2,0 В/м будет вызвано изменением средней величины концентрации метана на 18%.

Аналогичные расчеты для водорода, второго газа-носителя радона, с достоверностью  $D = 0,83$  приводят к выражениям  $E = 7,4607\text{H}_2^{-0,378}$  [В/м], значения водорода нормированы на 1 об.%;  $dE/d\text{H}_2 = 7,46*(-0,378)*\text{H}_2^{-1,378}$  [В/м об.%]. Изменение поля на 2,0 В/м будет вызвано изменением концентрации водорода грунта на 2,6% относительно среднего значения.

Полученный результат понятен с физической точки зрения. Молекулярный вес водорода в 8 раз меньше молекулярного веса метана. Поскольку пузырьковое образование газа-носителя несет на себе и собственный вес, вероятность захвата и выноса в атмосферу ионизатора водородом будет больше, нежели метаном. Отсюда и вытекает большая чувствительность изменений АЭП к вариациям плотности субвертикального потока водорода. В частности, для рассматриваемого случая эту величину можно оценить из отношения процентной доли водорода и метана. Похоже, эта цифра близка к реальности, так как из оценок по Северо-Ставропольскому газохранилищу 15% радона переносится метаном и 85% – водородом ( $85 / 15 = 5,7$ ).

С учетом данных лабораторного анализа 72 образцов почвенного воздуха на содержание водорода и метана, взятых под Щелковым, Калугой и на Северо-Ставропольском ПХГ (52 пробы) было получено уравнение связи этих двух летучих газов:

$$\text{CH}_4 = \exp[1,675\text{Ln}(\text{H}_2) + 2,762] \text{ [об. \%] }, \quad (2)$$

где значения  $\text{H}_2$  нормированы на 1 об.%. На рис. 6 представлены расчетные значения метана как функции радона грунта и атмосферы (см. выражение 1) и расчетные значения метана как функции водорода (см. выражение 2). Коэффициент корреляции представленных на графиках расчетных величин очень велик:  $k\{\text{CH}_4[\text{Rn}, \text{Rn(a)}]\text{CH}_4(\text{H}_2)\} = 0,91$ . Это лишний раз убеждает в правильности введенных рабочих выражений (1) и (2) и модельных представлений связей водорода, радона и характеристик приземного атмосферного электричества.

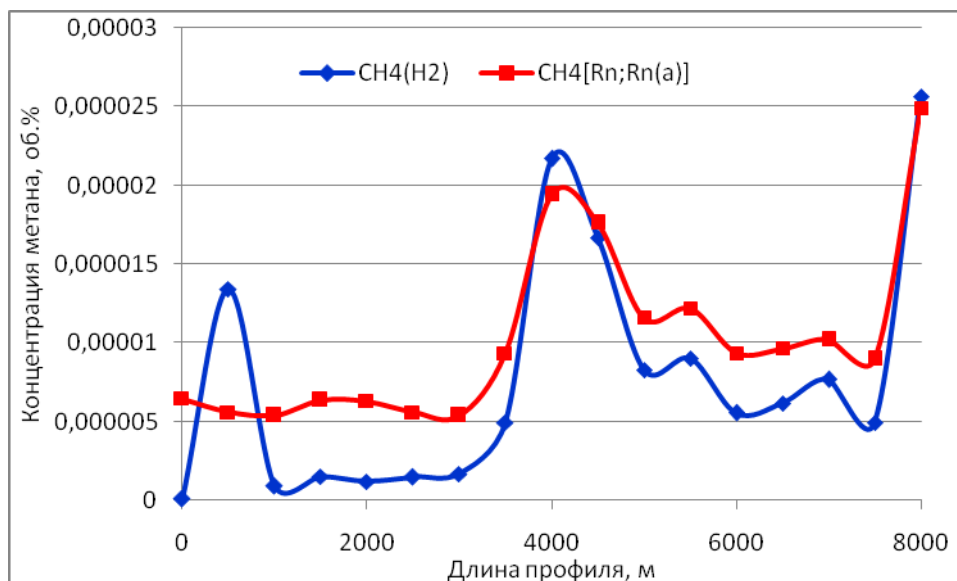


Рис. 6. Расчетные значения метана как функции радона грунта и атмосферы (см. выражение 1) и расчетные значения метана как функция водорода (см. выражение 2) на профиле 18

### Результаты измерений на профиле с высокой концентрацией водорода

Результаты наблюдений на кольцевом профиле были выбраны для иллюстрации поведения газовых и атмосферно-электрических параметров в случае доминирующего участия метана в переносе радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу на аварийном газопроявлении. Второй пример иллюстрирует газовые и электрические взаимодействия при сравнимых концентрациях газов-носителей ионизатора. В заключение обратимся к исследованию рассматриваемых связей в случае очевидно бóльшей концентрации водорода на наблюдательном профиле.

На первом этапе анализа рассмотрим с использованием введенных выражений (1–2) работоспособность введенного модельного построения связей радона грунта, атмосферы и водорода. На рис. 7 представлены результаты расчетов содержания метана грунта по данным измерений объемной активности радона грунта и радона атмосферы (см. выражение 1), и концентрации водорода (см. выражение 2). Коэффициент корреляции расчетных кривых достаточно велик:  $k[Rn, Rn(a); H_2] = 0,74$ . Более того, близки друг другу даже средние значения содержания метана грунта:  $CH_4[Rn, Rn(a)] = 8,28 \cdot 10^{-5}$  об.%,  $CH_4(H_2) = 5,14 \cdot 10^{-5}$  об.% (см. рис. 6).

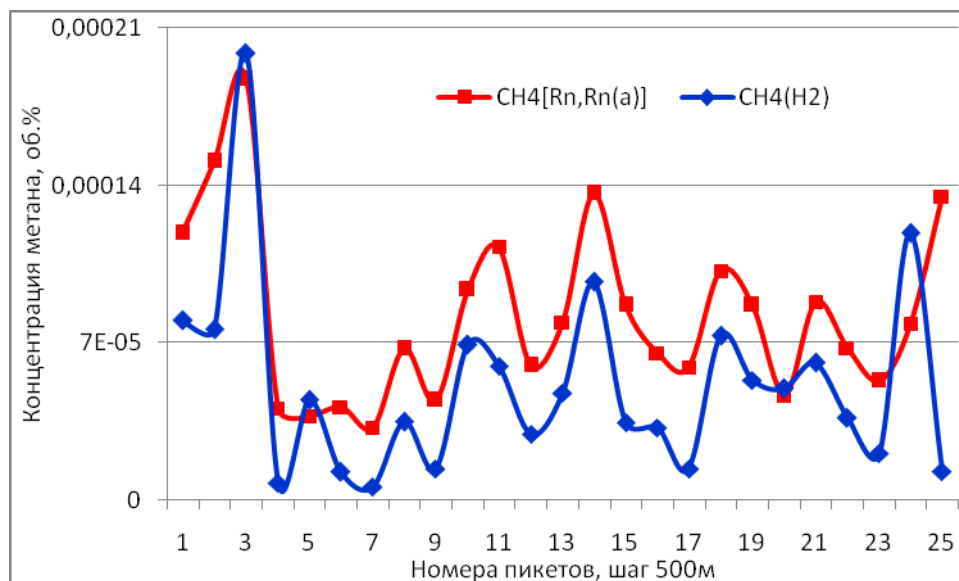


Рис. 7. Результаты расчетов концентрации метана грунта как функции радона грунта и атмосферы и водорода грунта

Подобное совпадение расчетных значений метана грунта в зависимости от зарегистрированных объемных активностей радона грунта и атмосферы и от водорода грунта очередной раз подтверждает правильность сформулированных модельных представлений. Причина разброса лежит, скорее всего, в ошибке измерений, в погрешностях регистрации объемной активности радона (см. введение).

Степенная аппроксимация АЭП и метана приводит с достоверностью  $D = 0,73$  к выражению  $E = 0,0833 \cdot \text{CH}_4^{-0,265}$  [В/м], концентрация метана нормирована на 1 об.%; производная по метану  $dE/d\text{CH}_4 = -0,02207 \cdot \text{CH}_4^{-1,265}$  [В/м об.%]. Для среднего значения концентрации метана  $\text{CH}_4(\text{сред}) = 8,28 \cdot 10^{-5}$  об.% на рассматриваемом массиве данных даже 100% отклонение от среднего значения приведет к изменениям поля всего на 0,3 В/м.

Повторение процедуры только для выявления степенной зависимости АЭП от концентрации водорода грунта с достоверностью  $D = 0,72$  приводит к выражениям  $E = 19,4 \cdot \text{H}_2^{-0,321}$  [В/м], содержание водорода нормировано на 1 об.%;  $dE/d\text{H}_2 = -6,23 \text{H}_2^{-1,321}$  [В/м об.%]. Для среднего содержания водорода на рассматриваемом массиве данных  $\text{H}_2 = 4,93 \cdot 10^{-4}$  об.% отклонение содержания водорода грунта от среднего значения 2,8% приведет к вариациям АЭП  $\Delta E = 2,0$  В/м. Для удобства сравнения полученных оценочных результатов по чувствительности АЭП к изменениям содержания водорода и метана грунта все полученные расчетные результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Чувствительность АЭП к изменениям концентраций водорода и метана  
в приповерхностном грунте**

	Средний водород	Средний метан	Чувствительность Е к изменениям водорода	Чувствительность Е к изменениям метана	$H_2/CH_4$
Кольцевой профиль	0,000024 об.%	0,00113 об.%	–	$\Delta CH_4 = 1,13 \cdot 10^{-5}$ об. % – 10% от $CH_4$ (сред) $\Delta E = 2,0$ В/м	0,021
Профиль 18	0,0000103 об.%	0,0000108 об.%	$\Delta H_2 = 4,0 \cdot 10^{-6}$ об. % – 2,6% от $H_2$ (сред) $\Delta E = 2,0$ В/м	$\Delta CH_4 = 1,91 \cdot 10^{-6}$ об. % – 18% от $CH_4$ (сред) $\Delta E = 2,0$ В/м	1
Профиль 4	0,000493 об.%	0,0000828 об.%	$\Delta H_2 = 1,48 \cdot 10^{-5}$ об. % – 2,8% от $H_2$ (сред) $\Delta E = 2,0$ В/м	$\Delta CH_4 = 8,29 \cdot 10^{-5}$ об. % – 100% от $CH_4$ (сред) $\Delta E = 0,3$ В/м	6

Представленные в таблице данные, на первый взгляд, свидетельствуют о том, что изменения содержания метана грунта оказывают весьма слабое влияние на вариации АЭП. Однако здесь, в первую очередь, надо обратить внимание на оценочные уровни концентраций метана грунта. Среднемировой уровень концентрации метана в приповерхностных слоях грунта и приземной атмосфере  $\sim 8 \cdot 10^{-5}$  об.%. Это значит, что только для случая работ на аварийном газопроявлении зарегистрированный средний уровень концентрации метана был в 14 раз выше среднемирового уровня. Во втором примере средний уровень метана был в 7,4 раза меньше среднемирового, в третьем – сравним с ним.

По принятой классификации предельные фоновые допустимые концентрации метана 0,101–0,500 об.%; предельно допустимые аномальные концентрации – 0,501–0,700 об.%; малоопасные повышено-аномальные концентрации – 0,701–1,000 об.% (ГОСТ 12.01.044-89 5541-87).

Высокие достоверности введенных аппроксимационных оценочных выражений позволяют утверждать, что увеличение уровней загазованности приповерхностных ареалов метаном будет линейно увеличивать чувствительность АЭП к изменениям концентраций горючего газа. Проведем оценку этого утверждения с использованием материалов полевых наблюдений.

Осенью 2009 г. комплекс водород-радоновых и атмосферно-электрических измерений использовался на территории 4-й очереди Касимовского ПХГ. Измерения были

начаты через сутки после завершения недельного цикла закачки. Газовые наблюдения на площади 19-ти нагнетательных скважин проводились в течение 4,5 дней (~ 34 пикета в сутки), рис. 8.

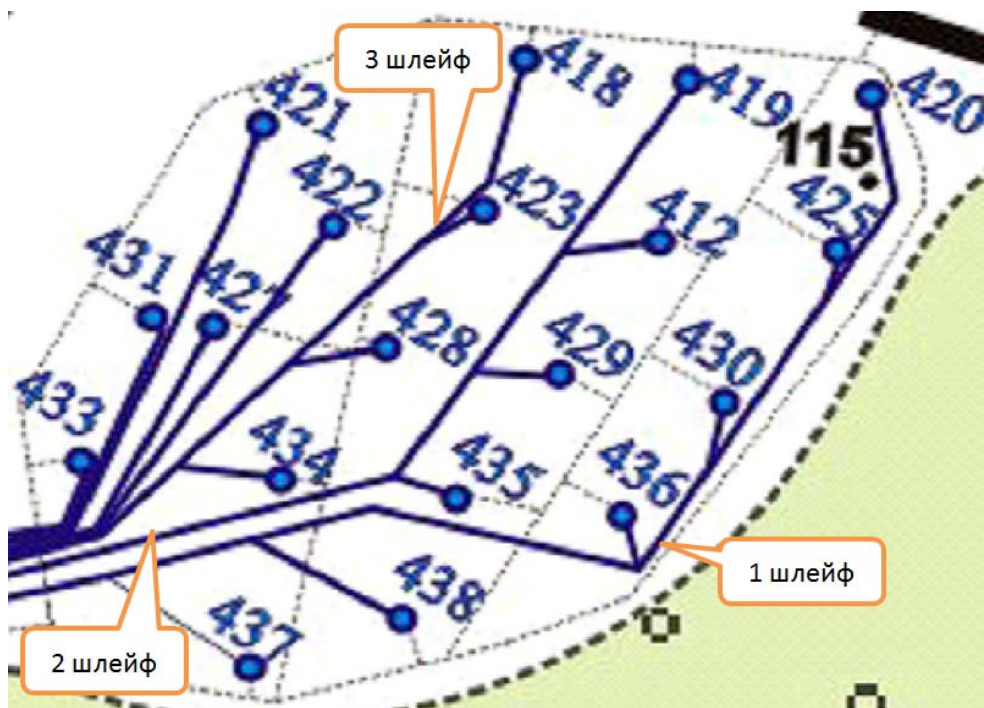


Рис. 8. План 19-ти нагнетательных скважин на территории Касимовского ПХГ

За счет ухода закаченного газа к купольной области покрывки воздухообмен почва–атмосфера за этот период был подвержен сильным изменениям. Для получения квазимгновенной картины воздухообмена в последний день проведения работ на 152-х пикетах (8 пикетов вокруг каждой скважины) была проведена мобильная съемка АЭП. Средние значения поля для 5-ти выделенных линий скважин даны в таблице 2.

Таблица 2

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

	Шлейф 1	Шлейф 2	Шлейф 3	Скв. 422, 427, 433	Скв. 421, 431
Е(ср), В/м	449	444	445	468	<b>304</b>

Из представленных в табл. 2 данных видно, что на момент наблюдений метан оставался только под группой нагнетательных скважин 421 и 431 (самой северо-западной части). Среднее содержание метана вокруг скважин 422, 427, и 433  $\text{CH}_4(\text{ср}) = 0,006$  об.%; вокруг скважин 421 и 431 –  $\text{CH}_4(\text{ср}) = 0,012$  об.%. Перепады поля и концентраций метана

между выделенными линиями скважин  $\Delta E = 164$  В/м,  $\Delta \text{CH}_4 = 0,006$  об.%. Отсюда изменения поля  $\Delta E = 2$  В/м будут вызваны вариациями концентрации метана  $\Delta \text{CH}_4 = 1,13 \cdot 10^{-4}$  об.%; что составляет 1,25% от среднего значения его концентрации. Полученный результат подтверждает высказанное предположение об обязательном повышении чувствительности АЭП с ростом концентрации метана в приповерхностных слоях грунта.

### **Заключение**

Атмосферное электрическое поле, водород и радон никогда не рассматривались в качестве геофизических параметров, отслеживающих вариации плотности субвертикального потока метана 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 атмосферное электричество крайне чувствительно 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.%, тогда как существующие измерительные инструменты допускают оперативную регистрацию горючего газа до 0,1 об.%. Таким образом, результаты оперативной съемки АЭП и (или) радона можно успешно использовать для поиска, разведки и контроля динамики эксплуатации УВ-скоплений. При этом АЭП предпочтительнее, так как его можно наблюдать в движении с борта автотранспортного средства; регистрация радона – более емкий по времени процесс, с погрешностью минимум в 3 раза бóльшей, чем АЭП даже после усреднения.

Исследования чувствительности атмосферного электрического поля к изменениям плотности субвертикальных потоков водорода и метана позволяют сделать ряд следующих выводов:

1. Разработанная модель связей водорода, метана, радона и атмосферного электрического поля полностью подтверждается результатами полевых наблюдений и выполненными расчетами.

2. Основным газом–носителем радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу является водород, молекулярный вес которого в 8 раз меньше, чем молекулярный вес метана. По результатам оценки, произведенной на основе материалов наблюдений на Северо-Ставропольском ПХГ, где содержание горючего газа колеблется в

пределах  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  об.%, пузырьковые образования водорода переносят в 5,7–6,9 раз больше ионизатора, чем пузырьковые образования метана.

3. Согласно классификации приповерхностных ореолов загазованности (ГОСТ 12.01.044-89 5541-87) минимальные фоновые допустимые концентрации метана 0,001–0,05 об.% уверенно регистрируются по изменениям АЭП уже при вариациях содержания горючего газа на уровне первых процентов. Дальнейшее повышение концентраций метана до средних фоновых допустимых и предельных фоновых допустимых неизбежно приведет к дальнейшему повышению чувствительности АЭП к искомым вариациям.

4. При непрерывной регистрации АЭП на профиле, выходящем за пределы проекции пласта-коллектора на поверхность Земли, по периодическим вариациям поля можно оценить глубину залегания покрывной области.

Приборы для регистрации объемной активности радона грунта и атмосферы выпускаются отечественной промышленностью. Датчики водорода уже десятилетия разрабатываются и изготавливаются в МИФИ. Измерительные инструменты для наблюдений АЭП в промышленном масштабе не производятся, но уже многие годы они создаются силами ОКБ Института физики Земли РАН, Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург), Владимирского, Ростовского государственных университетов, Муромского филиала Владимирского 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 атмосферно-электрический и водород-радоновый мониторинг для оперативного контроля содержания метана в приповерхностном ореоле загазованности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Баранов В.И.* Радиометрия. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 343 с.
2. *Имянитов И.М., Чубарина Е.В.* Электричество свободной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1965. 240 с.
3. *Тверской П.Н.* Курс метеорологии. Л.: Гидрометиздат, 1951. 887 с.
4. *Френкель Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 152 с.

5. *Войтов Г.И., Рудаков В.П., Шулейкин В.Н., Козлова Н.С., Баранова Л.В.* Эманиационные и электрические эффекты в атмосфере подпочв над Калужской кольцевой структурой // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1, № 6. С. 503–510.
6. *Войтов Г.И., Гусев А.С., Шулейкин В.Н. и др.* Эманиационные (водород-радоновые) и электрические эффекты над сложнопостроенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны предразломных поднятий, Белоруссия) // ДАН РАН. 2000. Т. 370, № 1. С. 105–108.
7. *Гергедава Ш.К., Бузинов С.Н., Шулейкин В.Н., Рудаков В.П., Войтов Г.И.* Нетрадиционная геофизика для подземных хранилищ газа // Нефть, газ и бизнес. 2001. №5(43). С. 2–7.
8. *Зубарев А.П., Шулейкин В.Н.* Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. М.: Изд-во ООО «Газпром ПХГ», 2009. 264 с.
9. *Шулейкин В.Н.* Перенос радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т.12, № 2. С. 57–66.
10. *Шулейкин В.Н.* Пары воды, атмосферное электричество и поступление радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 3. С. 67–75.
11. *Shuleikin V.N.* Radon Transport to the Near Surface Soil and Air Layers // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. Vol. 49, No. 8. P. 853–859.
12. *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.
13. *Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С.* Электродинамическая модель турбулентного приземного слоя при наличии многократно заряженных аэрозольных частиц // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. СПб., 2012. Т. 1. С. 199–201.
14. *Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С., Букантис А.А.* Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. СПб., 2012. Т. 1. С. 202–203.
15. *Шулейкин В.Н.* Реверсивный электродный эффект – расчеты и эксперимент // Наука и технологические разработки. 2013. № 2. С. 17–27.



16. 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. 206 с.
17. Сисигина Т.И. Измерения эксхалляции радона с поверхности горных пород // Вопросы ядерной метеорологии. М.: Госатомиздат, 1962. С. 104–111.
18. Сисигина Т.И. Эксхалляция 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.
19. Николаев И.Н., Литвинов А.В. Методика измерений малых концентраций  $H_2$  и  $H_2S$  над поверхностью воды // Измерительная техника. 2004. № 5. С. 54–60.
20. Николаев И.Н., Литвинов А.В., Халфин Т.М. Автоматизированные газоанализаторы водорода в диапазоне объемных концентраций  $10^{-6}$ -1,0% // Измерительная техника. 2004. № 7. С. 54.
21. Шулейкин В.Н. Результаты наблюдений полярных проводимостей почвенного воздуха в черте городской застройки // Развитие методов и средств экспериментальной геофизики: Сб. ст. М.: 1996. Вып. 2. С. 235–240.

#### REFERENCES

1. Baranov V.I. Radiometriya. M.: Izd-vo AN SSSR, 1956. 343 с.
2. Imyanitov I.M., Chubarina E.V. Elektrichestvo svobodnoy atmosfery. L.: Gidrometeoizdat. 1965. 240 s.
3. Tverskoy P.N. Kurs meteorologii. L.: Gidrometizdat, 1951. 887 s.
4. Frenkel' Ya.I. Teoriya yavleniy atmosfernogo elektrichestva. M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2009. 152 s.
5. Voytov G.I., Rudakov V.P., Shuleykin V.N., Kozlova N.S., Baranova L.V. Emanatsionnye i elektricheskie efekty v atmosfere podpochv nad Kaluzhskoy kol'tsevoy strukturoy // Rossiyskiy zhurnal nauk o Zemle. 1999. T. 1, № 6. S. 503–510.
6. Voytov G.I., Gusev A.S., Shuleykin V.N. i dr. Emanatsionnye (vodorod-radonovye) i elektricheskie efekty nad slozhnopostroennymi tektonicheskimi strukturami (na primere Aleksandrovskoy zony predrazlomnykh podnyatiy, Belorussiya) // DAN RAN. 2000. T. 370, № 1. S. 105–108.

7. *Gergedava Sh.K., Buzinov S.N., Shuleykin V.N., Rudakov V.P., Voytov G.I.* Netraditsionnaya geofizika dlya podzemnykh khranilishch gaza // *Neft', gaz i biznes*. 2001. № 5(43). S. 2–7.
8. *Zubarev A.P., Shuleykin V.N.* Kompleksnyy geofizicheskiy i geokhimicheskiy kontrol' pri ekspluatatsii podzemnykh gazokhranilishch. M.: Izd-vo OOO «Gazprom PKHG», 2009. 264 s.
9. *Shuleykin V.N.* Perenos radona v pripoverkhnostnye sloi grunta i prizemnuyu atmosferu // *Geofizicheskie protsessy i biosfera*. 2013. T.12, № 2. S. 57–66.
10. *Shuleykin V.N.* Pary vody, atmosfernoe elektrichestvo i postuplenie radona v pripoverkhnostnye sloi grunta i atmosferu // *Geofizicheskie protsessy i biosfera*. 2014. T. 13, № 3. S. 67–75.
11. *Shuleykin V.N.* Radon Transport to the Near Surface Soil and Air Layers // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. Vol. 49, No. 8. P. 853–859.
12. *Redin A.A.* Matematicheskoe modelirovanie elektrodinamicheskikh protsessov v prizemnom sloe v usloviyakh aerol'nogo zagryazneniya atmosfery: Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Taganrog, 2011. 19 s.
13. *Redin A.A., Kupovykh G.V., Boldyrev A.S.* Elektrodinamicheskaya model' turbulentnogo prizemnogo sloya pri nalichii mnogokratno zaryazhennykh aerol'nykh chastits // VII Vserossiyskaya konferentsiya po atmosfernomu elektrichestvu. SPb., 2012. T. 1. S. 199–201.
14. *Redin A.A., Kupovykh G.V., Boldyrev A.S., Bukantis A.A.* Elektrodinamicheskaya model' konvektivno-turbulentnogo prizemnogo sloya atmosfery // VII Vserossiyskaya konferentsiya po atmosfernomu elektrichestvu. SPb., 2012. T. 1. S. 202–203.
15. *Shuleykin V.N.* Reversivnyy elektrodnyy effekt – raschety i eksperiment // *Nauka i tekhnologicheskie razrabotki*. 2013. № 2. S. 17–27.
16. *Shuleykin V.N., Shchukin G.G., Kupovykh G.V.* Razvitie metodov i sredstv prikladnoy geofiziki – atmosferno-elektricheskiy monitoring geologicheskikh neodnorodnostey i zon geodinamicheskikh protsessov. SPb.: TSOP RGGMU, 2015. 206 s.
17. *Sisigina T.I.* Izmereniya ekskhalyatsii radona s poverkhnosti gornykh porod // *Voprosy yadernoy meteorologii*. M.: Gosatomizdat, 1962. S. 104–111.
18. *Sisigina T.I.* Ekskhalyatsiya radona s poverkhnosti neskol'kikh tipov pochv Evropeyskoy chasti SSSR i Kazakhstana // *Radioaktivnye izotopy v atmosfere i ikh ispol'zovanie v meteorologii*. M.: Atomizdat, 1965. S. 40–48.

19. *Nikolaev I.N., Litvinov A.V.* Metodika izmereniy malykh kontsentratsiy  $H_2$  i  $H_2S$  nad poverkhnost'yu vody // *Izmeritel'naya tekhnika*. 2004. № 5. S. 54–60.
20. *Nikolaev I.N., Litvinov A.V., Khalfin T.M.* Avtomatizirovannye gazoanalizatory vodoroda v diapazone ob"emnykh kontsentratsiy  $10^{-6}$ -1,0% // *Izmeritel'naya tekhnika*. 2004. № 7. S. 54.
21. *Shuleykin V.N.* Rezul'taty nablyudeniya polyarnykh provodimostey pochvennogo vozdukh v cherte gorodskoy zastroyki // *Razvitie metodov i sredstv eksperimental'noy geofiziki*: Sb. st. M.: 1996. Vyp. 2. S. 235–240.