УДК 550.837

# ТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АКТИВНОГО ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

***А.Н. Камшилин, П.А. Казначеев***

Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1
*E-mail: kamshilin@ifz.ru, p_a_k@mail.ru*

*В статье рассматриваются способы достижения максимальной эффективности активного геоэлектрического мониторинга при помощи технических и методических средств. Приводятся результаты полевых и лабораторных экспериментов без применения и с применением рассмотренных средств, делается заключение об их эффективности и возможности дальнейшего развития.*

**Введение**. Перед методами геофизических способов разведки и методами геофизического мониторинга стоят различные задачи – в первом случае изучаются статические параметры среды, во втором случае изучаются малые пространственно-временные вариации этих параметров (до долей процентов от номинальных значений). Это важное обстоятельство необходимо учитывать при разработке методов мониторинга. Сказанное в полной мере относится к электроразведке и активному геоэлектрическому мониторингу (АГЭМ).

Измерительный комплекс (электровариометр) состоит из генератора зондирующего тока, измерительного блока, излучающих (A и B) и измерительных (M и N) электродов (или иных датчиков), измерения ведутся длительное время в непрерывном режиме. Перечислим основные проблемы, которые возникают при организации наблюдений в режиме мониторинга.

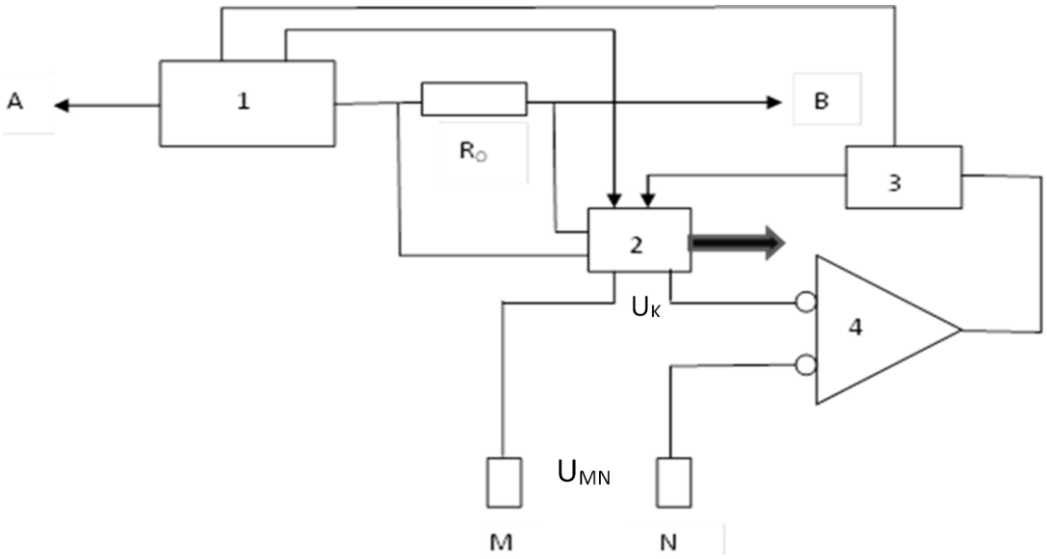
Помимо электрических помех различного уровня и различного частотного состава, с которыми приходится иметь дело при измерении электрических сигналов (помехи промышленных частот и их гармоник, радиочастотные помехи и пр.), работа в режиме АГЭМ осложняется рядом существенных помехообразующих факторов, характерных для этого вида наблюдений:

1. Наличие начальной (установочной) разности потенциалов $U_{MN0}$ между измерительными электродами, зависящей от типа измерительной установки, тока источника, электрических параметров среды. $U_{MN0}$ – это мощная синфазная электрическая помеха, на фоне которой необходимо выделять полезный сигнал $\Delta U_{MN}$. Если использовать, например, электроразведочную установку Веннера для целей мониторинга, то превышение величины $U_{MN0}$ над $\Delta U_{MN}$ достигнет нескольких порядков.

2. Влияние температуры, осадков, давления (метеоусловий) на результаты измерения вследствие изменения сопротивления верхних слоев разреза. Изменение метеоусловий порождает ложные сигналы (синфазная помеха), которые могут превосходить ожидаемый полезный сигнал на несколько порядков. Перечисленные факторы определяют технические и методические особенности АГЭМ.

**Технические особенности АГЭМ.** Для проведения мониторинга был разработан электровариометр, основанный на принципе полностью уравновешенного компенсатора. Упрощенная блок-схема прибора представлена на рис. 1.

На вход усилителя 4 поступает разность компенсирующего напряжения $U_K$ и сигнала с измерительных электродов $U_{MN}$. На вход источника компенсирующего напряжения 2 поступает опорное напряжение с эталонного резистора $R_O$, который включен последовательно с излучающими электродами AB. Управляющий сигнал на этот блок поступает с выхода синхронного детектора 3, опорным напряжением для которого служит сигнал, который формируется в блоке генератора 1. Прибор позволяет измерять вариации активной и реактивной составляющих $\Delta U_{MN}$ (на рис. 1 представлена цепь для одной из составляющих). На входе усилителя постоянно поддерживается сигнал, близкий к нулю за счет автоматической подстройки величины компенсирующего напряжения. На регистрацию выводятся сигналы с младших разрядов источника компенсирующего напряжения.




Р и с. 1. Блок-схема электровариометра.
1 – генератор, 2 – источник компенсирующего напряжения, 3 – синхронный детектор, 4 – усилитель, А и В – излучающие электроды, MN – измерительные электроды, $R_O$ – эталонный резистор, ➡ – выход на регистрацию

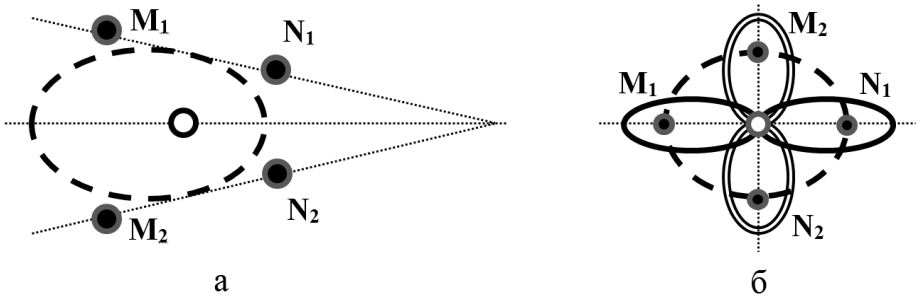
Основное достоинство такого способа измерения заключается в том, что подавляется установочная разность потенциалов между измерительными электродами (выполняется первое условие, сформулированное выше) и регистрируется только $\Delta U_{MN}$, т.е. повышается разрешающая способность метода. Второе важное обстоятельство – нестабильность тока генератора не влияет на результаты измерений, так как и полезный сигнал, и компенсирующее напряжение пропорциональны току. Разрешающая способность прибора на уровне 0,01% от номинального значения $\rho_к$. Если использовать при этом электроразведочные установки, остается проблема влияния метеоусловий. Решить ее можно, размещая электроды в скважинах или шурфах, что, впрочем, не всегда возможно.

В настоящее время авторами проводятся теоретические и экспериментальные исследования локального измерителя тока (ЛИТ, [1]). Датчиком электрического поля в этом приборе является тороидальный трансформатор тока, размещенный в изолированном от внешней среды диэлектрическом корпусе вместе с электронным блоком. ЛИТ заглубляется в исследуемую среду, объемный виток которой выполняет роль первичной обмотки трансформатора. Этот датчик является альтернативой измерительным электродным парам электровариометра. Преимущества ЛИТ перед измерительными электродными парами заключаются в том, что это самостоятельный измерительный прибор, в котором производится первичная обработка сигнала (усиление, фильтрация), при этом датчик и электронный блок могут быть экранированы от электрических помех. В данном случае назначение ЛИТ – регистрация обусловленных геодинамическими процессами вариаций плотности тока, создаваемого генератором.

**Методические особенности АГЭМ.** Как уже говорилось выше, в процессе АГЭМ необходимо обеспечить выделение полезного электрического сигнала, обусловленного «возмущениями» среды, связанными с подготовкой катастрофических событий (эволюцией существующих и образованием новых неоднородностей, флюидодинамикой и пр.). Обозначив соответственно через $\bar{E}_1$ и $\bar{E}_2$ электрическое поле в невозмущенной и возмущенной среде, отметим, что носителем информации служит разностное поле:

$$\Delta \bar{E} = \bar{E}_2 - \bar{E}_1 , \qquad (1)$$

$\Delta\ \bar{E}$ можно представить, как поле некоторого фиктивного источника (или совокупности фиктивных источников), возникшего в невозмущенной среде, обусловленного неоднородностью и определяемого, как мультипликативная функция от неоднородности и реального источника энергии, подводимой к среде. Отметим также, что в разностном поле $\Delta\ \bar{E}$ обязательно есть составляющая вектора, ортогональная исходному полю, т.е. направленная вдоль эквипотенциальных линий $\bar{E}_1$. Эти рассуждения позволяют сформулировать необходимое условие, которое должно выполняться при организации геодинамических наблюдений – способ измерения должен обеспечить максимальную чувствительность к разностному полю $\Delta\ \bar{E}$, при этом исходное поле рассматривается как помеха, т.е. необходимо обеспечить наибольшую величину соотношения сигнал/помеха $\Delta\ \bar{E}\ /\ \bar{E}_1$. При этом влияние первого помехообразующего фактора (см. выше) становится минимальным. Для выполнения этого условия пары измерительных электродов должны располагаться либо на касательных к эквипотенциальным линиям (рис. 2, *а*), либо на одной из эквипотенциальных линий электрического поля генератора (рис. 2, *б*). Эти установки мы назвали эквипотенциальными.




Р и с. 2. Схема эквипотенциальных установок: *а* – с расположением измерительных электродов на касательной к эквипотенциали, *б* – двухкоординатная эквипотенциальная установка с расположением измерительных электродов на одной эквипотенциали (излучающий электрод В отнесен в "бесконечность"). ○ – излучающий электрод А, ● – измерительные электроды М и N, штриховая линия – эквипотенциальная линия, пунктирные линии – линии разметки. На рис. 2, *б* – одинарная сплошная линия – диаграмма направленности пары электродов $M_1N_1$, двойная сплошная линия – диаграмма направленности пары электродов $M_2N_2$

Первую установку целесообразно использовать для контроля состояния известного объекта (например, разлома). Зная геометрические параметры разлома, можно выбрать касательные, сходящиеся в точке фиктивного источника, обусловленного неоднородностью (разломом). Асимметричная диаграмма направленности обеспечивает максимальную чувствительность в направлении на неоднородность.

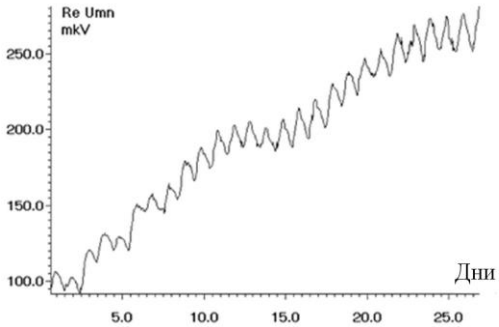
Вторую установку (группу таких установок) целесообразно использовать в том случае, когда местонахождение объекта точно неизвестно. Например, в процессе слежения за образованием закрытых суффозионных полостей, не выходящих на поверхность. С помощью группы подобных установок можно осуществлять пространственное сканирование площадей, на которых развиваются карстово-суффозионные процессы [2].

Эквипотенциальные установки подавляют влияние и второго мощного помехообразующего фактора – изменяющихся метеоусловий, поскольку их воздействие, как правило, имеет равномерное распределение по площади и помехи, порождаемые ими, имеют в основном вертикальный градиент.

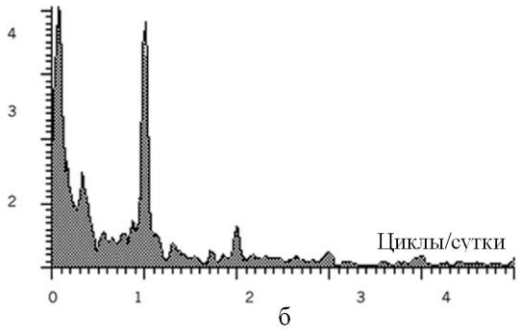
**Результаты полевых исследований.** С электровариометром, построенным по описанному выше принципу, проводились длительные полевые наблюдения с установками различных типов в сейсмоактивных регионах (в основном Туркмения) и на оползневых участках (Фасбурла, Южный берег Крыма).

Обобщая результаты можно сделать следующие выводы.

“Нормальный” временной ряд представляет собой квазипериодические колебания, основные периоды ~ 24, 12, 8 часов с изменяющимися во времени амплитудами; выделяются также низкочастотные колебания с периодами ~ 7 – 10 суток. Геодинамические события – землетрясения, подвижки оползневых склонов – сопровождались разрушением “нормального” суточного хода (рис. 3) за несколько часов до сильных землетрясений и активизации оползня, через несколько часов после события колебания восстанавливались.



а



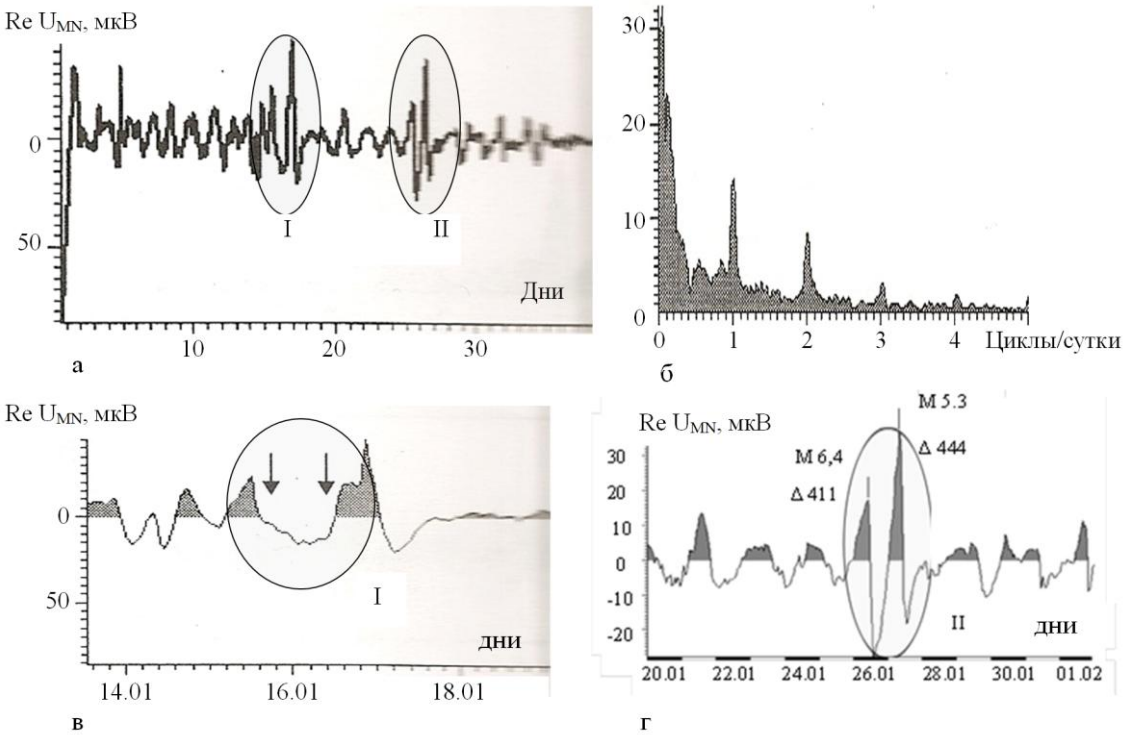
б

Р и с. 3. Результаты полевых экспериментов, Туркмения, эквипотенциальная установка: «нормальный» временной ряд (*а*) и спектр Фурье этого ряда (*б*). АВ ~ 100 м; электроды M и N установлены на одной эквипотенциали, разносы MA и NA ~ 10–15 м, MA не равно NA. Электроды (графитовые цилиндры) заглублены ~ на 1 м

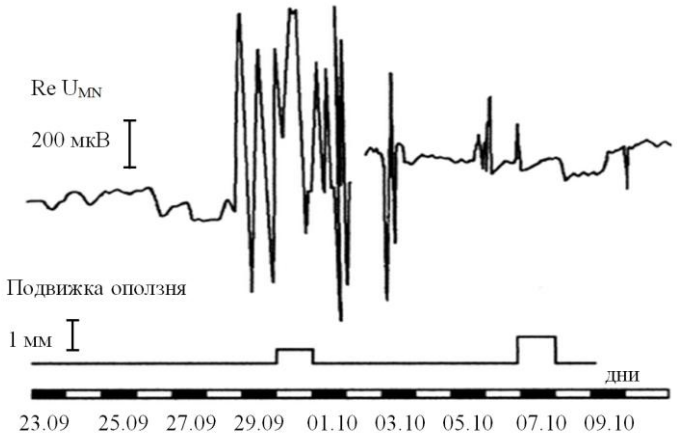
Сравнивая результаты работы эквипотенциальной установки, расположенной на дневной поверхности и симметричной установки, изолированной от влияния метеофакторов (установленной в шурфе, рис. 4), обнаруживаем идентичность «нормальных» временных рядов и по амплитуде, и по спектральному составу. Это подтверждает способность эквипотенциальных установок устранять влияние помехообразующих метеофакторов. Ряд, полученный в шурфе, сопровождался сильным трендом, он снят в процессе обработки.

На рис. 5 приведены результаты наблюдений на оползневом участке Фасбурла (район Симеиза), которые были организованы по предложению предприятия «Крымгеология» с тем, чтобы попытаться геофизическими методами зарегистрировать процессы, предваряющие оползневые подвижки. Было решено использовать электровариометр с эквипотенциальной установкой с одной парой измерительных электродов, установленных по падению склона. Подвижки тела оползня регистрировались специалистами «Крымгеологии» с помощью тросовых реперов. Как видно из рис. 5, за сутки до активизации оползня «нормальный» временной ряд сменился мощными вариациями. Смещение уровня записи после первой подвижки вызвано, скорее всего, необратимыми изменениями в теле оползня, которые привели к искажению эквипотенциальных линий электрического поля.

**Результаты лабораторных опытов.** В настоящее время одной из важнейших проблем является мониторинг опасных геологических процессов, скрытых от прямого наблюдения. К ним в первую очередь относятся карст, суффозия и обрушение кровли заброшенных подземных горных выработок. Для этой цели в основном используют гидрогеологические и гидрометеорологические наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод, а также геодезические (в том числе, дистанционные) наблюдения за изменениями рельефа земной поверхности и деформациями зданий и сооружений [3]. Однако эти методы не дают возможности проследить процессы появления и развития закрытых подземных полостей, хотя именно такие сведения представляют наибольшую ценность с точки зрения прогноза образования провалов. Мы попытались оценить возможности АГЭМ для решения этой проблемы.



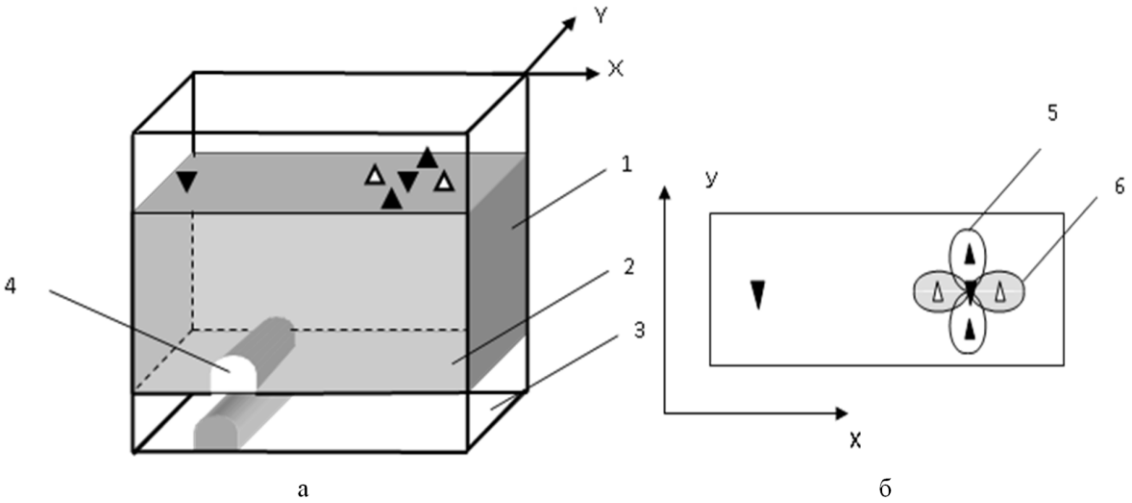

Р и с. 4. Результаты полевых экспериментов, Туркмения, симметричная установка расположена на дне шурфа глубиной 27 м, AB = 8 м, MN = 2 м. По высоте шурфа смонтировано несколько термоизоляционных перегородок. Влияние температуры, осадков исключено.
*а* – временной ряд (со снятым трендом), *б* – спектр Фурье ряда, *в* – изменение Re $U_{MN}$ после серии из 40 землетрясений от 5-го до 8-го класса, эпицентры на расстоянии 53 км от точки наблюдения, *г* – изменение Re $U_{MN}$, сопровождавшие сильные землетрясения M 6.4 и M 5.3 с эпицентральными расстояниями 411 и 444 км соответственно




Р и с. 5. Результаты полевых экспериментов, оползневой участок, Фасбурла, Крым. Электрограмма (вверху) и подвижки оползневого тела (внизу)

Опыты проводились на грунтовой модели, специально разработанной для моделирования геологических процессов, скрытых от прямого наблюдения. Внутреннее пространство рабочей камеры, размером 95×74×30 см, заполнялось влажным песком. В процессе эксперимента в дне рабочей камеры, состоящем из неподвижных элементов и выпадающих металлических пластин, открыва-

лось расширяющееся отверстие. В определенный момент происходил внутренний вывал песка в грунтоприемник и образовывалась закрытая полость обрушения. Эксперимент проводился с мощностью слоев песка 200, 400 и 600 мм. На поверхности модели, с максимальным смещением по горизонтали от зоны будущего вывала, размещалась двухкоординатная эквипотенциальная установка (рис. 6). Размеры измерительной установки AB = 64 см, $M_XN_X$ и $M_YN_Y$ равны 15-16 см. После заполнения рабочей камеры утрамбованным песком запускался процесс измерения. В течение 10–15 минут шла фоновая запись, затем дно установки начинало медленно раздвигаться. Через определенное время происходил вывал песка. При дальнейшем увеличении отверстия, как правило, происходил вторичный вывал (расширение полости).




Р и с. 6. Схема лабораторных экспериментов: *а* – грунтовая модель с измерительной установкой на поверхности, *б* – вид на модель сверху. ▼ – излучающие электроды AB; Δ – пара измерительных электродов $M_XN_X$, ориентированная по оси X; ▲ – пара измерительных электродов $M_YN_Y$, ориентированная по оси Y. 1 – рабочая камера, заполненная песком; 2 – раздвижное дно; 3 – грунтоприемник; 4 – закрытая полость; 5 – диаграмма направленности пары $M_YN_Y$; 6 – диаграмма направленности пары $M_XN_X$

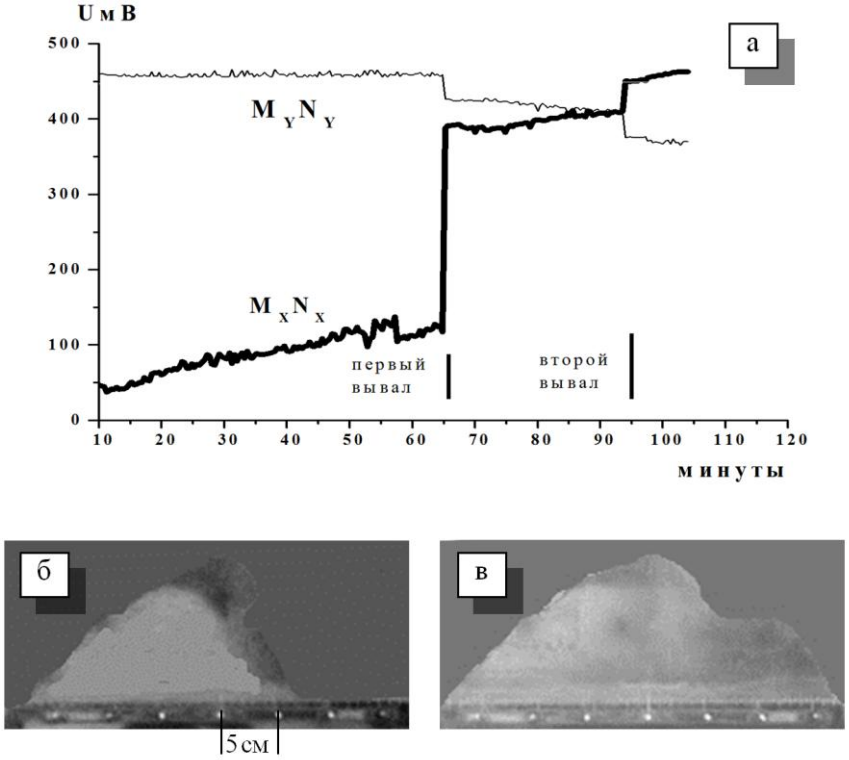
Результаты измерений регистрировались с помощью АЦП. Во всех экспериментах (всего их было не менее десяти) возникновение закрытой полости сопровождалось резкими необратимыми изменениями уровня сигналов (аналогичные изменения происходили после подвижек оползня, см. выше) на обеих измерительных электродных парах (рис. 7). Ранее геофизическими методами это явление зарегистрировать не удавалось.

Скачек на паре $M_XN_X$, как правило, значительно превышал скачек на ортогональной паре, что соответствует диаграммам направленности. Появление сигнала на паре $M_YN_Y$ вызвано неправильной формой полостей, нечетким совпадением оси полости с осью Y. Относительно высокий начальный уровень записи на паре $M_YN_Y$ вызван недостаточно точной расстановкой этих электродов на эквипотенциальной линии.

**Заключение.** Для длительных электрометрических наблюдениях в режиме непрерывного мониторинга крайне желательно использовать принципы компенсационных измерений. Электровариометр, построенный по этому принципу, доказал свою работоспособность и может использоваться с электроразведочными установками, если будут приняты дополнительные меры для подавления метеопомех. Эквипотенциальные установки различного вида также испол-

няют роль компенсаторов установочной разницы потенциалов, уменьшая ее на три порядка и более (полевые результаты). Влияние температурных изменений сопротивления приповерхностного слоя снижалось не менее, чем на два порядка, влияния осадков не ощущалось. Построение измерительного блока электровариометра по компенсационной схеме в этом случае не обязательно, что значительно упрощает прибор. Правда, если изменения среды приведут к значительным необратимым изменениям конфигурации эквипотенциалей, то понадобится измеритель – компенсатор, поскольку возрастет установочная разность потенциалов на измерительных электродах.

Остается добавить, что эти исследования требуют продолжения, поскольку остается ряд вопросов, ответить на которые можно, накапливая полевые данные. Например – какова природа суточных вариаций и пр.




Р и с. 7. Результаты лабораторных экспериментов:
*а* – регистрация моментов образования и расширения полости; *б*, *в* – фотографии полостей

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Казначеев П.А., Камшилин А.Н., Попов В.В.* Измерение локальной плотности тока в земной коре // Вестник МЭИ. – 2011. – № 5. – С. 57–63.
2. *Камшилин А.Н., Волкова Е.Н., Хоменко В.П.* Способ геоэлектроразведки // Патент РФ № 823923 А3 кл. G 01 V 3/02. – Заявл. 07.04.2010. Опубл. 10.08.2011. Бюлл. № 22. – 9 с.
3. *Инженерно-геологические* изыскания для строительства : СП 11-105-97 : свод правил по инженерным изысканиям для строительства : в 6 частях. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов / Госстрой России. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000. – 93 с.
4. *Хоменко В.П., Маханько Е.П., Исаев Е.И., Фаминцын, Рубин В.Г.* Установка для исследования суффозионной устойчивости грунтов // Патент СССР № 1823923 А3, кл. G 01 N 15/08. – Заявл. 26.06.1991. Опубл. 23.06.1993. Бюлл. № 23. – 5 с.