

В.Н. Шулейкин

АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И ВОДОРОД-РАДОНОВЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЯ

Разработана методика оперативного контроля напряженного состояния оползня по относительной газопроницаемости – нормированной на максимальное значение концентрации водорода грунта. Этот параметр рассчитывается как функция концентрации радона грунта и радона атмосферы, радона грунта и полярной проводимости атмосферного воздуха, радона грунта и обратной величины атмосферного электрического поля. Максимальная относительная газопроницаемость – зона растяжения, минимальная – зона сжатия. Методика успешно прошла проверку в 9 циклах наблюдений на оползневом склоне.

Ключевые слова: склон, оползень, напряженное состояние, водород, радон, полярная проводимость, атмосферное электрическое поле.

Оползни представляют собой отделившиеся массы рыхлых пород, медленно, постепенно или скачками сползающие по наклонной плоскости отрыва и сохраняющие при этом свою связанность и монолитность. Оползни возникают на склонах долин, речных и морских берегах, в горах.

Чаще всего исследование состояния оползневых тел ведется с использованием электро- и сейсморазведки. Реже комплекс дополняется термометрией, высокоточной гравиметрией и магнитными наблюдениями [4, 7]. Используемые методы контроля эффективны, но трудоемки. Поэтому остановимся на особенностях тела оползня, допускающих применение нетрадиционного геофизического подхода для решения задачи о его напряженном состоянии.

Мощность оползня существенно меньше его длины [7, 8]. Поэтому возникающие в теле оползня зоны повышенной трещиноватости – зоны растяжения и сжатия – будут иметь субвертикальную направленность. При постоянстве состава и плотности потока летучих газов, подходящего к оползню из земных недр, непосредственно в теле оползня плотность этого потока будет перераспределяться. По зонам растяжения будет иметь место максимальный газообмен, по зонам сжатия – минимальный.

Побуждающей причиной движения оползня является наличие влаги [8]. Уже при 30 % влажности грунта воздухообмен почва–атмосфера будет происходить 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 [11–13]. Для этого на

исследуемом участке на системе наблюдательных пикетов достаточно провести оперативные измерения какого-либо летучего газа в грунте и нормировать полученные значения на максимальное зарегистрированное значение выбранного параметра. Единичное значение будет наблюдаться на участке оползня, где растяжение на момент наблюдений максимальное, минимальное значение – на участке максимального сжатия.

Впервые в инженерно-геологической практике относительная газопроницаемость использовалась в начале 1990-х годов при контроле состояния контрафорсов 1 и 3, установленных по торцам и ниже аварийного здания, построенного на насыпной ступени на берегу реки [11]. В качестве контрольного параметра использовались полярные проводимости воздуха – продукт ионизации почвенным радоном атмосферного воздуха. Радон, в свою очередь, выносится в приповерхностную атмосферу пузырьковыми образованиями водорода и метана [3, 14]. В принятых модельных представлениях полагалось, что максимальному уровню газопроницаемости соответствует максимальная полярная проводимость – по зоне максимального растяжения идет максимальный сброс летучих газов.

Искомая относительная газопроницаемость представлялась как частное от деления контролируемого параметра на каждом наблюдательном пикете на его максимальное значение, зарегистрированное на всей площади измерений. Результаты этих измерений представлены на рис. 1.

Вдоль правого крыла аварийного здания был проложен профиль 1, пикет 1/1 которого находился ниже контрафорса 1, а пикеты 2–5 – выше. Этот контрафорс жестко связан с фундаментом здания и, очевидно, находится в рабочем состоянии – на пикете 1/1 относительная газопроницаемость минимальна, т. е. здесь имеет место максимальное сжатие. На пикете 1/2, наоборот,

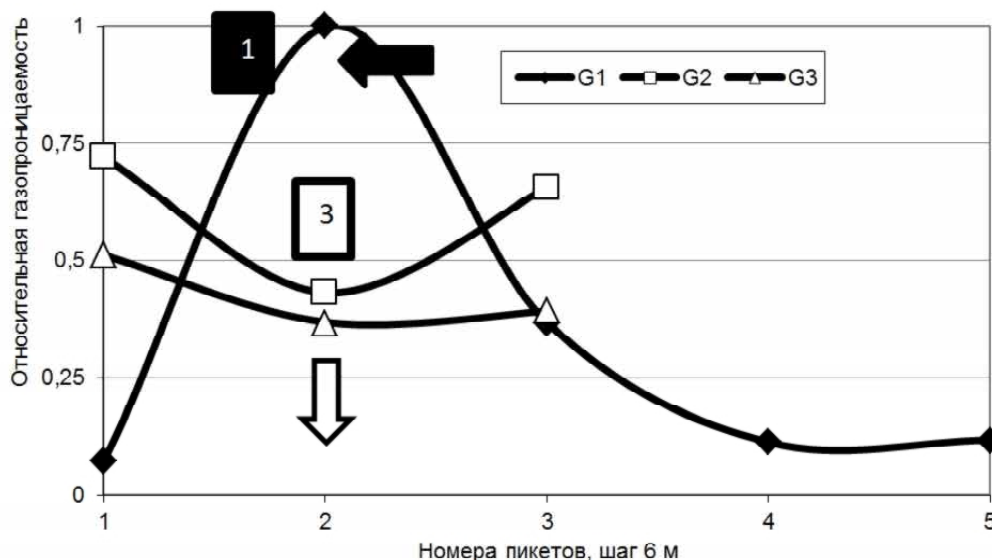


Рис. 1. Относительная газопроницаемость у исследуемых контрфорсов 1 и 3: G1 – в зоне действия рабочего контрфорса у торца аварийного здания; G2, G3 – ниже нерабочего контрфорса перед фасадом аварийного здания. Стрелками указано направление вниз по склону

наблюдается максимальная газопроницаемость, что соответствует состоянию максимального растяжения. Контрфорс работает по принципу лодочного весла: перед лопастью весла – сжатие; за лопастью – растяжение.

Контрфорс 3 установлен перед фасадом левого крыла аварийного здания и не связан с его фундаментом. Его функция – удержание насыпной ступени от сползания вниз по склону. Ниже контрфорса 3 были заложены два параллельных профиля – 2 и 3; пикеты 2/2 и 3/2 – соответственно, на 6 и 12 м ниже контрфорса по склону. Контрфорс 3, очевидно, находится в нерабочем состоянии – уровень относительной газопроницаемости $G(2/2) = 0,43$, что в 6 раз больше, чем на пикете $G(1/1)$, – 0,07. Более того, уровень относительной газопроницаемости на пикете 2 профиля 3, проходящем на 12 м ниже контрфорса, $G(3/2) = 0,37$, т. е. грунт насыпной ступени ниже профиля 3 по склону в большей мере сдерживает движение, нежели контрфорс.

На время постановки описанных наблюдений еще не существовало измерительных инструментов для контроля концентрации водорода почвенного воздуха. Разработка Московским инженерно-физическим институтом водородных сенсоров типа ВСГ-01 и более поздней модели ВГ-2Б [5, 6] открыла эту возможность, хотя и потребовала доработки датчиков. Предлагаемые измерители были рассчитаны на непрерывную режимную регистрацию концентрации водорода почвенного или атмосферного воздуха. В доработанном варианте в рабочем объеме датчика последовательно анализировались пробы почвенного и атмосферного воздуха. Разность концентраций и отражала искомое содержание водорода грунта. Естественно, что на исследуемой территории образцы почвен-

ного воздуха отбирались из одинаковых пробортборных скважин. Последующее нормирование полученных концентраций водорода на зарегистрированное максимальное значение концентрации летучего газа на исследуемой площади позволяло перейти к относительным значениям газопроницаемости.

Практика многолетних наблюдений объемной концентрации водорода в грунте, на Александровской структуре в Белоруссии, на Калужской кольцевой структуре, при работах в Шелково, Касимове и Ставропольском крае [7, 8] показала высокую надежность и достоверность результатов оперативных наблюдений содержания водорода при жестком соблюдении нескольких условий.

Измерения концентрации водорода в приповерхностных слоях грунта следует проводить исключительно в условиях хорошей погоды, по крайней мере, через 1–2 дня после выпадения осадков. Относительная влажность воздуха от 80 % и выше – выпадение росы в утренние и вечерние часы – способна сильно исказить истинные значения контролируемого параметра. Невозможно проведение измерений при ветровой нагрузке 8–10 м/с и выше – имеет место “подсасывание” водорода грунта, что приводит к уравниванию его концентрации с концентрацией водорода в атмосфере.

Оптимальное изготовление пробоотборной скважины мотобуром с полым шнеком рассчитано на прямой отбор образца почвенного воздуха. При работе с пробоотборником скважина должна быть немедленно закрыта после изъятия сверла. Даже при идеальных погодных условиях через 5–6 с после бурения концентрация водорода в ней уравнивается с концентрацией в атмосфере.

Все эти условия должны соблюдаться особенно жестко при отборе проб почвенного воздуха на деформированном оползневом склоне, где регистрируемый водород попадает в пробоотборник по системе трещин. В коммутируемых с атмосферой трещинах концентрация летучего газа будет равна атмосферной, т. е. будет значительно ниже. В случае если при сверлении пробоотборной скважины вскрыта трещина, отсеченная в естественном положении от атмосферы, текущая концентрация водорода в пробе заметно возрастает. Во избежание ошибочных показаний датчика, особенно в зонах повышенной трещиноватости, очевидна целесообразность работы с использованием двух измерительных инструментов, с забором проб из двух близлежащих скважин. Пробоотбор следует вести до совпадения двух результатов оперативного анализа в пределах ошибки измерительного инструмента, что, очевидно, повысит достоверность данных, существенно не увеличивая время работы на одном наблюдательном пикете.

При соблюдении перечисленных условий измерений объемная концентрация водорода в грунте может быть использована для оценки относительной газопроницаемости. Искомая газопроницаемость представима в относительных единицах, как частное от деления текущего значения объемной концентрации водорода на максимальное значение объемной концентрации водорода на выделенной системе пикетов $G_i(H) = H_i/H_{\max}$.

Представительность полевого материала можно повысить с помощью нескольких способов. Один из них отмечен выше – при сохранении производительности работ порядка 4–6 замеров в час реально проведение наблюдений с отбором 2 проб на каждом пикете и их последующим оперативным анализом с использованием двух измерительных инструментов.

Другой способ – комплексирование наблюдений водорода со связанными с ним газовыми и электрическими параметрами. Согласно принятым модельным представлениям [3, 14], водород почвенного воздуха является газом-носителем почвенного радона в приповерхностные слои грунта и в атмосферу. Поэтому, дополнив наблюдения водорода измерением концентраций радона почвенного и атмосферного воздуха, возможно получение независимой расчетной информации о концентрации летучего газа по данным о радоне почвенного и атмосферного воздуха на пикете.

Необходимо отметить, что применение радионевой съемки при исследованиях оползней уже рекомендовалось [2]. 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, будут глины подошвы (основа-

ния) оползня. Ввиду малого периода полураспада – 3,825 сут, газ-эманация будет достигать поверхности Земли с потерей плотности, пропорциональной локальной мощности оползня – 4–6-метровой слой грунта приведет к потере плотности на порядок [1]. Полагая, что радон грунта выносится в атмосферу одним и тем же потоком летучих газов, можно записать соотношение

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

Полученные значения $Rn(a)_i$ и Rn_i на системе наблюдательных пикетов позволяют решать задачу о величинах $H_i = H[Rn(a)_i, Rn_i]$ и по описанной выше схеме – об относительной газопроницаемости $G_i[Rn(a), Rn]$.

В рамках современной теории приземного атмосферного электричества [9, 10], почвенный радон является единственным естественным ионизатором атмосферного воздуха. Отсюда его концентрация эксхалации может быть измерена, с одной стороны, напрямую, а с другой – косвенно: по уровню полярных проводимостей (ПП) или обратной величины атмосферного электрического поля (АЭП). Измерение ПП и АЭП на каждом наблюдательном пикете позволит дополнительно рассчитать относительные газопроницаемости, но уже как функции полярных проводимостей λ_i , концентрации и радона грунта – $G_i[\lambda, Rn]$ и как функции обратной величины атмосферного электрического поля $1/E_i$ и концентрации радона грунта – $G_i[1/E, Rn]$. Окончательно, соблюдая описанную выше процедуру оценки относительной газопроницаемости по данным наблюдений водорода, радона и элементов приземного атмосферного электричества, переходим к ее средней величине:

$$G_i = 1/4\{G(H_i) + G_i[Rn(a), Rn] + G_i(\lambda, Rn) + G_i(1/E, Rn)\}. \quad (1)$$

В усреднение, используемое при расчете относительной газопроницаемости G_i , входит не только формальная математическая процедура. В правой части выражения (1) с весовым множителем 1/4 учитываются различные физические связи, взятые в расчет при оценке объемной концентрации водорода в грунте на каждом наблюдательном пикете. Предлагаемая усредненная оценка относительной газопроницаемости, с одной стороны, увеличивает представительность и достоверность окончательного результата, с другой – допускает получение искомой оценки 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. вследствие растрескивания грунта не удалось провести наблюдения водорода – все расчеты выполнялись по данным

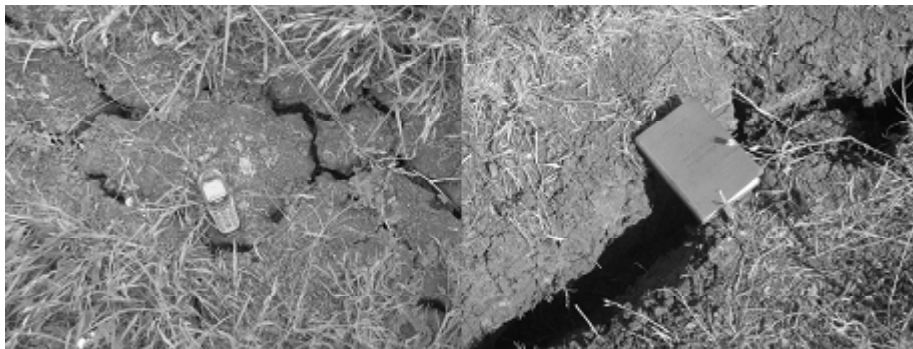


Рис. 2. Характерное растрескивание грунта в августе 2006 г., исключающее возможность проведения измерений концентрации водорода почвенного воздуха

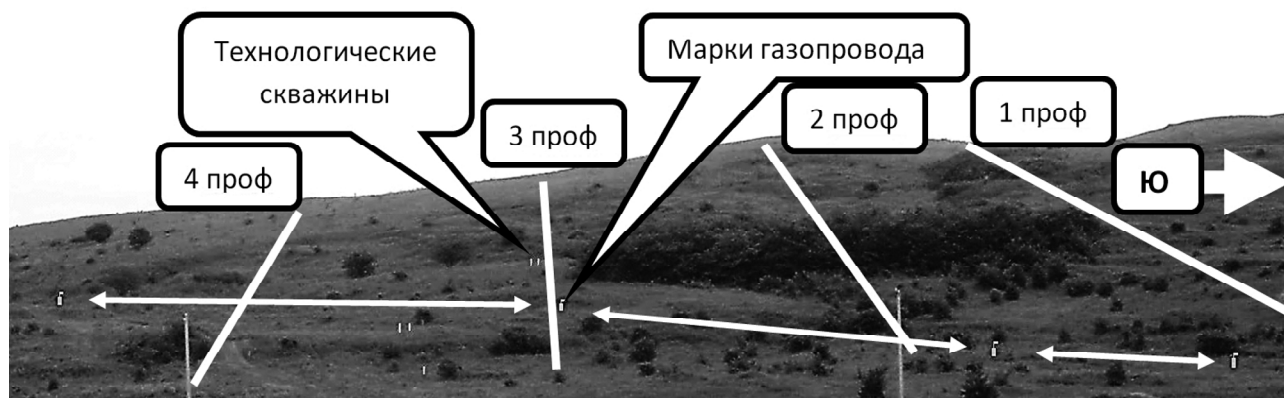
измерений концентраций радона и элементов приземного атмосферного электричества (рис. 2).

Рассмотрим результаты практического использования комплексных газовых и атмосферно-электрических наблюдений в 9 последовательных циклах наблюдений на оползне у хутора Усть-Невинский, современные движения которого могли быть спровоцированы прокладкой газопровода (рис. 3, а).

Объект исследования находится на правом, крутом борту долины р. Кубань. Правый борт долины р. Кубань здесь обращен на запад. На юг, вверх по течению р. Кубань, на склоне ее доли-

ны, полосой расположены оползни. Оползневые тела соприкасаются друг с другом и образуют сложную оползневую систему длиной несколько километров (рис. 3, б).

Исследуемый участок является частью этой зоны и находится в самом начале ее северной оконечности. Верхняя часть участка включает верхнюю выположенную часть склона, не затронутую оползневыми процессами. Склон, расположенный выше исследуемого участка, переходит в плавно поднимающуюся к югу слабохолмистую поверхность.



а



б

Рис. 3. Наблюдательные профили 1–4 на теле оползня: а – столбы с флажками – марки прохождения газопровода на исследуемой площади; б – полоса оползней по западному склону р. Кубань

Ниже выположенной части склона находится молодой активный оползень с хорошо выраженными дугообразными нишами отрыва. Общая высота стенок отрыва до 6 м. Поверхность оползня состоит из ряда ступеней, образованных смещенными блоками, которые отделены друг от друга трещинами, расположенными кулисообразно. Высота ступеней до 1,5 м, ширина — до 3 м, ширина трещин до 20 см. Встречаются свежие, открытые трещины. Вертикальные смещения по свежим трещинам составляют 10–30 см. Дерн разорван, местами отсутствует совсем. В средней части участка молодой активный оползень опирается на более старое стабильное оползневое тело, образуя небольшой бугор выпирания. Перед бугром выпирания поверхность молодого активного оползня имеет обратный уклон, поэтому почва местами сильно увлажнена, есть заболоченные участки, поросшие камышом.

Старое стабильное оползневое тело образует площадку, слабо наклоненную на запад, в сторону р. Кубань. Она частично поросла небольшим лесом (рошей) и отдельными кустами. Возраст деревьев в роше около 25–30 лет (определение сделано по годовым кольцам среза одного из сухих деревьев в 2004 г.). Эта роша занимает около 30 % площади старого оползневого тела и, несомненно, способствует сохранению его стабильного состояния. Поверхность площадки сглаженная, хорошо задернованная. Свежие трещины отсутствуют. Старое стабильное оползневое тело опирается на прикрытую делювиальным шлейфом поверхность первой надпойменной террасы р. Кубань и отделяется от нее уступом, хорошо выраженным в рельефе. Поверхность первой надпойменной террасы р. Кубань плоская, ровная, слабо наклонена в сторону реки.

Исследуемый геологический объект пересечен 4 наблюдательными профилями по 25 пикетов на каждом (рис. 3). Нумерация пикетов вниз по склону, шаг между ними 10 м. На этих пикетах в период с 06.2004 по 06.2008 г. было проведено 9 циклов измерений относительной газопроницаемости. Для контроля изменений напряженного состояния оползня рассматривалась разностная относительная газопроницаемость между результатами измерений 2-го и 1-го циклов, 3-го и 1-го циклов и т. д. Положительные вариации разностной относительной газопроницаемости означали процесс растяжения; нулевые — неизменность напряженного состояния; отрицательные — сжатие. Суммарные разностные относительные газопроницаемости зафиксированы на каждом наблюдательном профиле (рис. 4). Рассматриваемые разностные характеристики представлены только по наблюдательным пикетам, расположенным непосредственно на теле оползня.

Первые 6 пикетов профиля 1 находятся на теле молодого оползня. За исключением 3-го цик-

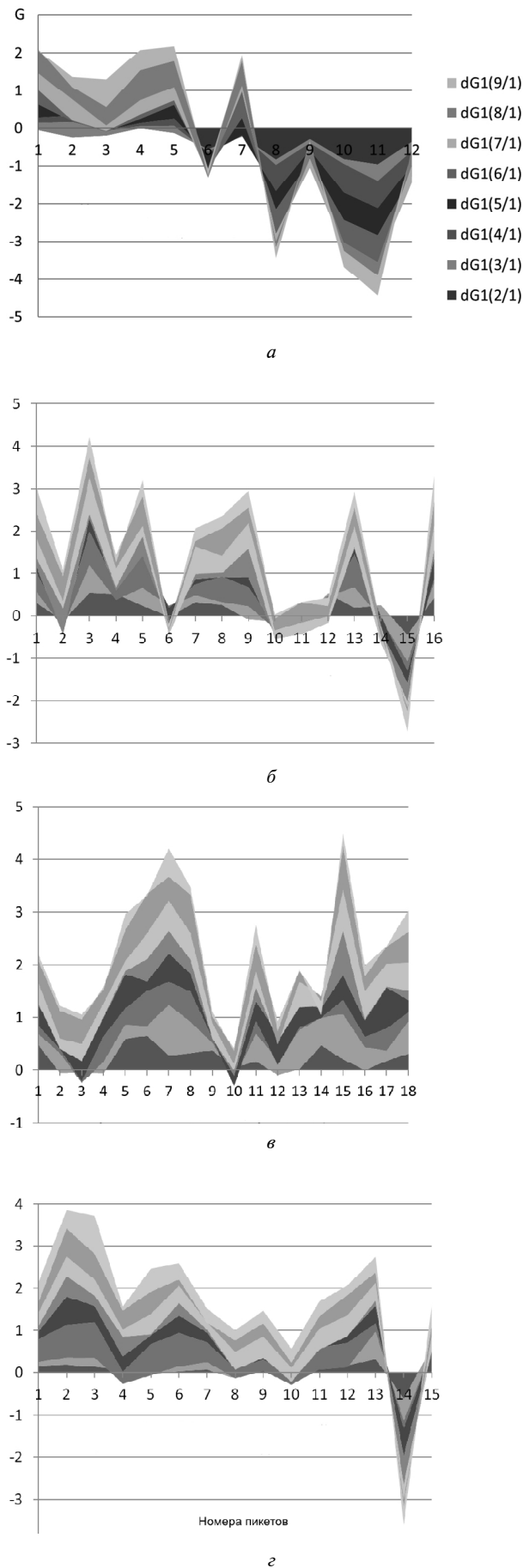


Рис. 4. Суммарная разностная относительная газопроницаемость G за 9 циклов наблюдений на профилях 1–4 (а–г). Шаг пикетов 10 м. Пересечение с газопроводом профиля 4 — пикет 10

ла наблюдений, на первых 5 пикетах наблюдается слабое растяжение, на пикете 6, где находится бугор выпирания, – сжатие. Расположенный ниже древний оползень на пикетах 8–12 находится в состоянии сжатия; на пикете 7 вследствие сдерживающего эффекта бугра выпирания молодого оползня – в состоянии растяжения (рис. 4, а).

Рис. 4, б представляет вариации разностной относительной газопроницаемости на профиле 2. Первые 9 пикетов лежат на теле молодого оползня; остальные – на теле древнего. Состояние оползня на их границе (пикеты 9, 10) подверглось минимальным изменениям за все 9 циклов измерений. В отличие от профиля 1, на профиле 2 тело древнего оползня находится в состоянии растяжения. Наиболее вероятная причина тому – стабилизирующий эффект корневой системы леса, покрывающего половину его площади (см. рис. 3).

Первые 6 пикетов профиля 3 находятся на теле молодого оползня (рис. 4, в). Циклы наблюдений на них характеризуются увеличением относительной газопроницаемости, т. е. процессом растяжения. В зоне бугра выпирания (пикет 6) изменений напряженного состояния практически не заметно. На теле старого оползня отмечается несколько искусственных внедрений: между пикетами 13 и 14 профиль пересекает газопровод; в районе пикетов 12–14 – куст технологических скважин. На пикетах 10–12, 14 заметных изменений напряженного состояния не наблюдается; на пикете 13 устойчиво повторяется слабое растяжение.

Профилем 4 (рис. 4, г) газопровод пересечен на уровне пикета 10. За 9 циклов наблюдений напряженное состояние здесь не изменилось, т. е. за 4 года наблюдений нагрузка на трубу газопровода практически оставалась одной и той же.

Для количественной оценки динамики исследуемого оползня за 9 циклов наблюдений рассмотрим коэффициенты корреляции разностных относительных газопроницаемостей (рис. 5).

Как следует из рис. 5, самое устойчивое состояние оползня за 4 года наблюдений зарегистрировано по линии профиля 1, менее устойчивое – по линии профиля 4 (коэффициенты корреляции – в среднем около 0,6). Видимо, эти два профиля вносят основной весовой вклад в коэффициенты корреляции между парами разностных характеристик по всему телу оползня: $k(dG) \sim 0,5 \div 0,6$.

Самый большой разброс разностных характеристик – незначимые коэффициенты корреляции, зарегистрирован на профиле 2 – $k(dG2) \sim [-0,1 \div 0,4]$. Причиной тому могут быть контрастные особенности исследуемого геологического образования по линии профиля 2. С одной стороны, в средней части молодого оползня лежит заболоченный участок, где инфильтрация талых вод и осадков максимальна вследствие топографических особенностей выположенной части склона, не затронутой оползневыми процессам, т. е. подвижки этой части оползня наиболее вероятны. С другой стороны, половина площади древнего оползня максимально стабилизирована корневой системой 30-летних деревьев и кустарников.

Представленные материалы 9 циклов полевых наблюдений на оползне, современные движения которого были спровоцированы прокладкой газопровода, и их анализ дают возможность утверждать следующее:

- предложенная методика комплексных водород-радоновых и атмосферно-электрических наблюдений позволяет уверенно контролировать

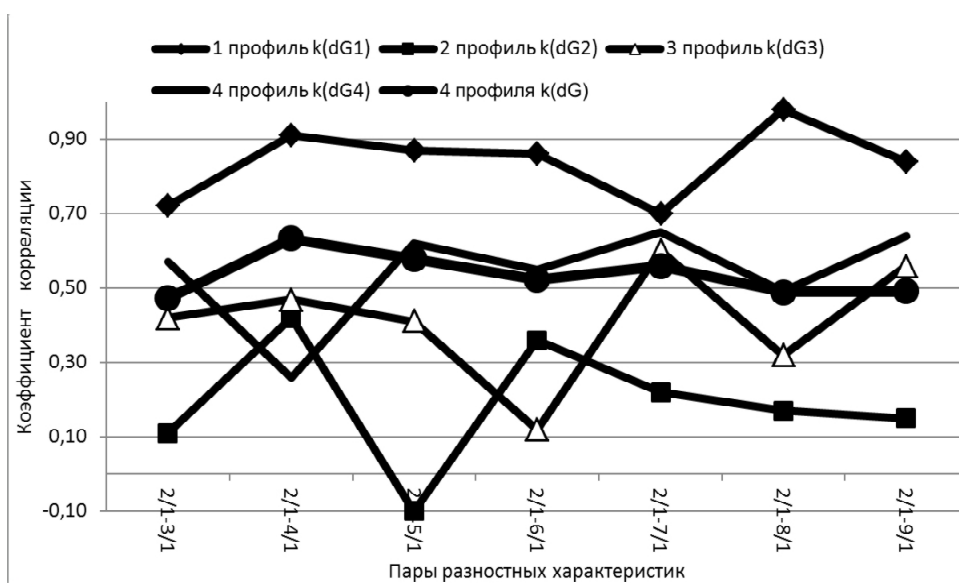


Рис. 5. Изменение коэффициентов корреляции пар разностных относительных газопроницаемостей на профилях 1 – 4 и по всему оползню в целом за 9 циклов наблюдений

- текущее напряженное состояние оползневого тела;
- повторная реализация методики по единой системе наблюдательных пикетов на исследуемом геологическом образовании позволяет отслеживать изменения напряженного состояния за временной интервал между циклами измерений;
 - в зависимости от требований к точности наблюдений для решения конкретной задачи и от ее специфики при постановке работ можно не использовать весь газовый и атмосферно-электрический комплекс, а ограничиться измерениями одного-двух параметров;
 - используемый аппаратный комплекс укомплектован отечественным аппаратным парком и позволяет получать результат в режиме реального времени.
1. Баранов В.И. Радиометрия. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 343 с.
 2. Бондаренко В.М., Викторов Г.Г., Демин Н.В. Новые методы инженерной геофизики. – М.: Недра, 1983. – 223 с.
 3. Зубарев А.П., Шулейкин В.Н. Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. – М.: ООО “Газпром ПХГ”, 2009. – 264 с.
 4. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 175 с.
 5. Николаев И.Н., Литвинов А.В. Методика измерений малых концентраций H_2 и H_2S над поверхностью воды // Измерит. техника. – 2004. – № 5. – С. 54–60.
 6. Николаев И.Н., Литвинов А.В., Халфин Т.М. Автоматизированные газоанализаторы водорода в диапазоне объемных концентраций 10^{-6} –1,0 % // Там же. – 2004. – № 7. – С. 34–38.
 7. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. – М.: Недра, 1990. – 501 с.
 8. Сергеев Е.М. Инженерная геология. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 384 с.
 9. Тверской П.Н. Курс метеорологии. – Л.: Гидрометиздат, 1951. – 887 с.
 10. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометиздат, 1974. – 247 с.
 11. Шулейкин В.Н., Резниченко А.П., Никулин Д.А. Газопроницаемость – контрольный параметр напряженного состояния оползня: Сб. тр. XII Геофиз. чтений им. В.В. Федынского “Геофизика XXI столетия: 2005 год”. – М.: Науч. мир, 2006. – С. 341–346.
 12. Шулейкин В.Н., Резниченко А.П., Никулин Д.А. Нетрадиционный метод контроля напряженного состояния оползневого склона // Технологии ТЭК. – 2005. – № 5. – С. 84–87.
 13. Шулейкин В.Н., Зиновьев В.В., Варягов С.А. и др. Оценка напряженного состояния оползня по результатам нетрадиционных геофизических наблюдений // Там же. – 2005. – № 6. – С. 56–61.
 14. Шулейкин В.Н. Атмосферное электричество и физика Земли. – М.: ООО “ФЭД+”, 2006. – 178 с.

Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия
E-mail: shvn1947@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.11.2012 г.

В.М. Шулейкин

АТМОСФЕРНО-ЕЛЕКТРИЧНИЙ І ВОДЕНЬ-РАДОНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЗСУВУ

Розроблено методику оперативного контролю напружень стану зсуву за відносною газопроникистю – нормованої на максимальне значення концентрації водню ґрунту. Цей параметр обчислено як функцію концентрацій радону ґрунту і радону атмосфери, радону ґрунту й провідності атмосферного повітря, радону ґрунту та оберненої величини атмосферного електричного поля. Максимальна відносна проникність – зона розтягу, мінімальна – зона стиску. Методика успішно пройшла перевірку в 9 циклах спостережень на зсувному схилі.

Ключові слова: схил, зсув, напружений стан, водень, радон, провідність, атмосферне електричне поле.

V.N. Shuleikin

ATMOSPHERIC-ELECTRIC AND HYDROGEN-RADON TECHNOLOGY FOR STUDYING LANDSLIDE STRESS STATE

A method is developed to monitor a landslide stress state on relative gas-permeability rated on the maximum value concentration of hydrogen of soil. The same parameter is calculated as a function of soil radon and radon of the atmosphere, as soil radon and polar conductivity of atmospheric air and as soil radon and the inverse value of the atmospheric electric field. The maximum one relative gas permeability is a stretching zone; the minimum is a compression zone. The technique was successfully tested in 9 observations cycles on the landslide slope.

Keywords: slope, landslide, stress state, hydrogen, radon, polar conductivity, atmospheric electric field.