

УДК 550.8

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ ПРОВАЛОВ ГРУНТА

© 2013 г. Е.Н. Волкова¹, П.А. Казначеев¹, А.Н. Камшилин¹, В.В. Попов²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", г. Москва, Россия*

Рассмотрены методические основы геоэлектрического мониторинга подготовки и развития геодинамических событий. Приводятся результаты применения эквипотенциального способа измерений для изучения процессов образования закрытых подземных полостей при физическом моделировании. С учетом полученных результатов исследуется возможность разработки системы мониторинга на основе анализа вариаций линий тока.

Проведено математическое моделирование локального измерителя тока, определена зависимость измеряемого сигнала от параметров электрического поля. Выполнены лабораторные и полевые эксперименты и сравнительный анализ их результатов с данными моделирования.

Ключевые слова: геоэлектрический мониторинг, эквипотенциальные установки, измерение плотности тока, локальный измеритель тока, моделирование.

Введение

Одна из актуальных научно-технических проблем – разработка средств и способов геофизического мониторинга процессов подготовки, возникновения и развития скрытых от прямого наблюдения (закрытых) суффозионно-карстовых полостей. И в России, и за рубежом для карстологического мониторинга используется, в основном, регистрация подвижек грунта [Толмачев, Троицкий, Хоменко, 1986]. К серьезным недостаткам такого метода относятся нежелательная дискретность получаемой информации, дороговизна и технологическая громоздкость.

В настоящей статье анализируются особенности применения геоэлектрического мониторинга для решения обсуждаемой проблемы, представлен опыт регистрации подземных обрушений на лабораторной модели эквипотенциальным способом. С учетом полученных результатов исследуется способ геоэлектрического мониторинга, основанный на изучении вариаций линий тока.

Особенности геоэлектрического мониторинга

Динамика области подготовки карстового провала определяется массопереносом, образованием новых коррозионных форм, изменением анизотропии, просадками, усиленным поступлением техногенных и природных вод с различными гидродинамическими, тепловыми и вещественными показателями [Дублянская, Дублянский, 1998]. Следовательно, эта зона может рассматриваться как неоднородность с изменяющимися свойствами, в том числе и электрическими. Обсуждая возможность применения для контроля подготовки провалов активного геоэлектрического мониторинга (АГЭМ), необходимо обратить внимание на следующие обстоятельства.

Пусть источник тока через систему питающих электродов создает в среде электрическое поле с вектором напряженности E_1 . Возникновение области подготовки провала и изменение ее свойств влечет за собой пространственно-временное изменение ха-

рактера неоднородности среды. При этом в случае однородной среды формируется аномальная область, а в случае неоднородной, состоящей из отдельных областей и границ между ними, происходит изменение или свойств отдельных областей, или положения их границ, или одновременно того и другого. Во всех случаях возникает характеризующее возмущенную среду векторное поле \mathbf{E}_2 , которое отличается от первоначального на величину $\Delta\mathbf{E}$: $\Delta\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2$. Разностное поле $\Delta\mathbf{E}$ можно рассматривать как поле некоторого источника, обусловленное изменением характера неоднородности среды. Этот источник, пространственно и количественно связанный с неоднородностью и подводимой к объекту энергией, может быть определен как их мультипликативная функция.

Из сказанного следует, что методика геоэлектрического мониторинга должна обеспечивать максимальную чувствительность к разностному полю $\Delta\mathbf{E}$ при минимальной к первоначальному \mathbf{E}_1 , которое в данном случае рассматривается как помеха. Кроме этого необходимо обеспечить низкую чувствительность к различным помехообразующим факторам, изменяющим \mathbf{E}_1 скалярно, – температуре, влажности и пр. Векторное изменение первоначального поля \mathbf{E}_1 означает изменение формы его эквипотенциальных линий и пространственного распределения токов, возбуждаемых в среде источником энергии.

Таким образом, могут быть предложены два способа геоэлектрического мониторинга: первый – эквипотенциальный – предполагает контроль формы эквипотенциальных линий; второй – токовый – основан на контроле пространственного распределения токов (миграции линий тока). Каждый из способов имеет свои особенности, которые рассматриваются ниже.

Эквипотенциальный способ мониторинга

Исторически сложилось так, что из двух названных способов геоэлектрического мониторинга сначала был реализован эквипотенциальный, предполагающий размещение групп приемных электродов на одной и той же эквипотенциальной линии поля источника [Камшилин, Волкова, Кравченко, 1983]. В этом случае первоначальное поле в среде “не воспринимается” измерительной системой, благодаря чему значительно снижается влияние на результаты измерений температуры, влажности, осадков, давления – факторов, которые распределены по площади, занятой электродами, приблизительно равномерно и изменяют поле скалярно, не влияя на форму эквипотенциальных линий.

Как показали полевые наблюдения, рассматриваемый способ измерений в условиях незначительной неоднородности верхнего слоя и при тщательной расстановке пар приемных электродов позволяет уменьшить синфазную электрическую помеху не менее чем на три порядка. Влияние изменения проводимости приповерхностного слоя на измеряемую разность потенциалов вследствие изменения температуры уменьшается в 50–100 и более раз по сравнению с обычными электроразведочными установками. Непосредственное влияние осадков вообще не отмечалось [Камшилин, 1983; Волкова и др., 1998]. Высокая разрешающая способность метода позволяла регистрировать явления, предвещающие оползневые подвижки [Bogolubov, Kamshilin, Volkova, 2002], а также изменение электрических параметров среды при сейсмовибрационном воздействии [Волкова, Камшилин, 1988].

Инициатором использования эквипотенциального способа для мониторинга карстоопасных процессов был А.Н. Боголюбов (1931–1995), автор вертикального электрического зондирования методом двух составляющих [Боголюбов, Боголюбова, Мозганова, 1984], много лет отдавший изучению карстов. Его идея заключалась в том, что по результатам геологических и геофизических исследований (в том числе и ВЭЗ МДС)

выявляются карстоопасные участки, на которых затем организуется непрерывный геоэлектрический мониторинг с использованием эквипотенциальных установок.

Авторами данной статьи в лабораторных условиях была проверена возможность применения эквипотенциального способа для обнаружения закрытых обрушений грунта над подземными полостями. Для этого использовалась модель, специально созданная для изучения процессов, скрытых от прямого наблюдения [Хоменко, Маханько, Исаев, 1993], принадлежавшая предприятию ОАО «Противокарстовая и береговая защита». Рабочая камера модели, имеющая размеры $95 \times 74 \times 30$ см, полностью заполнялась влажным песком. Дно камеры состояло из неподвижных элементов и металлических пластин, позволяющих открывать постепенно расширяющееся отверстие. В некоторый момент происходил вывал песка из камеры в грунтоприемник и образовывалась закрытая (не выходящая на поверхность модели) полость обрушения. Схема рабочей камеры с размещенной на ее поверхности двухкоординатной эквипотенциальной установкой приведена слева на рис. 1: *а* – вид сверху; *б* – вид спереди; справа на рисунке представлены результаты выполненных измерений.

На поверхности модели располагались эквипотенциальные установки, в которых использовались электроды диаметром 0.5–0.7 см и длиной 6–8 см. Материал электродов не оказывал влияния на результаты эксперимента. Во всех экспериментах (всего было проведено более десяти опытов с разными вариантами установок) уверенно регистрировался момент образования полости обрушения. При этом величина отклика на образование полости могла быть разной в зависимости от влажности и состава песка.

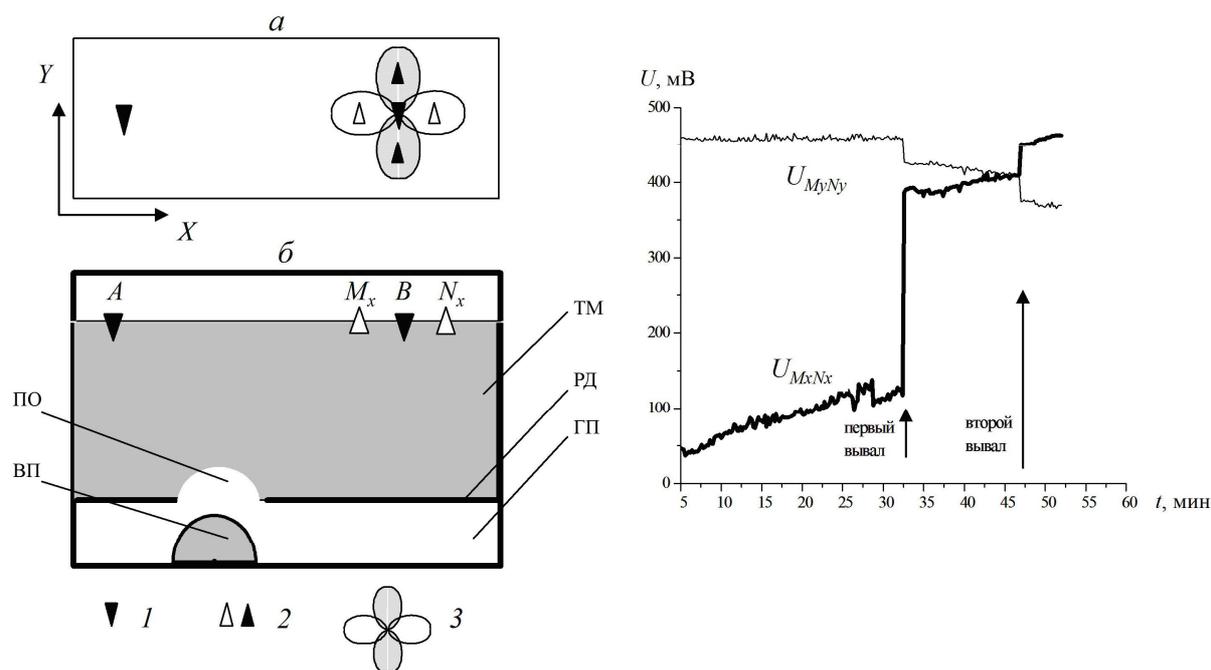


Рис. 1. Схема рабочей камеры с размещенной на ее поверхности двухкоординатной эквипотенциальной установкой (слева: *а* – вид сверху; *б* – вид спереди) и результаты выполненных измерений (справа)

1 – излучающие электроды *A*, *B*; *2* – пары приемных электродов *M*, *N*, ориентированные по разным осям: треугольники без заливки – по оси *X* (электроды $M_x N_x$), залитые треугольники – по оси *Y* (электроды $M_y N_y$); *3* – диаграмма направленности разноориентированных пар приемных электродов: без заливки – электроды $M_x N_x$; залитые – электроды $M_y N_y$. Стрелками на графиках справа отмечены моменты первого и второго вывалов; на горизонтальной оси – время от начала регистрации, мин

При открытии отверстия (см. рис. 1, б) в раздвижном дне (РД) в результате вывала песка (ВП) в грунтоприемник (ГП) в песчаном теле модели (ТМ) образуется закрытая полость обрушения (ПО). На графиках сигналов $U_{M_xN_x}$ и $U_{M_yN_y}$, зарегистрированных двумя ортогональными парами приемных электродов (рис. 1, справа), четко прослеживается процесс подготовки, возникновения (первый вывал) и расширения (второй вывал) закрытой полости.

Ортогональные пары приемных электродов должны быть максимально точно размещены на одной эквипотенциальной линии. Как правило, расстояние M_xB составляло 4–5 см, BN_x – 10–11 см, $M_yB \approx N_yB$ – 8–9 см. Расстояние от электрода B до центра полости – 70–75 см, высота полости 5–7 см. Разница начальных значений сигналов на приемных парах зависит от точности установки. Из соображений подобия лабораторной модели полевым условиям частота генератора выбрана равной 1 кГц, поскольку уменьшение геометрических размеров требует увеличения частоты генератора (при полевых испытаниях рабочие частоты составляли десятки герц).

Измеряемые разности потенциалов между электродами M_x и N_x ($U_{M_xN_x}$) и между M_y и N_y ($U_{M_yN_y}$) усиливались и затем регистрировались с помощью АЦП. В момент образования полости обрушения происходит скачкообразное изменение сигналов, регистрируемое обеими приемными установками. При этом изменение $U_{M_xN_x}$ больше изменения $U_{M_yN_y}$, что согласуется с диаграммой направленности приемных пар (под диаграммой направленности приемной пары понимается зависимость величины $U_{M_xN_x}$ или $U_{M_yN_y}$ от направления на образующуюся полость).

Таким образом, внутренний вывал грунта сопровождается резким необратимым изменением формы эквипотенциальных линий. Использование двух ортогональных пар приемных электродов позволяет осуществлять локацию полости. Природа предшествующего вывалам положительного тренда до конца не выяснена – возможно, он обусловлен деформацией поверхности модели, возникающей при расширении щели в раздвижном дне [Хоменко и др., 2007].

Большее по сравнению с фоном изменение $U_{M_xN_x}$ при первом вывале еще раз показывает, что основная особенность эквипотенциальной установки – малый исходный фон $U_{M_xN_x}$ и большое соотношение сигнал/помеха, хотя по абсолютной величине изменения относительно невелики и составляют десятки–первые сотни милливольт.

Итак, результаты полевых [Волкова, Камшилин, 1988] и лабораторных исследований показали, что эквипотенциальный способ позволяет уверенно регистрировать разностное поле ΔE , обусловленное возникновением и развитием неоднородностей в среде. Поскольку, как уже говорилось, изменение формы эквипотенциалей связано с миграцией токовых линий, то принципиально возможна реализация и второго способа геоэлектрического мониторинга – токового.

Токовый способ мониторинга

Информативный параметр при реализации токового способа геоэлектрического мониторинга – плотность тока. Для измерений авторы использовали локальный измеритель тока (ЛИТ), основным элементом которого является датчик тока. Проанализировав существующие сегодня способы измерения тока, авторы остановили свой выбор на датчике трансформаторного типа, пригодном для измерения малых токов в проводящих средах [Зимин, Кочанов, 1985].

Авторы обратились к рассматриваемому способу мониторинга по следующим причинам. ЛИТ – бесконтактный измерительный прибор, использование которого исключает влияние на результаты измерений приэлектродных эффектов. Конструкция этого прибора позволяет производить первичную обработку полезного сигнала (филь-

рацию, усиление, подавление помех) непосредственно в точке его установки до передачи на регистрирующее устройство, что крайне важно при измерении малых сигналов.

К токовому способу мониторинга при разработке его методики предъявлялись те же требования, что и к описанному выше эквипотенциальному: должна обеспечиваться наибольшая чувствительность к вариациям, обусловленным появлением и развитием неоднородностей, и максимально подавляться влияние помех общего вида (температуры, осадков и пр.). Этого можно добиться путем дифференциального подключения двух и более приборов.

Общий вид одного из использованных при лабораторных и полевых экспериментах приборов ЛИТ представлен на рис. 2.

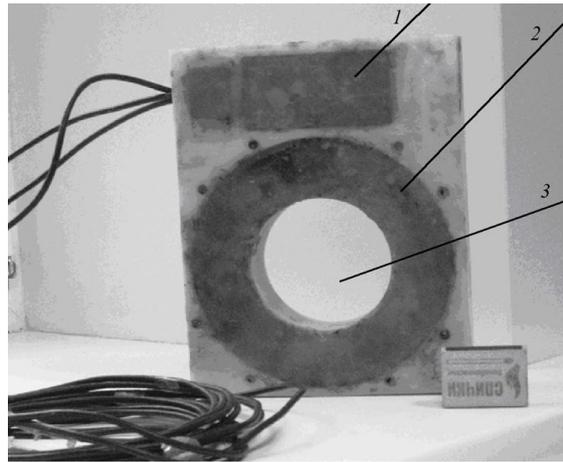


Рис. 2. Общий вид локального измерителя тока (ЛИТ)

1 – электронный блок; 2 – магнитопровод с обмоткой; 3 – измерительное окно

Корпус прибора выполнен из диэлектрического материала, его размеры – 260×180×50 мм. Внутри корпуса размещены изолированные от внешней среды предназначенный для первичной обработки сигнала электронный блок (1) и магнитопровод трансформатора тока с вторичной обмоткой (2). Первичная обмотка трансформатора тока – объемный виток проводящей среды, заполняющей измерительное окно (3), который образуется при погружении прибора в среду. Характеристики электронной части прибора ЛИТ см. в [Казначеев, Камшилин, Попов, 2011].

Моделирование локального измерителя тока

Локальный измеритель тока (ЛИТ), помещенный в проводящую среду, искажает существующее в ней электрическое поле. Точный аналитический расчет поля в присутствии тела сложной формы, каким является прибор, невозможен. Поэтому для оценки его влияния на первоначальное поле в среде было проведено математическое моделирование с использованием программы *Femlab*.

Расчет и анализ распределения низкочастотного электрического поля в проводящей среде в масштабах установки АГЭМ (в нашем случае частота генератора – 73 Гц, расстояние между питающими электродами – 100 м) можно проводить в квазистатическом приближении, т.е. так же, как и при расчете поля постоянных токов. В этом случае распределение поля определяется удельной проводимостью геологических объектов в поверхностном слое земной коры. Поскольку корпус прибора, как уже отмечалось выше, изготовлен из диэлектрического материала, ток протекает только через его измерительное окно, заполненное проводящей средой.

Для поля постоянных токов с учетом поля в непроводящих областях можно записать следующую систему уравнений (в системе СИ):

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{J} = 0, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = q_v, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}; \quad (1a)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (1б)$$

которая вытекает из системы уравнений Максвелла, дополненной материальными уравнениями. В приведенных уравнениях \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля; \mathbf{D} – вектор электрического смещения; \mathbf{J} – вектор плотности тока проводимости; σ – удельная электрическая проводимость; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); q_v – объемная плотность электрических зарядов; \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля; \mathbf{B} – вектор магнитной индукции; μ – относительная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Отметим, что в решаемой задаче анализируется только электрическое поле, описываемое уравнениями (1a); магнитное поле по (1б) не рассматривается.

Математическое моделирование сводится к численному решению вариационной задачи широко используемым на практике методом конечных элементов (МКЭ) [Демирчян, Чечурин, 1986; Демирчян и др., 2003; Вишняков, Гордюхина, Федорова, 2003]. Вариационная задача – это нахождение функции, минимизирующей функционал, значение которого пропорционально запасенной в пространстве энергии поля. Для поля постоянных токов функционал имеет вид

$$W_3 = \frac{1}{2} \int \sigma (\operatorname{grad} \varphi)^2 dv; \quad (2)$$

минимизирующая его функция – это потенциал $\varphi = \varphi(x, y, z)$.

Моделирование выполнялось для ЛИТ, помещенного в однородное изотропное пространство в исходно однородном электрическом поле. Электронная схема прибора измеряла протекающий через измерительное окно ток (см. рис. 2), по величине которого восстанавливалась плотность тока исходного электрического поля при заданных электрических параметрах среды и корпуса ЛИТ, форме и размерах используемого прибора. По аналогии с кажущимся электрическим сопротивлением в электродных установках, восстанавливаемую плотность тока можно назвать кажущейся, поскольку в общем случае реальная среда и электрическое поле неоднородны.

Были определены основные, соответствующие выражениям (1a), (2) дифференциальные уравнения, описывающие электрическое поле, и заданы геометрические параметры модели, а также электрические параметры вмещающей среды и корпуса ЛИТ: удельная проводимость σ (для вмещающей среды $\sigma = 0.1$ См/м, для корпуса ЛИТ $\sigma = 0$) и диэлектрическая проницаемость ε (для вмещающей среды $\varepsilon = 4$, для корпуса ЛИТ $\varepsilon = 2.9$).

После этого были заданы граничные условия внутри моделируемой области между проводящими и непроводящими областями. Для задания однородного электрического поля постоянных токов были введены граничные условия – значения пространственных компонент вектора плотности тока на границах моделируемой области: $J_x = 1$ А/м², $J_y = 2$ А/м², $J_z = 3$ А/м² (положение осей X, Y, Z см. на рис. 3, а). Более подробно методика моделирования описана в [Казначеев, Камшилин, Попов, 2011].

В результате было получено распределение плотности тока на отрезке PP' , принадлежащем плоскости Q , которая пересекает ЛИТ пополам (рис. 3). Уровень J_x по краям справа и слева на графике в точках P и P' (рис. 3, а) соответствует значению плотности тока в среде вдали от ЛИТ (1 А/м²); “провалы” плотности тока до 0 – непроводящему корпусу прибора. Центральная часть графика соответствует проводящей области внутри измерительного окна. Можно видеть, что значения J_x в ней в 1.8–2 раза превышают значения J_x вдали от ЛИТ и характеризуются неоднородным распределением.

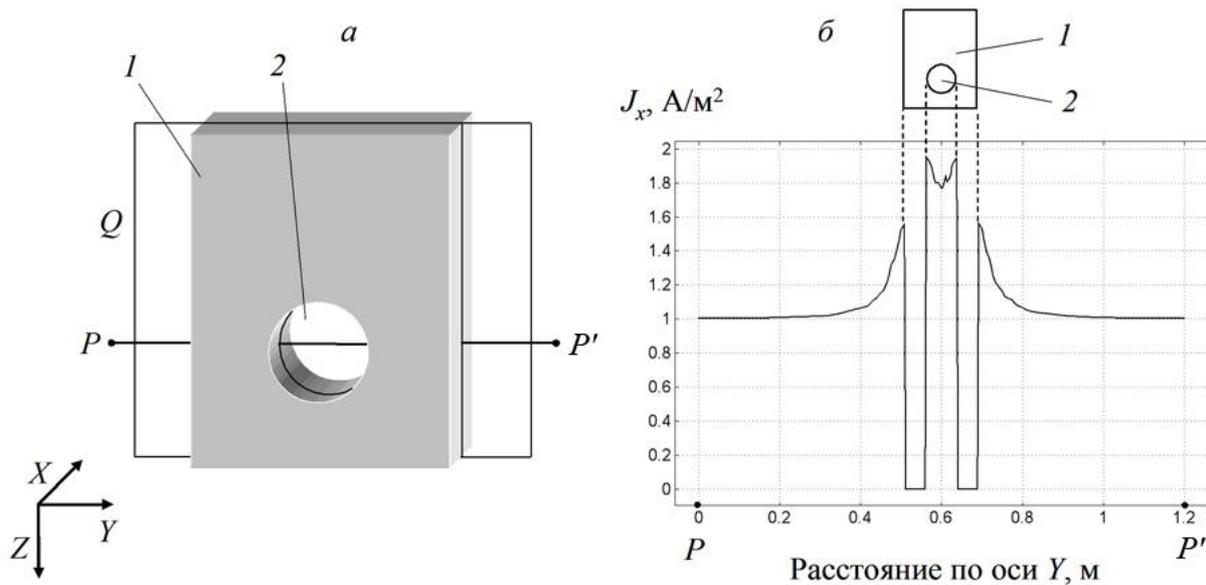


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая положение отрезка PP' , на котором определяется распределение плотности тока, (а) и графики распределение J_x на нем, построенные по результатам моделирования (б). 1 – корпус ЛИТ, 2 – измерительное окно; Q – плоскость, рассекающая корпус ЛИТ пополам, в которой лежит отрезок PP'

Средняя плотность тока в окне превышает значение J_x в среде в 1.90 раз. Эту величину можно назвать коэффициентом концентрации тока $K_{\text{конц}}$, значение которого, как показали результаты моделирования, зависит только от формы и размеров ЛИТ.

Аналогичная процедура была проделана для ЛИТ другой формы с размерами $115 \times 100 \times 70$ мм и диаметром измерительного окна 40 мм; в этом случае $K_{\text{конц}} = 1.36$.

Следующим шагом был анализ влияния J_y и J_z на величину тока, протекающего через измерительное окно ЛИТ ($I_{\text{ЛИТ}}$). Для этого при постоянной величине J_x в среде варьировались величины J_y и J_z и определялось распределение J_x в окне ЛИТ. Результаты моделирования показали, что ток $I_{\text{ЛИТ}}$ зависит только от величины J_x в среде и не зависит от величин J_y и J_z и, следовательно, для него можно записать следующее выражение:

$$I_{\text{ЛИТ}} = K_{\text{конц}} J_{\perp} S_{\text{ок}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{конц}}$ – коэффициент концентрации тока; $S_{\text{ок}}$ – площадь измерительного окна ЛИТ; J_{\perp} – составляющая вектора плотности тока, перпендикулярная сечению измерительного окна (в рассмотренной выше задаче это составляющая J_x).

При измерении плотности тока в комплексе АГЭМ измеритель тока ЛИТ находится вблизи границы полупространства, что делает необходимым уточнение влияния границы раздела земля–воздух. Было проведено моделирование для однородного проводящего полупространства при различной глубине погружения прибора, соответствующей расстоянию от границы раздела до ближней к ней грани ЛИТ. В полупространстве задавалось однородное электрическое поле постоянных токов, имеющее только две компоненты – J_x и J_y .

Результаты выполненного моделирования позволяют сделать вывод, что при глубине погружения, равной высоте ЛИТ (его линейному размеру по оси Z), близость границы раздела сред сказывается незначительно; при этом погрешность вычислений по формуле (3) не превышает 1%.

Выражение (3) позволяет вычислить величину J_{\perp} , соответствующую однородному полю вблизи прибора, по формуле, которая справедлива для любого варианта ЛИТ:

$$J_{\perp} = \frac{I_{\text{ЛИТ}}}{K_{\text{конц}} S_{\text{ок}}} \quad (4)$$

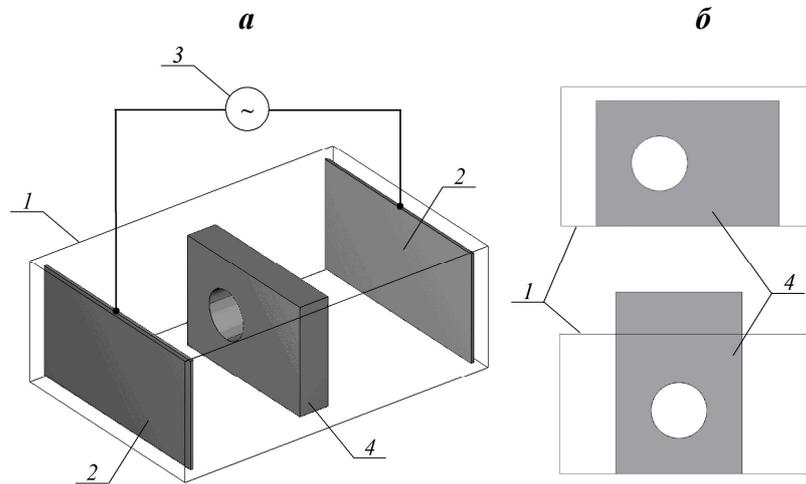
Входящая в выражение (4) площадь измерительного окна $S_{\text{ок}}$ может быть измерена, а коэффициент концентрации тока $K_{\text{конц}}$ при заданной форме и размерах ЛИТ можно определить при моделировании.

Экспериментальная проверка методики математического моделирования

Методика моделирования проверялась лабораторным экспериментом, результаты которого сопоставлялись с результатами компьютерного моделирования аналогичной задачи. Схема эксперимента показана на рис. 4, а.

Контейнер 1 с непроводящими стенками (на рисунке показаны только ребра контейнера), имеющий размеры 540×360×200 мм, был до краев заполнен электропроводящим материалом (землей). Вплотную к торцам контейнера были установлены тонкие металлические пластины-электроды 2, занимающие практически всю их площадь. Электроды соединялись с генератором синусоидального напряжения низкой частоты 3. Посередине между электродами параллельно им был размещен ЛИТ 4.

Рис. 4. Схема эксперимента для проверки методики моделирования (а) и два варианта расположения ЛИТ (б: вверху – горизонтальное, внизу – вертикальное). Пояснения см. в тексте



Рассматривались два возможных положения ЛИТ в среде – горизонтальное и вертикальное (рис. 4, б). В первом случае к дну контейнера прилегал длинная сторона полностью покрытого землей корпуса прибора; во втором измеритель прилегал к дну контейнера короткой стороной корпуса и был покрыт землей до некоторого уровня. В обоих случаях измерительное окно прибора было заполнено землей.

Проводимость материала, из которого изготовлены электроды, значительно превышает проводимость земли, и, следовательно, неоднородностью распределения поля, связанной с неравномерностью растекания тока по самим электродам, можно пренебречь, а электроды считать эквипотенциальными поверхностями. Поэтому при моделировании эти электроды можно не учитывать и задавать эквивалентные граничные условия для контейнера, что существенно упрощает моделирование.

При экспериментах измерялась величина выходного полезного сигнала ЛИТ ($U_{\text{ЛИТ}}$). Затем по передаточной характеристике ЛИТ определялся протекающий через измерительное окно ток $I_{\text{ЛИТ}}$. Одновременно измерялся ток генератора I_{Γ} (весь ток, протекающий через контейнер) и определялась доля, которую от него составляет ток $I_{\text{ЛИТ}}$. Эксперименты показали, что при горизонтальном положении прибора $I_{\text{ЛИТ}} = 0.25I_{\Gamma}$, при вертикальном – $I_{\text{ЛИТ}} = 0.175I_{\Gamma}$. По результатам компьютерного моделирования $I_{\text{ЛИТ}} = 0.251I_{\Gamma}$ для горизонтального положения измерителя и $I_{\text{ЛИТ}} = 0.183I_{\Gamma}$

для вертикального, т.е. можно говорить о достаточно хорошем совпадении результатов моделирования и эксперимента.

Следовательно, методика моделирования верна и может быть использована как для разработки измерительных устройств на основе локальных измерителей тока, так и для анализа результатов измерений.

Геоэлектрический мониторинг с использованием локальных измерителей тока. Полевые эксперименты

Возможность отслеживания образования структурных неоднородностей и изменения их свойств с использованием локальных измерителей тока проверялась в ходе полевых экспериментов. Главная цель экспериментов – качественно показать, что изменение структуры геоэлектрического разреза приводит к изменению тока, измеряемого ЛИТ. Для этого был создан комплекс аппаратных и информационных средств АГЭМ (рис. 5). Генерирующая часть комплекса включает генератор импульсов тока и блок питания генератора. Измерительная часть состоит из двух измерительных каналов, датчика тока генератора, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и компьютера оператора. Каждый измерительный канал содержит локальный измеритель тока (ЛИТ) и блок согласования сигнала с АЦП. Кроме этого в состав комплекса входит блок питания для устройств измерительной части.

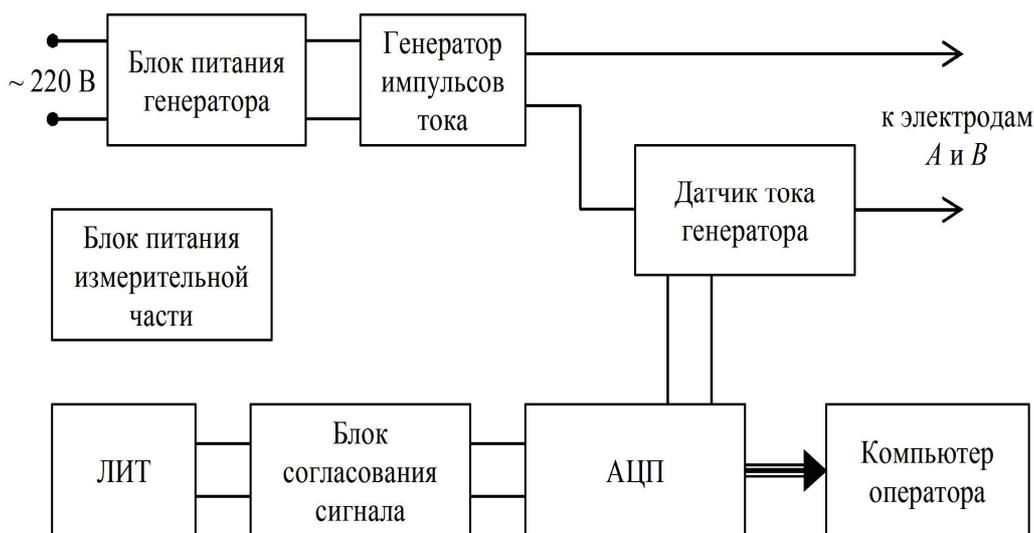


Рис. 5. Блок-схема аппаратных средств комплекса АГЭМ. Пояснения см. в тексте

Полевой эксперимент состоял в наблюдении за изменениями измеряемых величин до, во время и после создания искусственной структурной неоднородности при определенной схеме установки. Соответственно, его методика включала расчет исходной схемы установки (без неоднородности); экспериментальное определение чувствительности и помех в измерительной части комплекса в полевых условиях; определение параметров неоднородности, уверенно регистрируемой комплексом; определение требуемого режима работы комплекса. Часть названных задач будет подробно рассмотрена ниже.

Общая схема полевых экспериментов, проводимых для двух вариантов установки, представлена на рис. 6. В ходе эксперимента искусственно создавалась структурная неоднородность – выкапывался шурф (3), имеющий форму параллелепипеда длиной $L_{ш}$ (размер по оси X), шириной $W_{ш}$ (размер по оси Y , на рис. 6 не обозначен) и глубиной $H_{ш}$ (размер по оси Z).

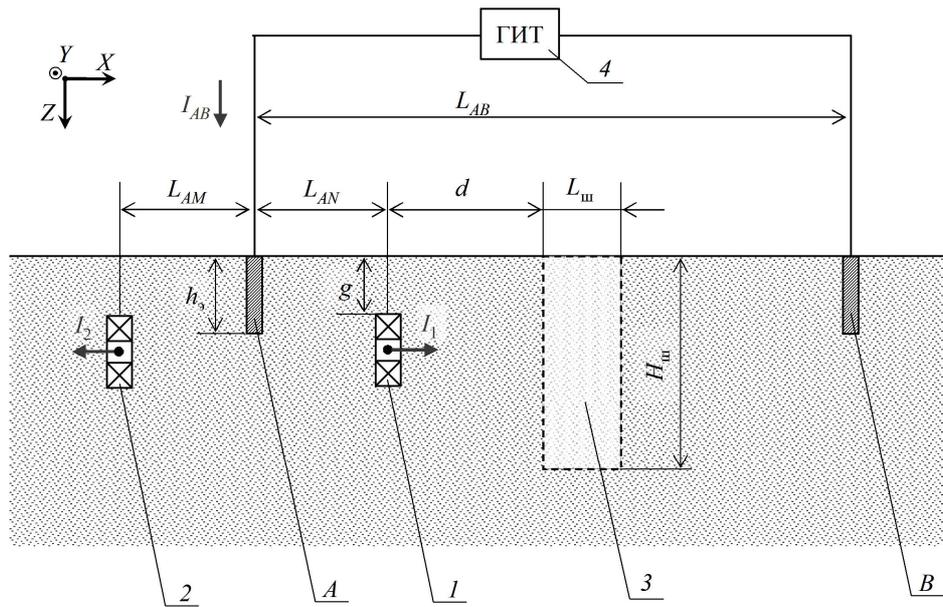


Рис. 6. Схема полевых экспериментов. 1 – ЛИТ1; 2 – ЛИТ2; 3 – шурф; 4 – генератор импульсов тока; А и В – излучающие электроды. Другие обозначения см. в тексте

Предварительно была рассчитана схема установки (без учета шурфа). Измеряемыми величинами являются J_{x1} и J_{x2} . В эксперименте J_x соответствует составляющей вектора плотности тока J_{\perp} , перпендикулярной сечению измерительного отверстия ЛИТ. При расчете была определена зависимость величин J_{x1} и J_{x2} от g , L_{AN} и L_{AM} при условиях, что влиянием второго электрода В можно пренебречь, среду можно считать однородной, электрическое поле создается точечным источником тока в точке А величиной I_{AB} . Затем с учетом коэффициента концентрации тока для ЛИТ по (3) в предположении, что неоднородностью поля в окрестности ЛИТ можно пренебречь, были определены значения токов I_1 и I_2 , протекающих через измерительные окна приборов. По известным коэффициентам передачи были определены выходные сигналы ЛИТ U_1 и U_2 . Из условия, что величина полезного сигнала в U_1 и U_2 должна быть больше величины помехи, рассчитывалась схема установки и определялись величины g , L_{AN} и L_{AM} при заданном токе генератора 0.127 А.

После этого было выполнено математическое моделирование рассчитанной схемы установки, которое, во-первых, подтвердило верность теоретического расчета, а во-вторых, позволило определить размеры и положение шурфа, появление которого можно надежно зарегистрировать по изменению измеряемых величин. Моделирование проводилось для случая однородного проводящего полупространства, в котором появляется непроводящая неоднородность (шурф) такой же формы и размеров, что и в полевом эксперименте. Эту модель можно рассматривать как первое приближение к полевому эксперименту, что позволяет количественно сопоставлять результаты моделирования и полевого эксперимента. При моделировании учитывалось влияние электрода В и неоднородность распределения поля вблизи ЛИТ. Было получено распределение плотности тока вблизи ЛИТ и в его измерительном окне; токи I_1 и I_2 определялись интегрированием по площади сечения окна. Затем по (4) были найдены J_{x1} и J_{x2} однородного поля около ЛИТ.

В ходе полевых экспериментов измерялась величина выходного сигнала ЛИТ и восстанавливались сигналы на его входе. При этом учитывалась погрешность для I_1 и I_2 , определяемая величиной помехи на выходе измерительного канала в полевых условиях.

В первом эксперименте был задействован один прибор ЛИТ1; схема установки имела следующие параметры: $I_{AB} = 0.127$ А, $L_{AB} = 13$ м, $h_3 = 0.275$ м, $g = 0.2$ м, $L_{AN} = 1$ м, $d = 0.15$ м. Во время эксперимента был выкопан шурф в виде параллелепипеда размерами ($X \times Y \times Z$): $L_{ш} = 0.25$ м, $W_{ш} = 1$ м, $H_{ш} = 0.45$ м. Шурф выкапывался послойно – мощность слоя 15–30 см. Чувствительность ЛИТ1: коэффициент передачи электрической части U_1/I_1 на рабочей частоте 73 Гц равен 92 В/А, соотношение U_1/J_{x1} составило 0.157 В/(А/м²).

Результаты определения I_1 до выкапывания шурфа представлены в табл. 1. Для удобства приведены следующие величины: ток I_1 , протекающий через измерительное окно ЛИТ1; отношение I_1 к току I_{AB} ; плотность тока J_{x1} , соответствующая однородному полю около ЛИТ1. Абсолютная погрешность для I_1 , определяемая величиной помехи на выходе измерительного канала, в полевых условиях составляла 0.23 мкА.

Таблица 1. Первый полевой эксперимент. Искомые величины до выкапывания шурфа ($I_{AB} = 0.127$ А)

	Теоретическая оценка	Моделирование	Полевой эксперимент
I_1 , мкА	32.6	31.5	10.8±0.23
доля тока, I_1 / I_{AB}	$2.57 \cdot 10^{-4}$	$2.48 \cdot 10^{-4}$	$0.85 \cdot 10^{-4}$
J_{x1} , мА/м ²	19.1	18.4	6.3

Анализ табл. 1 позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, оценка, полученная по результатам моделирования, ненамного отличается от теоретической оценки – разница составляет около 3.5%. Это говорит о том, что допущения, принятые при теоретическом расчете, позволяют получить оценку измеряемых величин с погрешностью порядка 3.5%, что приемлемо для первоначального определения параметров установки. Во-вторых, в полевом эксперименте величина тока I_1 оказалась примерно в 3 раза меньше величины I_1 по результатам теоретического расчета и математического моделирования. Это связано с тем, что при теоретической оценке и моделировании не учитывалась неоднородность среды. В то же время порядок величин одинаковый и расчетной чувствительности измерительной части достаточно для измерения I_1 и J_{x1} с относительной погрешностью порядка 2% – по данным табл. 1 видно, что абсолютная погрешность составляет 0.23 мкА для I_1 .

Результаты определения величины I_1 после выкапывания шурфа приведены в табл. 2. Сравнение результатов моделирования и эксперимента показывает, что, несмотря на разную величину тока I_1 , при появлении шурфа кратность уменьшения тока оказалась сопоставимой (в 2.18 и 2.31 раза соответственно). Данное обстоятельство позволяет предположить, что выкопанный в полевом эксперименте шурф повлиял

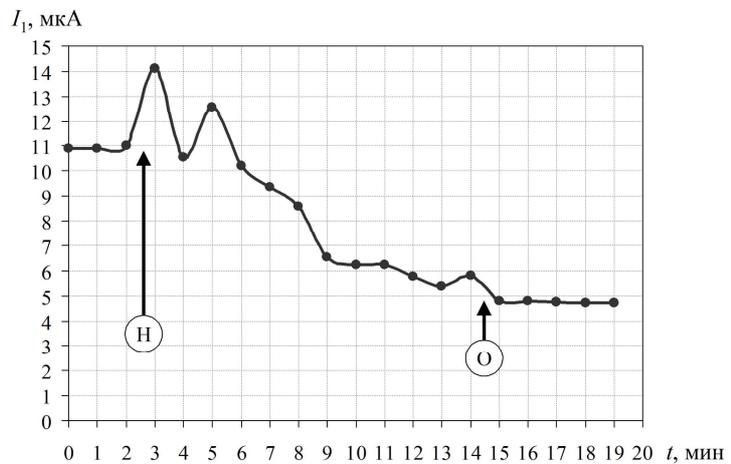
Таблица 2. Первый полевой эксперимент. Сравнение искомых величин до и после выкапывания шурфа

		I_1 , мкА	J_{x1} , мА/м ²
Математическое моделирование	Шурфа нет	31.5	18.4
	Шурф есть	14.4	8.43
Полевой эксперимент	Шурфа нет	10.8	6.32
	Шурф есть	4.7	2.75

на распределение поля таким образом, что измеряемый ток I_1 уменьшился так же, как и в случае однородной среды. Изменение I_1 в ходе выкапывания шурфа составило 6.1 мкА, что почти в 30 раз больше погрешности I_1 , и уверенно регистрируется измерительной аппаратурой.

Записанный непосредственно в процессе выкапывания шурфа ход изменения I_1 представлен на рис. 7. Начало выкапывания шурфа обозначено стрелкой Н, окончание – стрелкой О. Визуально можно выделить основной тренд графика – уменьшение величины I_1 на интервале между этими отметками, соответствующем процессу выкапывания шурфа. Отклонение некоторых значений от основного тренда графика обусловлено достаточно малым размером окна осреднения данных (в данном случае – 11 с) и влиянием помех в процессе выкапывания шурфа. Видно, что наибольшая скорость уменьшения тока наблюдается в середине процесса выкапывания шурфа.

Рис. 7. Первый полевой эксперимент. График изменения I_1 при выкапывании шурфа. Стрелкой Н отмечено начало выкапывания шурфа; стрелкой О – окончание; на горизонтальной оси – время от начала регистрации, мин



Во втором полевом эксперименте появилась возможность увеличить чувствительность ЛИТ и размеры установки L_{AM} и L_{AN} , так как помехи в поле оказались ниже помех при лабораторных испытаниях. Схема установки имела следующие параметры: $I_{AB} = 0.127$ А, $L_{AB} = 12$ м, $h_3 = 0.275$ м, было задействовано два ЛИТ, $g = 0.5$ м, $L_{AN} = L_{AM} = 2$ м, $d = 1$ м, $L_{ш} = 0.4$ м, $H_{ш} = 0.9$ м, $W_{ш} = 2$ м. Чувствительность измерительной части: коэффициент передачи электрической части на рабочей частоте 73 Гц для ЛИТ1 составил $U_1/I_1 = 2283$ В/А, для ЛИТ2 – $U_2/I_2 = 2255$ В/А. Соотношение $U_1/J_{x1} = 3.91$ В/(А/м²), $U_2/J_{x2} = 21.55$ В/(А/м²). Разные значения последних соотношений связаны с тем, что ЛИТ1 и ЛИТ2 несколько различаются по форме и размерам. Производилась непрерывная запись данных во время выкапывания шурфа и его последующего заполнения водой.

На рис. 8 показаны графики изменения глубины шурфа $H_{ш}$ (1) и величины ΔJ (2) при выкапывании шурфа, которая определяется как разность $|J_{x2}| - |J_{x1}|$. Начало выкапывания шурфа около 12:00 отмечено стрелкой (Н). Стрелкой (П) отмечен момент приостановки выкапывания, стрелкой (В) – его возобновление. Окончание выкапывания шурфа около 19:30 отмечено стрелкой (О).

На отрезке времени от 00:00 до 09:00, когда шурфа еще не было, можно видеть незначительные колебания ΔJ около постоянного уровня. Затем около 09:00 начинается увеличение ΔJ с последующим спадом до некоторого стабильного уровня вблизи 11:30. В это время шурфа по-прежнему нет, в связи с чем отмеченные изменения могут быть объяснены воздействием помехи неустановленной природы.

С 11:00 до 14:30 сохраняется некоторый стабильный уровень; в это же время начинается выкапывание шурфа. Измерительная система не реагирует на изменение глубины шурфа, так как она невелика и связанное с появлением непроводящей области перераспределение тока происходит пока только в верхних слоях разреза.

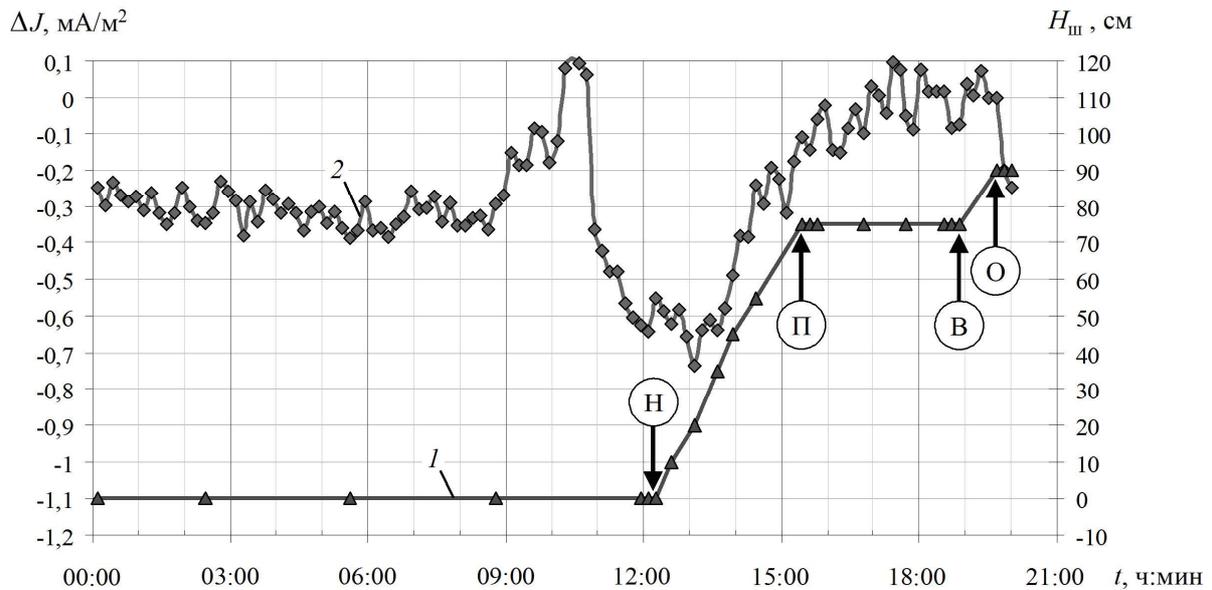


Рис. 8. Второй полевой эксперимент. Выкапывание шурфа. График 1 – изменение глубины шурфа ($H_{ш}$, см); график 2 – изменение величины ΔJ , mA/m^2 . Стрелками отмечены моменты начала (Н), приостановки (П), возобновления (В) и окончания (О) выкапывания шурфа; на горизонтальной оси – время проведения эксперимента, t , ч:мин

В 14:30 отмечается рост ΔJ – шурф начинает влиять на распределение тока вблизи ЛИТ1. Уменьшается величина J_{x1} около ЛИТ1, который находится ближе к шурфу, чем ЛИТ2, возле которого J_{x2} около изменяется незначительно. Во время паузы в выкапывании шурфа значение ΔJ стабилизируется на некотором уровне; дальнейшее углубление шурфа уже не оказывает существенного влияния на ΔJ .

Дальнейшие наблюдения проводились во время заполнения шурфа водой. По техническим причинам использовался только ЛИТ1. На рис. 9 показаны графики уровня воды в шурфе относительно уровня земли h_b (график 1) и изменения величины J_{x1} (график 2) при затоплении шурфа. Затопление шурфа было начато около 13:30 (на графике этот момент отмечен стрелкой Н) и закончено примерно в 15:30 (стрелка О).

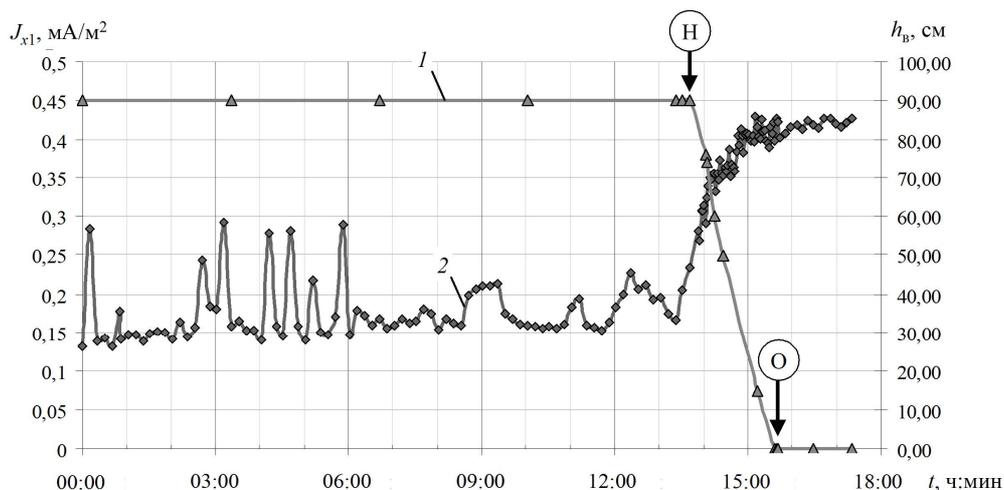


Рис. 9. Второй полевой эксперимент. Затопление шурфа. График 1 – изменение уровня воды относительно уровня земли (h_b , см); график 2 – изменение J_{x1} , mA/m^2 . Стрелками отмечены моменты начала (Н) и окончания (О) затопления шурфа; на горизонтальной оси – время проведения эксперимента, t , ч:мин

На графике 2 можно видеть, что до начала затопления шурфа J_{x1} незначительно колеблется около постоянного уровня. Сильные единичные “всплески” на этом этапе могут быть объяснены воздействием помех. Начало затопления шурфа измерительная система регистрирует сразу же: сначала происходит резкое увеличение J_{x1} приблизительно до момента, когда шурф заполнится наполовину, а затем отмечается замедление роста J_{x1} до конца затопления.

Такой характер изменения J_{x1} можно объяснить перераспределением тока (миграцией токовых линий), связанным с изменением проводимости шурфа при поступлении воды. При этом увеличивается плотность тока между шурфом и излучающим электродом A . После окончания затопления шурфа J_{x1} стабилизируется на некотором уровне.

Полевые эксперименты с ЛИТ показали, что образование структурной неоднородности или изменение ее свойств приводит к изменению уровня измеряемого сигнала. Характер изменения сигнала качественно и количественно (по порядку величины) совпадает с ожидаемым. Дальнейшие исследования с расширением инструментально-методической базы позволят более подробно изучить возможности и особенности токового способа геоэлектрического мониторинга, в том числе вопрос влияния различных помех.

Заключение

В настоящее время не существует карстологического геофизического мониторинга, необходимость которого очевидна. Поэтому авторы начали исследование возможности применения эквипотенциальных геоэлектрических установок для изучения процессов образования закрытых полостей.

Положительные результаты экспериментов на лабораторной модели определили второе направление, связанное с изучением миграции токовых линий. Основанием для этого послужило то обстоятельство, что векторные изменения электрического поля, происходящие при образовании и развитии структурных неоднородностей, проявляются в изменении картины как эквипотенциальных, так и токовых линий. Это дает возможность контролировать один и тот же процесс с разных сторон. Кроме того, очень важно, что использование ЛИТ для изучения миграции токовых линий позволяет значительно повысить помехозащищенность измерительной системы.

На первом этапе работы токовым способом мониторинга большое внимание уделялось изучению ЛИТ. На основе математического моделирования была разработана методика исследования ЛИТ как измерительного геофизического прибора; изучалось влияние формы и размеров ЛИТ на измеряемую величину. Корректность методики математического моделирования ЛИТ подтверждена результатами проведенных независимых лабораторных физических экспериментов.

Следующим этапом стало исследование возможности применения ЛИТ в системе геоэлектрического мониторинга. Для этого был разработан и создан комплекс аппаратных и информационных средств АГЭМ с использованием ЛИТ, с применением которого были проведены полевые эксперименты. Результаты экспериментов показали принципиальную возможность токового мониторинга процесса образования структурной неоднородности и изменения ее свойств. Кроме того эти результаты согласуются с результатами, полученными на лабораторной модели с помощью двухкоординатной эквипотенциальной электродной установки при образовании закрытой полости: в обоих случаях появление неоднородности сопровождалось необратимым изменением уровня сигнала – межэлектродной разности потенциалов в первом случае и плотности тока во втором. Из этого следует, что возникновение и развитие неоднородности вызывает пространственное перераспределение токов растекания излучающего электрода

(миграцию токовых линий), что, в свою очередь, приводит к изменению формы эквипотенциальных линий.

Отметим, что пробные полевые эксперименты с ЛИТ проводились в “щадящем режиме” – малые разности установки, близость ЛИТ к шурфу. Это обусловлено рядом не зависящих от нас обстоятельств – высоким уровнем сторонних помех, недостаточно высокой чувствительностью ЛИТ, невозможностью увеличения разностей. Повышение помехозащищенности и чувствительности аппаратуры – это технические проблемы, которые решаются авторами в настоящий момент; в частности, до 20000 В/А поднят коэффициент передачи электрической части ЛИТ, что не является пределом.

Весь комплекс выполненных работ показал принципиальную возможность регистрации интересующих нас процессов с помощью активного геоэлектрического мониторинга, основанного на измерении вариаций плотности тока излучающего генератора.

Авторами статьи в 2011 г. получен патент РФ на изобретение [Волкова и др., 2011].

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.В. Толмачеву, М.В. Леоненко, Б.А. Гантову за помощь при проведении экспериментальных работ и плодотворное обсуждение полученных результатов.

Литература

- Боголюбов А.Н., Боголюбова Н.П., Мозганова Е.А. Руководство по интерпретации кривых ВЭЗ МДС. М.: Стройиздат, 1984. 200 с.
- Волкова Е.Н., Камшилин А.Н. Возбуждение геоэлектрических колебаний и изменение проводимости земли под действием вибрационного источника // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 4. С.816–818.
- Волкова Е.Н., Камшилин А.Н., Александров С.И., Эфендиев М.И. Геоэлектрический мониторинг // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 2 / Под ред. Н.П. Лаверова и др. М.: Научный мир, 1998. С.168–174.
- Волкова Е.Н., Камшилин А.Н., Казначеев П.А., Попов В.В. Устройство для измерения компонент вектора плотности тока в проводящих средах: Патент на изобретение по заявке № 2011149339/28(074027). Приоритет от 05.12.2011.
- Вишняков С.М., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 100 с.
- Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. М.: Высшая школа, 1986. 240 с.
- Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3 т. 4-е изд., доп. СПб.: Питер, 2003. Т. 3. 377 с.
- Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Теоретические основы изучения парагенезиса карст-подтопление. Пермь: Пермский университет, 1998. 204 с.
- Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
- Казначеев П.А., Камшилин А.Н., Попов В.В. Измерение локальной плотности тока в земной коре // Вестник МЭИ. 2011. № 5. С.57–63.
- Камшилин А.Н. Метод изучения электрического коэффициента передачи горных пород применительно к задачам геодинамики: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1983. 117 с.
- Камшилин А.Н., Волкова Е.Н., Кравченко В.Б. Способ измерения временных вариаций удельного сопротивления земли: Авт. свид. СССР № 1048439. Бюл. № 38. Оpubл. 15.10.1983.
- Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.

- Хоменко В.П., Камшилин А.Н., Кузичкин О.Р., Волкова Е.Н. Возможности регистрации подземных обрушений грунтов с помощью активного геоэлектрического мониторинга // Промышленное и гражданское, строительство. 2007. № 11. С.12–15.
- Хоменко В.П., Маханько Е.П., Исаев Е.И. Установка для исследования суффозионной устойчивости грунтов: Патент РФ № 1823923 АЗ. 1993.
- Bogolubov A.N., Kamshilin A.N., Volkova E.N. Possibilities of geoelectrical and seismo-electrical monitoring in investigations of the karst phenomena // Environmental Geology. 2002. V. 41, N 7. P.760–764.

Сведения об авторах

ВОЛКОВА Елена Николаевна – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499)254-30-15. E-mail: kamshilin@ifz.ru

КАЗНАЧЕЕВ Павел Александрович – младший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499)254-30-15. E-mail: p_a_k@mail.ru

КАМШИЛИН Анатолий Николаевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499)254-30-15. E-mail: kamshilin@ifz.ru

ПОПОВ Владимир Витальевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет МЭИ. 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14. Тел.: (495)422-51-72.

GEOELECTRICAL STUDIES OF BACKGROUND CAVING PREPROCESS

E.N. Volkova¹, P.A. Kaznacheev¹, A.N. Kamshilin¹, V.V. Popov²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia*

Abstract. Methodological principles for the geodynamic event monitoring with the geoelectrical methods are presented. The results of the equipotential method application for recording of enclosed underground caving under physical simulation are given. The possibility of development of the monitoring system based on current line observation are considered taking into account the results obtained. A mathematical model of the local current meter is developed and the dependence of the output signal on the electric field parameters is studied. Laboratory and field experiments are performed and compared to the results of modeling.

Keywords: geoelectrical monitoring, equipotential installation, measurement of current density, measurer of a local current, modeling.