

АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И ВОДОРОД–РАДОНОВЫЙ МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЯ Часть 1

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

Введение

Оползень представляет собой отделившуюся массу рыхлых пород, медленно и постепенно или скачками перемещающуюся по склону под воздействием силы тяжести. Охваченную движением массу называют оползневым телом, а поверхность, по которой происходит смещение, – поверхностью скольжения. Оползни возникают на склонах речных и морских берегов, в горах. Чаще всего оползни зарождаются на склонах, сложенных чередующимися водоупорными и водоносными породами. Смещение крупных масс грунта или породы по склону провоцируется в большинстве случаев увлажнением грунта дождевой водой. При этом масса грунта становится больше, а сила трения, обеспечивающая сцепление грунтов или горных пород на поверхности скольжения, оказывается меньше составляющей силы тяжести, удерживающей тело оползня в состоянии покоя. В результате вся масса горной породы приходит в движение.

Помимо переувлажнения осадками и подземными водами, побуждающей причиной движения оползня могут служить сейсмические толчки и хозяйственная деятельность человека, проводящаяся без учета геологических особенностей местности. В частности, технологический цикл прокладки трубопровода неизбежно нарушает дерновый покров, приводит к вырубке зеленых насаждений в зоне отчуждения. Если в равнинных условиях это, в худшем случае, вызовет заболачивание участка, то в горах, предгорьях, на склонах холмов – может нарушить устойчивость склонов и активизировать разнообразные склоновые процессы. Эти процессы не только привносят дополнительную нагрузку на нитку трубопровода, но и представляют угрозу для близлежащих населенных пунктов. Экологическая безопасность эксплуатации трубопроводного транспорта требует своевременного выявления подобных участков, организации оперативного геофизического контроля состояния среды в районах распространения оползней и возникновения других опасных инженерно-геологических процессов.

Чаще всего исследования состояния оползневых тел ведутся с использованием электро- и сейсморазведки. Реже комплекс дополняется термометрией, высокоточной

гравиметрией и магнитными наблюдениями [1–4]. Используемые методы контроля эффективны, но трудоемки. Поэтому остановимся на особенностях тела оползня, допускающих применение нетрадиционного геофизического подхода для решения задачи контроля его напряженного состояния.

Мощность оползня существенно меньше его длины [2–3]. Поэтому возникающие в теле оползня зоны повышенной трещиноватости (зоны растяжения) и зоны сжатия будут иметь субвертикальную направленность. При постоянстве плотности потока летучих газов, подходящего к оползню из земных недр, непосредственно в теле оползня эта плотность будет перераспределяться. По зонам растяжения будет иметь место максимальный газоток, по зонам сжатия – минимальный.

Увлажнение оползня осадками и талыми водами провоцирует начало движения его или его частей [3–4]. Однако уже при 30% влажности грунта воздухообмен почва–атмосфера будет осуществляться исключительно по пространству трещин – поровое пространство будет тампонирувано водой.

Перечисленные особенности оползневого тела указывают на возможность контроля его напряженного состояния по газопроницаемости, текущий оперативный контроль которой можно осуществлять в условиях естественного залегания в относительных единицах [5–6]. Для этого на исследуемом участке, используя систему наблюдательных пикетов, достаточно провести оперативные измерения какого-либо летучего газа в грунте и нормировать полученные значения по максимальному зарегистрированному значению выбранного параметра. Единичное значение относительной газопроницаемости будет наблюдаться на участке оползня, где растяжение на момент наблюдений максимально, а ее минимальное значение – на участке максимального сжатия. Более того, проведение аналогичных повторных наблюдений открывает возможность рассмотрения разностной характеристики между зарегистрированными значениями относительной газопроницаемости, характеризующей изменения напряженного состояния оползня за временной интервал между измерениями.

Газопроницаемость как характеристика напряженного состояния грунта на теле оползня

В инженерно-геологической практике газопроницаемость определяется только в специальных случаях, когда, например, необходимо охарактеризовать условия применения сжатого воздуха в кессонах на небольшой глубине.

Движение газов в грунтах и горных породах происходит благодаря наличию в них сообщающихся между собой пор и трещин. Существует два механизма движения почвенных газов: эффузия – движение газов по связанным между собой порам и трещинам, не заполненным водой, и диффузия – движение газов по заполненным водой трещинам и порам. Газопроницаемость осадочных пород варьирует в пределах от первых единиц Дарси до 10^{-7} Дарси (табл. 1).

Таблица 1

Газопроницаемость осадочных пород

Порода	Газопроницаемость, миллиарды
Песчаник (Баку)	32–1400
Песчаник (Грозный)	0,0005–1000
Глина (Чусовские городки)	0,002
Глина (Грозный)	0,001–90
Доломитизированный известняк (Чусовские городки)	2,3
Доломит (Чусовские городки)	0,00007

В рыхлых песчаных породах величина газопроницаемости зависит не от общего объема пор, а от их размера. При одинаковой пористости и влажности газопроницаемость песка уменьшается с уменьшением размера зерен на 3–4 порядка (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость газопроницаемости песка от размера частиц

Разновидности песка	Пористость, %	Газопроницаемость, миллиарды
Крупный	40	344,81
Средний	40	30,96
Мелкий	40	9,26
Тонкоразмельченный неоднородный	30–35	1,00–10,00
Наиболее тонкоразмельченный	37–40	0,01–0,10

Наличие воды, особенно в случае полного заполнения водой порового пространства и трещин, существенно уменьшает газопроницаемость грунтов. В грунтах,

состоящих из частиц менее 0,5 мм, газопроницаемость быстро уменьшается с увеличением степени их водонасыщения и при 20–30-процентном водонасыщении практически равна нулю [3–4].

Представленные выше материалы позволяют утверждать, что газопроницаемость является функцией гранулометрического состава, пористости, трещиноватости и степени водонасыщения грунтов. Пористость и трещиноватость грунтов зависят от напряженно-деформированного состояния тела оползня. Следовательно, газопроницаемость рыхлых дисперсных грунтов, слагающих оползневые тела, должна изменяться в зависимости от напряженно-деформированного состояния того или иного участка оползневого тела. Это и является физической предпосылкой для оценки состояния оползневого тела по введенному параметру. Однако для достоверной интерпретации результатов наблюдений необходимо в каждом конкретном случае принимать во внимание влияние на газопроницаемость неоднородности грунтов по гранулометрическому составу, пористости и степени водонасыщения.

Уже несколько десятилетий в геофизической практике используются датчики объемной активности водорода в грунте ГВК-01 и ВСГ-01, разработанные и изготовленные Московским инженерно-физическим институтом [7–9]. Принцип работы измерительных инструментов построен на вариациях емкости конденсатора, диэлектрическая проницаемость прокладки которого меняется в зависимости от концентрации водорода в рабочем объеме. Датчики разрабатывались для производства длительных обсерваторских наблюдений концентрации водорода в почвенном или атмосферном воздухе.

Переход к режиму оперативной регистрации заставил несколько изменить методику наблюдений и конструкцию рабочего объема. В исходном варианте датчик рассчитан на естественное протекание потока почвенного или атмосферного воздуха, для чего выносной модуль с чувствительным элементом датчика зарывается в грунт или помещается в исследуемый объем атмосферы. В режиме оперативного опроса этот рабочий объем выносного модуля герметизируется от прямого попадания атмосферного воздуха. Цикл измерений на наблюдательном пикете складывается из нескольких процедур. В первую очередь рабочий объем прокачивается атмосферным воздухом, а регистрируемые при этом показания принимаются за нулевой уровень. Затем из пробоотборной скважины откачивается образец почвенного воздуха, помещается в

рабочий объем датчика с немедленной герметизацией от атмосферы. Это позволяет получить второй, сигнальный отсчет (время накопления 7–10 минут). Разность сигнального и нулевого отсчетов и определяет объемную концентрацию водорода в грунте.

При проведении измерений на деформированных участках грунта, в зонах повышенной трещиноватости и т.п., для большей достоверности результатов наблюдения выполняются с использованием двух одинаковых датчиков, прошедших предварительную проверку на идентичность. Для минимизации аппаратных погрешностей сигнал с выносных модулей заводится на один и тот же регистратор.

Совместно с разработчиком была усовершенствована методика одновременного отбора проб с использованием двух датчиков. Чувствительные элементы измерительных инструментов были помещены в один рабочий объем ~ 0.5 литра. По результатам лабораторной калибровки с достоверностью 0,99 для каждого датчика была введена нелинейная переходная функция, связывающая сигналы в [мВ] с концентрацией в [ppm]. В частности, для двух использованных в наблюдениях измерительных инструментов $H18(\text{ppm}) = 0,0013H18^{1,589}$, $H19(\text{ppm}) = 3,2178 \cdot \exp(0,0027H19)$, где значения H18 и H19 нормированы на 1мВ. Результаты совместных испытаний измерительных инструментов приведены на рис. 1.

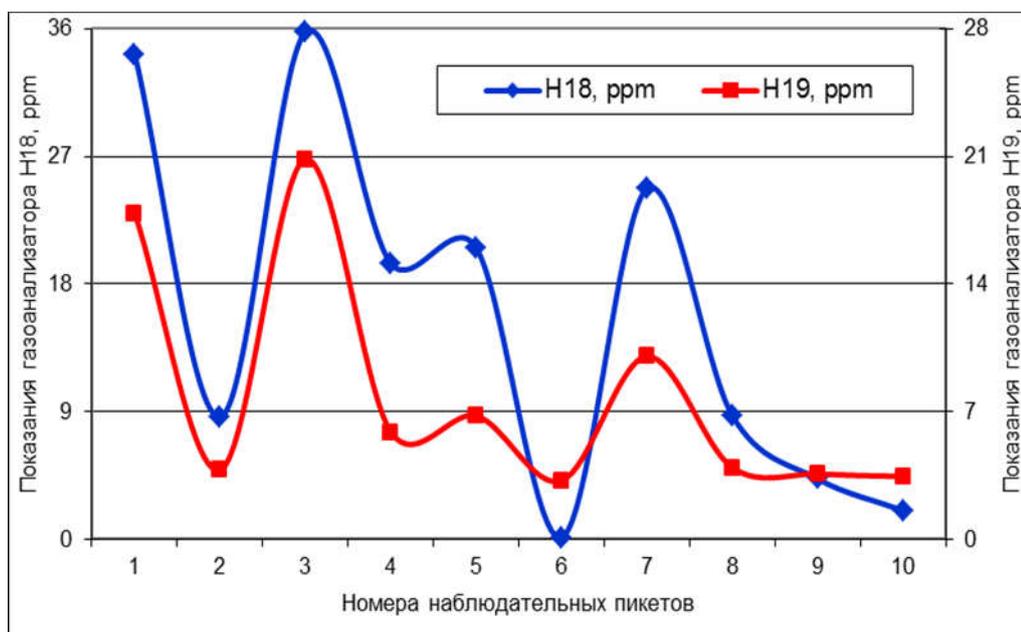


Рис. 1. Результаты проверки на идентичность датчиков водорода ВГ-2Б № 18 и № 19

Модельное представление связей водорода, метана, радона и элементов приземного атмосферного электричества

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 по горной породе осуществляется со скоростью 40–60 см/сутки [10–15]. Высокий молекулярный вес радиоактивного газа Rn^{222} исключает возможность его обособленной субвертикальной миграции 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), то есть увеличивается подъемная сила. Пузырьки становятся природными дегазаторами, в которые, наряду с другими газами, стекает и почвенный радон, образующийся в подземных водно-газовых системах при распаде радия [15–17].

Те же пузырьковые образования выносят сотые–тысячные доли газа–эманации в приповерхностную атмосферу [11, 18–20]. Здесь эксхалирующий почвенный радон выступает в качестве единственного ионизатора атмосферного воздуха [18–20]. Образующие 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 [18], в слое воздуха до высот 0,5 км ионизация на 75% связана с гамма-излучением почвенного радона и на 25% – с космическим излучением; в диапазоне высот 0,5–1,0 км ситуация меняется – 64% воздуха ионизируется из космоса и только 36% – почвенным радоном.

Долгое время считалось, что носителями радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу являются все летучие газы почвенного воздуха [16–17]. Однако эксперименты последних лет показали, что в качестве газов–носителей выступают только два из них – метан и водород [11, 21–22]. Для иллюстрации проведем сравнение данных комплексных полевых наблюдений радона почвенного воздуха и лабораторного анализа проб на содержание водорода, метана, двуокиси углерода и азота. Концентрации азота и двуокиси углерода меняются в противофазе и охвачены жесткой корреляционной связью:

$$k(\text{N}_2;\text{CO}_2) = (-0,99);$$

при отсутствии корреляционной связи с метаном и водородом

$$|k(\text{H}_2;\text{CO}_2)|, |k(\text{CH}_4;\text{CO}_2)| \sim 0,28 \div 0,29.$$

Коэффициент корреляции водорода и метана очень высок – $k(\text{H}_2;\text{CH}_4) = 0,96$; коэффициенты корреляции между концентрациями двух последних летучих газов с объемной активностью радона тоже достаточно велики:

$$k(\text{Rn};\text{H}_2) = 0,84; k(\text{Rn};\text{CH}_4) = 0,89.$$

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 радона с борта летательных аппаратов следы ионизатора были обнаружены до высот первых километров относительно Земли. Это значит, что пузырьки летучих газов, выносящих ионизатор в приземную атмосферу, способны всплывать в атмосферном воздухе вплоть до указанных высот. То есть плотность пузырьков газов–носителей должна быть меньше плотности атмосферного воздуха. К таким газам относятся водород и метан, инертный газ гелий и пары воды [14]. Однако, поскольку радон также является инертным газом, замещение атома гелия атомом радона в процессе субвертикального подъема можно исключить.

Водяной пар, в свою очередь, поступает в атмосферу с растительного покрова, поверхности почв и приповерхностного порового пространства. Вероятность транспорта ионизатора в атмосферу пропорциональна толщине слоя, в котором произошел его захват пузырьковым образованием, вне зависимости от того, где находится этот слой – у поверхности Земли или на предельной глубине выноса. Принимая во внимание, что при диффузионном переносе почвенный радон попадает в атмосферу с глубин 4–6 м [10–11], а глубина испарения в лучшем случае затронет первые миллиметры земной поверхности, вклад радона, транспортируемого водяным паром, составит сотые–тысячные доли от его концентрации в приземной атмосфере [14].

Присутствие радона в земной коре зависит от распространения материнского вещества. В табл. 3 приведены данные исследований Биогеохимической лаборатории академика В.И. Вернадского по распространению радия в биосфере Земли.

Из табл. 3 следует, что содержание радия в почвах всего лишь на порядок меньше, чем в горной породе. В частности, в глине, слагающей поверхность скольжения оползня, среднее содержание радия составляет $1,3 \cdot 10^{-10} \%$, что всего лишь в два раза меньше, чем в гранитах – $2,58 \cdot 10^{-10} \%$ [23].

Таблица 3

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	$10^{-12} - 10^{-14}$

Представленный материал позволяет построить модель связей водород–метан–радоновых и атмосферно-электрических полей Земли и атмосферы. 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. Образующиеся при этом легкие ионы определяют полярные проводимости воздуха. Рекомбинация легких ионов с нейтральными ядрами конденсации приводит к образованию тяжелых ионов, несущих основную ответственность за АЭП. Распределение объемного заряда атмосферы при различных концентрациях нейтральных ядер конденсации с учетом электродного эффекта представлено на рис. 2 [24–25].

При дефиците ионизатора имеет место классический электродный эффект – рост поля до нормального фонового уровня (см. кривые 1–3 на рис. 2); при избытке ионизатора – реверсивный электродный эффект, проявляющийся в спаде поля (зачастую вплоть до отрицательных значений) с последующим перегибом и ростом до фона – кривые 4–7 на рис. 2 [24–27].

Проведем грубую иллюстративную оценку чувствительности элементов приземного атмосферного электричества к режиму эксхалации почвенного радона. Как отмечалось выше, в атмосферу попадет не более одного процента от содержания метана грунта [28, 29]. Изменение эксхалации ионизатора в 2 раза практически не скажется на

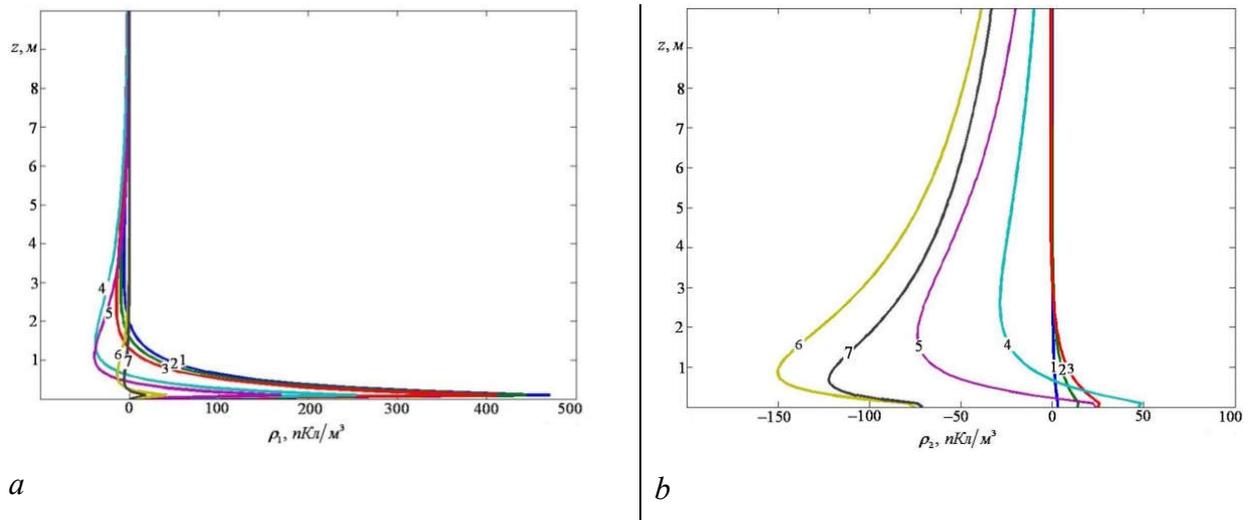


Рис. 2. Изменение плотности объемного заряда атмосферы, создаваемого легкими (а) и тяжелыми (б) ионами для различных концентраций нейтральных ядер конденсации – N .
Кривые: 1 – $N \sim 10^8 \text{ м}^{-3}$; 2 – $N \sim 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$; 3 – $N \sim 10^9 \text{ м}^{-3}$; 4 – $N \sim 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$; 5 – $N \sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$;
6 – $N \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$; 7 – $N \sim 10^{11} \text{ м}^{-3}$ [24–25]

концентрации радона в земле (вариации концентрации радона в приповерхностном слое грунта на сотые доли невозможно зарегистрировать даже самыми современными измерительными инструментами). Однако в приповерхностной атмосфере подобные изменения приведут к двукратному изменению полярных проводимостей и поля. В рамках рассматриваемой модели это значит, что элементы приземного атмосферного электричества крайне чувствительны к вариациям плотности субвертикального потока водорода и метана [11, 30]

На последнем этапе анализа связей метана, радона, водорода и параметров приземного атмосферного электричества рассмотрим еще один экспериментальный 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. [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:

$$\text{CH}_4(68) = 15,88 \cdot \exp[1,675 \ln(\text{H}_2)] \text{ [% об.],}$$

где концентрации водорода нормированы на 1 % об.

Если добавить к рассматриваемому массиву данных 4 пары значений объемной концентрации водорода и метана, полученных на объекте исследований, то введенное уравнение связей несколько изменится: $\text{CH}_4(72) = \exp[1,769 \ln(\text{H}_2) + 3,7382]$, а достоверность аппроксимации снизится до $D = 0,90$. На рис. 3 построены вариации измеренных и расчетных значений содержания метана грунта по 72 точечным массивам данных (значения 69–72 зарегистрированы на оползне).

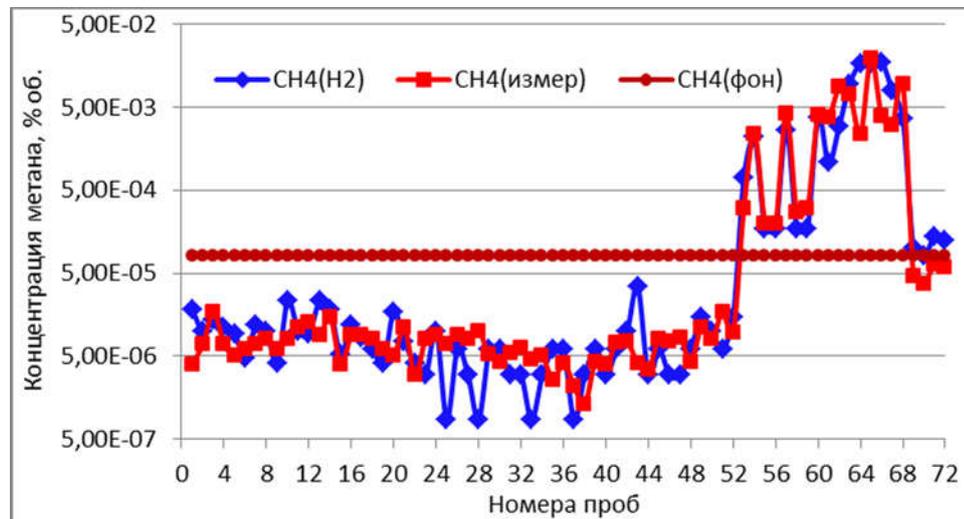


Рис. 3. Расчетные и измеренные значения содержания метана грунта.
Прямая линия – средний фоновый уровень метана грунта

Принимая во внимание диапазон перепада рассматриваемых концентраций метана в 4 порядка, (10^{-6} – 10^{-2}) % об., совпадение измеренных и расчетных значений можно считать идеальным. Полученная связь между метаном и водородом носит экспоненциальный характер. 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:

$$k\{\text{CH}_4[\exp(\text{H})]; \text{CH}_4(\text{H})\} = 0,98.$$

В отсутствие мелкого субвертикального потока метана, присущего нефтяным залежам и пластам-коллекторам искусственно выбранных подземных хранилищ газа, концентрации водорода и метана будут жестко связаны между собой [11, 31]. А это значит, что доли радона, транспортируемого в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу пузырьковыми образованиями этих двух летучих газов, будут пропорциональны друг другу. Другими словами, с малой потерей точности перенос радона из грунта в атмосферу можно количественно считать пропорциональным концентрации только одного газа–носителя, в частности – водорода.

Пузырьковые образования водорода и метана, транспортирующие радон в грунте и приземной атмосфере, имеют еще и собственный вес. Поскольку молекулярный вес метана существенно больше молекулярного веса водорода, последний следует считать основным носителем ионизатора в приповерхностные слои грунта и атмосферу. По последним оценкам, при равных концентрациях газов–носителей пузырьковые образования водорода переносят в 5,7–6,9 раз больше радона, нежели чем пузырьковые образования метана [30].

Для иллюстрации правомочности высказанных предположений на рис. 4 представлены вариации измеренных и расчетных значений объемной активности радона атмосферы. Расчетные задания – линейная аппроксимация произведения объемной активности радона грунта и объемной концентрации водорода грунта в предположении, что только водород является носителем ионизатора в атмосферу. Достоверность введенной линейной аппроксимации $Rn(a) = f(Rn*H)$ равна $D = 0,86$.

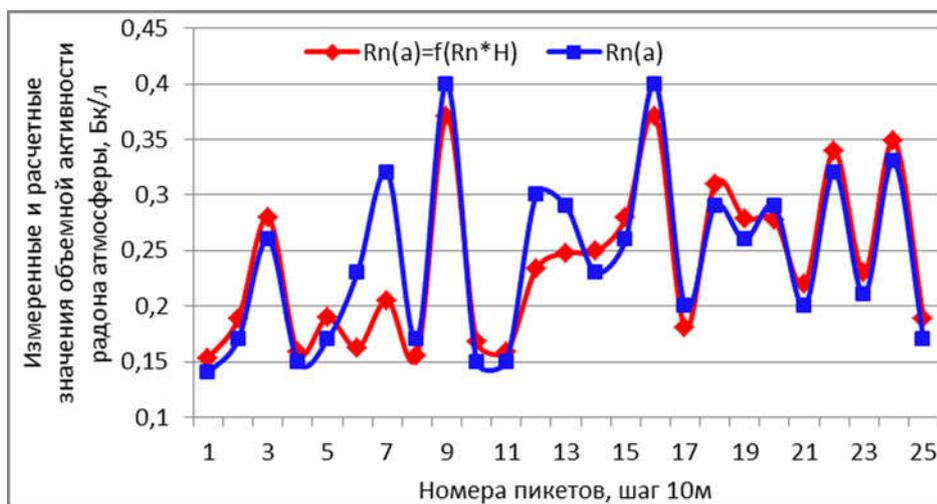


Рис. 4. Измеренные – $Rn(a)$ и расчетные значения объемной активности радона атмосферы – $Rn(a) = f(Rn*H)$

Методика оценки относительной газопроницаемости по результатам комплексных водород–радоновых и атмосферно-электрических измерений

Согласно введенным модельным представлениям, водород почвенного воздуха является газом–носителем почвенного радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу. Более того, принимая во внимание наличие связи между водородом и метаном вне углеводородных скоплений (см. рис. 3), в рассматриваемой задаче водород можно считать единственным носителем радиогенного газа. Это открывает возможность получения независимой информации о концентрации летучего газа по данным наблюдений радона почвенного и атмосферного воздуха.

Необходимо отметить, что радоновая съемка уже рекомендовалась к использованию при исследованиях оползней [1]. Однако в рассматриваемом случае важен факт использования результатов наблюдений радона не только грунта, но и атмосферы. Основным слагающим элементом тела оползня, содержащим материнское вещество, эманлирующее радон, являются глины поверхности скольжения оползня. За счет малого периода полураспада (3,825 дня) газ–эманация будет достигать поверхности Земли с потерей плотности, пропорциональной локальной мощности оползня (4–6-метровый слой грунта приведет к потере плотности на порядок) [11]. С учетом вышеизложенного для водорода и радона грунта и атмосферы на i -ом пикете можно записать соотношение

$$Rn(a)_i = A + B \cdot Rn_i \cdot H_i. \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, 24, 25$ – номера пикетов на каждом из профилей. При наличии информации о значениях $Rn(a)_i$ и Rn_i на системе наблюдательных пикетов решается задача о величинах $H_i = H[Rn(a)_i; Rn_i]$ и, соответственно, по описанной выше схеме – для относительной газопроницаемости $G_i[Rn(a); Rn]$.

В условиях хорошей погоды [32–33] при стабильной метеорологической ситуации концентрация эксхалиции радона может быть, с одной стороны, измерена напрямую, а с другой стороны, – косвенно, по уровню полярных проводимостей (ПП) или обратной величины АЭП. Измерение ПП и АЭП на каждом наблюдательном пикете позволит дополнительно рассчитать относительные газопроницаемости, но уже не только как функции полярных проводимостей λ_i и радона грунта $G(\lambda_i; Rn_i)$, но и как функции обратной величины атмосферного электрического поля $1/E_i$ и радона грунта $G(1/E_i; Rn_i)$. Соблюдая описанную выше процедуру оценки относительной газопроницаемости по данным наблюдений водорода, радона и элементов приземного атмосферного электричества, окончательно можно перейти к ее средней величине

$$G(I_i) = 0,25 * \{G(H_i) + G_i[Rn(a)_i; Rn_i] + G_i(\lambda_i; Rn_i) + G_i(1/E_i; Rn_i)\}, \quad (2)$$

где $I = 1, 2, 3, 4$ – номера профилей. Предлагаемая оценка усредненной относительной газопроницаемости, с одной стороны, увеличивает представительность и достоверность окончательного результата, с другой стороны, допускает получение искомого показателя напряженного состояния оползня даже при «форс-мажорных» обстоятельствах (при выходе из строя какого-либо измерительного инструмента или при работе в неблагоприятных погодных условиях). В частности, в августе 2006 г. из-за растрескивания грунта не удалось провести наблюдения водорода; все расчеты проводились по данным измерений радона и элементов приземного атмосферного электричества (рис. 5).



Рис. 5. Характерное растрескивание грунта в августе 2006 г., исключающее возможность проведения измерений водорода почвенного воздуха

Для иллюстрации работоспособности модельного представления связей водорода, радона и элементов приземного атмосферного электричества рассмотрим пример расчета напряженного состояния склона по значениям полярной проводимости воздуха. Впервые в инженерно-геологической практике относительная газопроницаемость использовалась в начале 90-х годов при контроле состояния контрафорсов, установленных по торцам и перед фасадом аварийного здания, построенного на насыпной ступени вдоль левого берега р. Москвы [6]. В качестве контрольного параметра использовались полярные проводимости воздуха – первичный продукт ионизации воздуха почвенным радоном.

Искомая относительная газопроницаемость представлялась как частное от деления вышеуказанного контролируемого параметра на каждом наблюдательном пикете по его максимальному значению, зарегистрированному на всей площади измерений. Результаты этих измерений представлены на графиках (рис. 6).

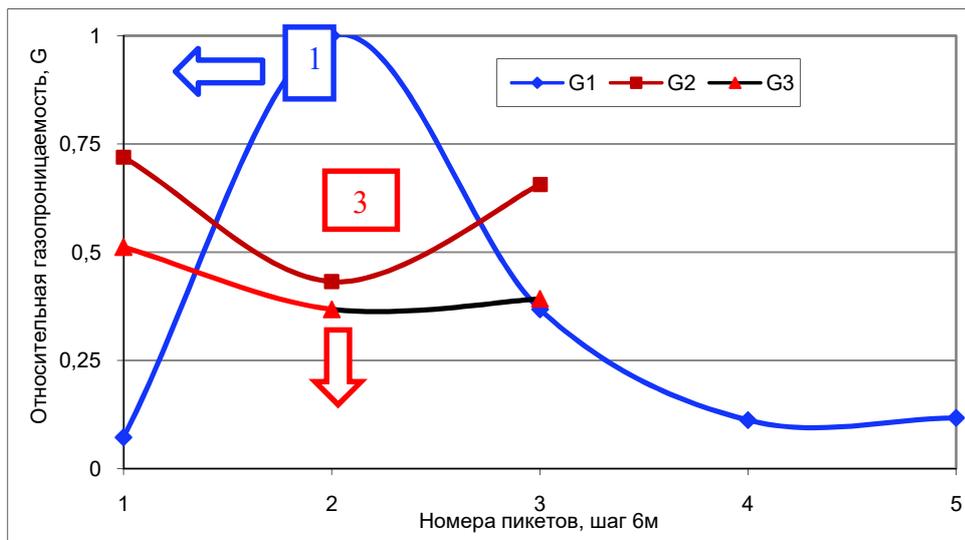


Рис. 6. Относительная газопроницаемость у исследуемых контрафурсов **1** и **3**:
 G1 – выше рабочего контрафурса у торца аварийного здания;
 G2, G3 – ниже нерабочего контрафурса перед фасадом аварийного здания
 (стрелками указано направление вниз по склону)

Вдоль правого крыла аварийного здания был проложен профиль 1, пикет 1/1 которого находился ниже контрафурса 1. Этот контрафурс жестко связан с фундаментом здания и, очевидно, находится в рабочем состоянии. На пикете 1/1 относительная газопроницаемость минимальна, то есть здесь имеет место максимальное сжатие грунта. На пикете 1/2, наоборот, наблюдается максимальная газопроницаемость, что соответствует состоянию максимального растяжения. Контрафурс работает по принципу лодочного весла: перед лопастью весла – сжатие; за лопастью – растяжение.

Перед фасадом левого крыла аварийного здания на 6 и 12 м ниже контрафурса 3 были заложены еще два параллельных профиля – 2 и 3. Контрафурс 3, очевидно, находится в нерабочем состоянии – уровень относительной газопроницаемости $G(2/2) = 0,43$, что в 6 раз больше, чем на пикете 1/1, где $G(1/1) = 0,07$. Более того, уровень относительной газопроницаемости на пикете 2 профиля 3, проходящего на 12 м ниже контрафурса, $G(3/2) = 0,37$. Из этого следует, что грунт насыпной ступени (ниже профиля 3) в большей мере сдерживает движение грунтов, нежели чем сам контрафурс.

Аппаратурное и метрологическое обеспечение комплекса наблюдений

С 2004 г. (первый цикл работы на оползне) во всех описанных ниже комплексных измерениях использовался датчик объемной активности радона РГА-01, который допускает, согласно Инструкции по эксплуатации, выполнение работ в диапазоне

температуры окружающей среды [(+5°C)–(+50°C)]. Относительная ошибка единичного отсчета – 30% (при работе в диапазоне объемной активности радона 10^2 – 10^3 Бк/л.). По ходу выполнения наблюдений каждая проба почвенного воздуха из пробоотборной скважины на пикете подвергается анализу четыре раза.

Опыт эксплуатации измерительного инструмента в 9-ти циклах измерений, особенно в условиях высоких температур (порядка 30 °C и выше), позволил выработать оптимальную методику снятия четырех последовательных отсчетов радона в пробах почвенного и атмосферного воздуха. Первый отсчет считывается за 200-секундный временной интервал, последующие три – за 20-секундные интервалы. При этом удается достичь минимальных потерь времени и максимальной точности наблюдений. В результате большой разницы температур почвенного и атмосферного воздуха за время счета альфа-частиц меняется температура, а, следовательно, и эффективность флюоресцирующего покрытия. Это, в свою очередь, приводит к заметному росту ошибок измерений. Последовательное снятие 200-секундного и трех 20-секундных отсчетов уменьшает время температурных дрейфов, увеличивая тем самым достоверность результата. Дополнительно при выполнении измерений рабочая камера датчика объемной активности радона с наружной стороны теплоизолируется поролоном, который систематически смачивается водой, а измерительный инструмент закрывается экраном от прямого попадания солнечных лучей.

Ввиду идентичности требований к точности измерений радона грунта и атмосферы, анализ атмосферной пробы производится аналогичным образом. Это частично уравнивает погрешности измерений радона в грунте и атмосфере. Объемная активность радона существенно меньше в атмосфере, чем в грунте, и, зачастую, находится на уровне первых десятых долей беккереля на литр. Столь малые регистрируемые значения становятся сравнимыми со случайной ошибкой измерительного инструмента.

Объемная активность радона в отобранной пробе рассчитывается путем усреднения 2, 3 и 4-го значений отсчетов. После проведения усреднения ошибка в определении объемной активности радона на каждом наблюдательном пикете соответственно снижается до уровня ~ 17%.

Используемый во всех циклах наблюдений датчик объемной активности радона аттестуется в лаборатории метрологии радиометрических измерений во ВНИИФТРИ до выезда на полевые работы и по возвращении в Москву. Вплоть до исследований 2008 г.

(последний, 9-й цикл работ) характеристики измерительного инструмента за период полевых измерений остаются достаточно стабильными.

Полярные проводимости почвенного и атмосферного воздуха наблюдаются с использованием блока аспирационных конденсаторов [18, 34]. Блок конденсаторов помещен в общий герметичный кожух, что позволяет в едином цикле аспирации одновременно регистрировать положительную λ^+ и отрицательную λ^- полярные проводимости. Суммарная полярная проводимость $\lambda = \lambda^+ + \lambda^-$ рассчитывается в ходе обработки данных наблюдений. Регистрация λ^+ и λ^- в едином цикле аспирации гарантирует одинаковую скорость протяжки анализируемого объема воздуха и позволяет осуществлять внутренний контроль исправной работы прибора. В цикле ионизации образуется одна пара ионов. Поэтому противофазные вариации одновременно регистрируемых полярных проводимостей гарантируют кондиционность результата наблюдений.

Это свойство измерительного инструмента используется при сборе полевой информации. Каждый цикл аспирации заканчивается контролем коэффициента корреляции между массивами λ^+ и λ^- . В нормальных условиях, при правильном выборе положения прибора относительно направления ветра, коэффициенты корреляции лежат на уровне 0,7–0,9. В идеальных погодных условиях, когда регистрируемый сигнал близок к прямой линии, в дополнительном анализе коэффициента корреляции нет необходимости.

Датчик полярных проводимостей атмосферного воздуха был разработан и изготовлен в Муромском филиале Владимирского государственного университета. В исходном варианте для протяжки воздуха через конденсаторы использовался бытовой пылесос. Соответственно, энергопотребление прибора определялось мощностью пылесоса и составляло величину ~ 800 Вт. В полевых условиях питание осуществлялось от переносной подстанции мощностью 2,2 кВт.

В ходе текущей доработки блока аспирационных конденсаторов для прокачки воздуха были использованы компьютерные вентиляторы. Одновременно, при подаче положительных и отрицательных потенциалов $\pm(100-120)$ В на цилиндрические конденсаторы применялись блоки батарей типа «Крона».

Измерение полярной проводимости воздуха сводится к регистрации токов утечки аспирационных конденсаторов, величины этих токов составляют $\sim 10^{-12}$ А. Из-за столь малого токопотребления за 4–5-дневный цикл наблюдений практически не происходит

изменений питающего напряжения. Более того, в цепи питания полностью убраны пульсации, неизбежно связанные с выпрямлением переменного тока и присутствующие даже при очень хорошей последующей фильтрации. Все это позволило снизить относительные ошибки измерительного инструмента до уровня $\sim 10\%$.

Цикл наблюдений на пикете сводится к непрерывной 1-минутной записи нулевого уровня сигнала (запись сигнала с конденсаторов без протяжки атмосферного воздуха) и 1-минутной записи с протяжкой воздуха. Искомые полярные проводимости определяются как разность средних сигнальных и нулевых значений контролируемых параметров. На рис. 7 приведена 1-минутная запись λ^+ , λ^- и λ на наблюдательном пикете. Коэффициент корреляции $k(\lambda^+; \lambda^-) = -0,77$.

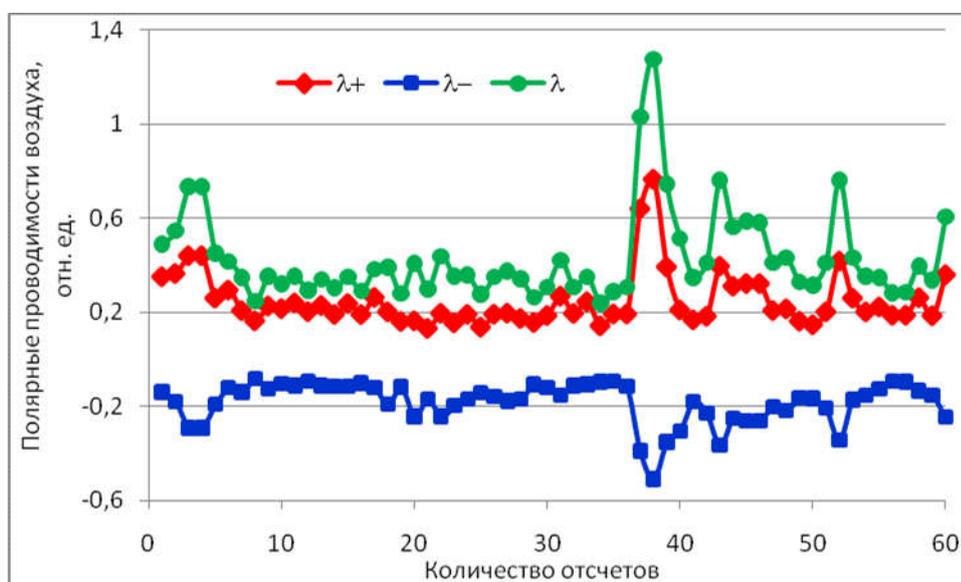


Рис. 7. Запись положительной, отрицательной и суммарной полярной проводимости воздуха на наблюдательном пикете

Приведенный пример нельзя назвать характерным, так как всплески сигнала в начале и в конце записи — следствия ветровых нагрузок, меняющих режим аспирации. Характерный уровень полярных проводимостей в цикле наблюдений на пикете можно определить в интервале 9–37-го отсчетов (см. рис. 7).

Для иллюстрации участия метана в транспорте ионизатора на рис. 8 приведены вариации полярных проводимостей воздуха на участке профиля, где маршрут пересекает заболоченную территорию на отрезке между пикетами 20–23. Уровень модуля полярных проводимостей на этих пикетах естественно выше из-за дополнительного транспорта радона метаном биогенного происхождения.

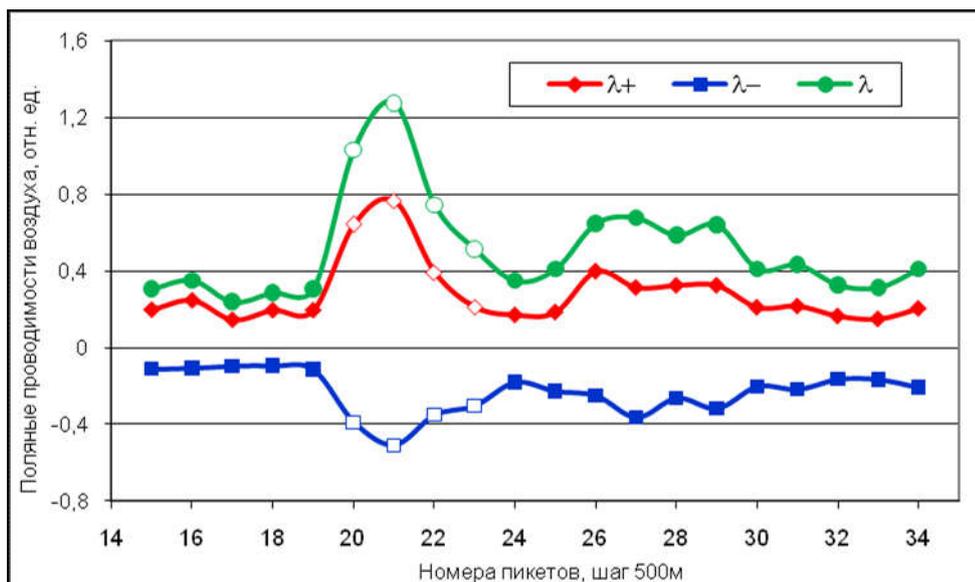


Рис. 8. Вариации полярной проводимости воздуха на участке территории Северо-Ставропольского ПХГ

Помимо локального объемного заряда атмосферы на измеряемые значения АЭП оказывает влияние работа глобальной атмосферной электрической цепи – до 15–20% вариаций среднего уровня сигнала в течение суток [18–20]. Для минимизации глобальных временных вариаций АЭП измерения выполнялись с использованием двух инструментов типа «Поле-2» и «Градиент» – электродинамических флюксометров, разработанных и изготовленных Главной геофизической обсерваторией (ГГО) им. А.И. Воейкова (г. Санкт-Петербург).

Флюксометр «Градиент» имеет автономное питание и используется как мобильный измерительный инструмент для регистрации АЭП на наблюдательных пикетах. Флюксометр «Поле-2» рассчитан на сетевое питание (220 В), а при отсутствии сети работает от подстанции мощностью 2,2 кВт; используется в стационарной контрольной точке для отслеживания временных вариаций поля. Разработка ГГО им. А.И. Воейкова рассчитана на долгосрочную безостановочную эксплуатацию в любых погодных условиях и хорошо зарекомендовала себя в ходе многолетней обсерваторской эксплуатации.

Как показала практика наблюдений, в том числе и на объектах Ставропольского края, в условиях «хорошей погоды» [32–33] при обработке записей двух флюксометров, которые синхронизированы по времени с точностью до секунд, временные вариации в

записях мобильного измерительного инструмента удается практически полностью убрать, используя показания стационарного прибора.

Суммарная относительная ошибка стационарного и мобильного флюксометров находится в пределах 12–13%. Перед выездом на полевые работы стационарный и мобильный флюксометры «Поле-2» и «Градиент» проходят многодневную проверку на идентичность. По данным подобной проверки 2007 г., в диапазоне полей 50–450 В/м разброс абсолютных значений измерительных инструментов не превышает 8% (при анализе круглосуточных результатов измерений) и 4,5% (при анализе данных только дневных измерений). Практически двукратное увеличение разброса показаний датчиков на массивах данных круглосуточных наблюдений объясняется падением температуры и инъекцией нейтральных ядер конденсации в ночные часы и, соответственно, различными температурными дрейфами электроники регистрационных блоков приборов. Паспортная погрешность каждого из флюксометров – 5%, то есть даже по данным круглосуточной регистрации их суммарная ошибка (7%) сравнима с регистрируемым разбросом показаний (8%).

Влияние погодных условий на качество комплексных водород–радоновых и атмосферно-электрических наблюдений

При полевых исследованиях на оползневом склоне стационарный датчик атмосферного электрического поля использовался для контроля стабильности метеорологической ситуации. Рассмотрим пример, иллюстрирующий эффективность подобного контроля поля у хутора Усть-Невинский в июне 2005 г.

Климат Ставропольского края позволял проводить наблюдения на оползне, в основном, в условиях «хорошей погоды» [32–33], без большого увеличения временных затрат. Тем не менее, как показала практика, полнейшее безветрие и отсутствие облачности не всегда гарантируют слабое локальное метеорологическое влияние на суточные вариации контролируемых параметров Земли и атмосферы (рис. 9).

Во временном интервале $10^{\text{h}32^{\text{m}}}$ – $11^{\text{h}07^{\text{m}}}$ 09.06.2005 г. на записях стационарного флюксометра был зарегистрирован мощный всплеск поля, который можно видеть между отсчетами 132–152. Средний фоновый уровень поля равен ~ 90 В/м, максимальная амплитуда всплеска составляет ~ 150 В/м. Для демонстрации нормальной фоновой вариации поля в стационарной точке наблюдений график дан по двум шкалам – крупномасштабной и мелкомасштабной.

Причиной наблюдаемых изменений поля является испарение влаги, накопленной грунтом за ночь. С одной стороны, этот процесс привел к инъекции нейтральных ядер конденсации, что и вызвало зарегистрированные изменения поля, с другой – к полному

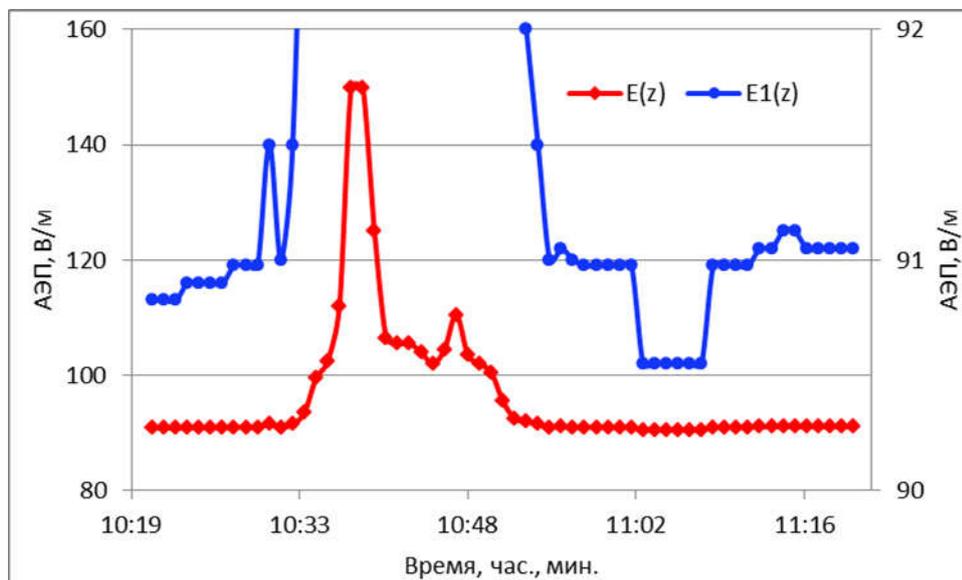


Рис. 9. Всплеск поля по показаниям флюксметра в стационарной точке 09.06.2005 г.

открытию приповерхностных пор, что изменило режим воздухообмена почва–атмосфера. В записях измерений водорода и радона почвенного воздуха и полярных проводимостей, выполненных в это время, также были зарегистрированы скачки сигнала. Полученные результаты всех наблюдений за временной интервал 10^h32^m–11^h07^m 09.06.2005 г. были отбракованы, и в тот же день были проведены повторно.

В июне 2004 г. на оползне проводился первый этап профильных наблюдений: 04.06.2004 г. закончился 3-дневный период дождей, и полевые работы были начаты через 2 дня (06.06.2004 г.). Запись вариаций АЭП 06.06.2004 г. на профиле длиной 240 м, идущем вниз по склону (25 наблюдательных пикетов), приведена на рис. 10.

В области пикетов 13–17 наблюдения не проводились, поскольку профиль здесь проходил через заросший лесом участок, где поле экранируется кустами и деревьями. На пикетах 7 и 18–22 зарегистрирован спад поля со сменой знака (пикет 7 – на заболоченном участке молодого оползня; пикеты 18–19 – в конце тела древнего оползня, пикеты 20–22 – на надпойменной террасе реки Кубань).

Одновременно с измерениями АЭП 06.06.2004 г. на профиле брались образцы почвенного воздуха из скважин глубиной 0,6 м. На пикетах с отрицательными значениями АЭП газовые пробы взять не удалось, так как на глубине 0,2–0,3 м в скважинах стояла

вода. Повторный цикл измерений АЭП был поставлен 10.06.2004 г. Значения АЭП на пикетах 7, 18–22 поменяли знак; средние уровни сигналов на пикетах 1–12 ($E(\text{cp})_{1-12} = 199 \text{ В/м}$) и на пикетах 18–25 ($E(\text{cp})_{18-25} = 187 \text{ В/м}$) оказались близки друг другу.

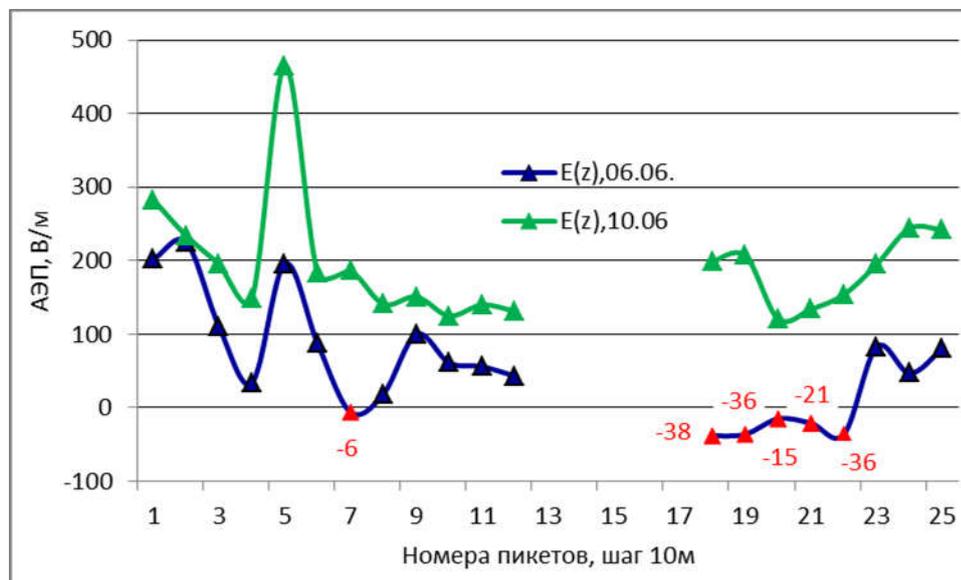


Рис. 10. Результаты наблюдений АЭП 6-го и 10 июня 2004 г. на профиле длиной 240 м, идущем сверху вниз по телу оползня

В результатах анализа данных измерений 06.06.2004 г. и 10.06.2004 г. необходимо обратить внимание на разность между средними значениями поля по группам пикетов – по мере спуска по склону она заметно растет. По группе пикетов 1–12 средняя разность $\Delta E(\text{cp})_{1-12} = 97 \text{ В/м}$, а по группе пикетов 18–25 – $\Delta E(\text{cp})_{18-25} = 178 \text{ В/м}$.

Причина наблюдаемых перепадов АЭП заключается в инфильтрации накопленной за период дождей воды вниз по склону. Сток воды сопровождается вымыванием солей радия из глинистого водоупора, в том числе и в поверхности скольжения оползня. В местах минимального подхода грунтовых вод к поверхности имеет место максимальная эксхалация радона, что и приводит к отрицательным значениям поля – ярко выраженному реверсивному электродному эффекту [2, 30]. Более того, пикет 7 расположен на заболоченном участке (индикатор заболоченности – камыши) и там следует ожидать повышенного сброса биогенного метана – газа-носителя ионизатора [11, 13].

В процессе стока воды в первую очередь обезвоживается верхняя часть склона. Видимо, на момент наблюдений 06.06.2004 г. основная масса воды находилась уже в нижней части оползня, где и зарегистрированы самые низкие значения поля. Очень

показательна высокая чувствительность абсолютных значений АЭП к близости грунтовых вод к дневной поверхности.

Заключение

Мощность тела оползня существенно меньше его длины. Как следствие этого возникающие зоны повышенной трещиноватости (зоны растяжения) и зоны сжатия получают субвертикальную направленность. При постоянстве плотности потока летучих газов, подходящего к оползню из земных недр, непосредственно в теле оползня газ будет перераспределяться: по зонам растяжения – максимальный газоток, по зонам сжатия – минимальный.

Для оценки напряженного состояния оползня введен в рассмотрение новый параметр – относительная газопроницаемость. Относительная газопроницаемость оценивается по содержанию водорода грунта на системе наблюдательных пикетов. Зарегистрированные концентрации водорода грунта нормируются по максимальному значению контролируемого параметра. Максимальное значение относительной газопроницаемости присуще состоянию растяжения оползня; минимальное – сжатию. Принимая во внимание связи между водородом, метаном, радоном и элементами приземного атмосферного электричества относительная газопроницаемость оценивается как функция отношений (радон грунта / радон атмосферы, суммарная полярная проводимость воздуха / радон грунта, обратная величина атмосферного электрического поля / радон грунта).

Контрольные измерения были проведены вокруг рабочего и нерабочего контрафорсов аварийного здания. В качестве измеряемого параметра использовалась полярная проводимость – продукт ионизации атмосферного воздуха почвенным радоном, выносимым пузырьковыми образованиями водорода. Отношение относительных газопроницаемостей выше и ниже рабочего контрафорса ~ 14 ; сбоку и ниже нерабочего контрафорса $\sim 1,6$. Результаты 9-ти циклов наблюдений относительной газопроницаемости на оползне, современные движения которого были спровоцированы прокладкой газопровода, будут приведены во 2-ой части статьи автора «Атмосферно-электрический и водород–радоновый мониторинг напряженного состояния оползня».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бондаренко В.М., Викторов Г.Г., Демин Н.В.* Новые методы инженерной геофизики. М.: Недра, 1983. 223 с.
2. *Никитин В.Н.* Основы инженерной сейсмологии. М.: Изд-во МГУ, 1981. 175 с.
3. *Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.
4. *Сергеев Е.М.* Инженерная геология. М.: Изд-во МГУ, 1978. 384 с.
5. *Шулейкин В.Н., Резниченко А.П., Никулин Д.А.* Газопроницаемость – контрольный параметр напряженного состояния оползня // Сб. трудов VII геофиз. чтений им. В.В. Федынского «Геофизика XXI столетия: 2005 год». М.: Научный мир, 2006. С. 341-346.
6. *Шулейкин В.Н.* Контроль напряженного состояния оползневого склона на трассе трубопровода // Oil & Gas Journal Russia. 2012. № 9(64). С. 82–87.
7. *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.
8. *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.
9. *Калинина Л.Н., Литвинов А.В., Николаев И.Н.* МДП-сенсоры с различными металлическими и диэлектрическими слоями // Датчики и системы. 2011. № 2. С. 20–23.
10. *Баранов В.И.* Радиометрия. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 343 с.
11. *Зубарев А.П., Шулейкин В.Н.* Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. М.: Изд-во ООО «Газпром ПХГ», 2009. 264 с.
12. *Климишин А.В.* Оценка вариаций плотности потока радона при возникновении свободной тепловой конвекции в верхнем слое почвы // Уральский геофизический вестник. 2009. № 2. С. 42–44.
13. *Шулейкин В.Н.* Атмосферное электричество и физика Земли. М.: ООО «ФЭД+», 2006. 159 с.
14. *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.

15. 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 20.07.2017).

16. 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.

17. 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.

18. Тверской П.Н. Курс метеорологии. Л.: Гидрометиздат, 1951. 887 с.

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

20. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометиздат, 1974. 247 с.

21. Шулейкин В.Н. Косвенный контроль концентрации метана над углеводородными скоплениями – методика, метрология // Фундаментальные проблемы нефтегазовой гидрогеологии: Материалы междунар. конф. М.: ГЕОС, 2005. С. 551–555.

22. Шулейкин В.Н., Резниченко А.П. Атмосферно-электрический и водород-радоновый контроль экологической безопасности территории газохранилища // Труды VI Рос. конф. по атмосферному электричеству. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2007. С. 292–293.

23. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1976. 255 с.

24. 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.

25. Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель турбулентного приземного слоя при наличии многократно заряженных аэрозольных частиц // VII Всерос. конф. по атмосферному электричеству: Сб. науч. тр. СПб., 2012. С. 199–201.

26. Шулейкин В.Н. О природе биполярных вариаций атмосферного электрического поля // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць. Київ: ДрукТОВ «Карбон ЛТД», 2012. Вип. 9. С. 57–72.
27. Шулейкин В.Н. Реверсивный электродный эффект – расчеты и эксперимент // Наука и технологические разработки. 2013. № 2. С. 17–27.
28. Сисигина Т.И. Измерения эксхалиции радона с поверхности горных пород // Вопросы ядерной метеорологии: Сб. ст. М.: Госатомиздат, 1962. С. 104–111.
29. Сисигина Т.И. Эксхалиция радона с поверхности нескольких типов почв Европейской части СССР и Казахстана // Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии: Сб. ст. М.: Атомиздат, 1965. С. 40–48.
30. 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 20.07.2017).
31. Шулейкин В.Н. Атмосферно-электрическое зондирование неоднородностей и динамических процессов в геологической среде // Радиофизические методы в дистанционном зондировании природных сред: Лекция на 4-й Всерос. науч. школе и конф. Муром, 2009. 29 с. – Электрон. опт. диск (CD-ROM).
32. Руководство по наземным наблюдениям за элементами атмосферного электричества. Л.: Изд-во ГГО им. А.И. Воейкова, 1960. 95 с.
33. Семенов К.А. Хорошая погода и элементы атмосферного электричества // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 1982. Вып. 455. С. 112–119.
34. Шварц Я.М. Методы и аппаратура для измерения элементов атмосферного электричества // Атмосферное электричество: Сб. ст. Л.: Гидрометиздат, 1976. С. 59–70.