Низкочастотный электрометрический мониторинг и влияние метеофакторов на его результаты

М.И. Богданов (ОАО «ПНИИИС»), Д.В. Макаров (МГУ им. М.В. Ломоносова), И.Н. Модин* (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Введение

В практической деятельности инженер-геологов периодически возникают задачи изучения динамики инженерно-геологических процессов, которые могут возникать и развиваться в природных и искусственно созданных грунтовых массивах *(Огильви, 1990*). При этом на ряде особо ответственных и интересных с научной точки зрения объектах необходимо вести слежение за негативными процессами в постоянном режиме.

Во многих случаях задачи постоянного мониторинга грунтового массива могут быть решены при ведении наблюдений только за физическими полями. Эти задачи включают:

- изучение динамики состояния многолетнемерзлых грунтов в основаниях зданий и сооружений (нефтяных резервуаров, компрессорных станций для транспортировки нефти и газа, предприятий по переработке нефти и газа, плотин) *(Зыков, 2005; Ottowitz, 2011)*,

- мониторинг опасных инженерно-геологических процессов в теле плотин, в том числе фильтрации через них подземных вод (*Sjodahl P.,2006; Макаров и Модин, 2013*),

-мониторинг развития карстовых процессов и связанных с ними суффозионных процессов. Это имеет особенно большое значение при быстром протекании процессов в хлоридном карсте. В ряде случаев важен мониторинг сульфатного карста. Учитывая медленное развитие карбонатного карста, при мониторинге грунтового массива на территории его развития геологов в основном интересуют связанные с ним суффозия, обвалы, просадки в доломитовой муке и образование коррозионных воронок.

- В условиях сложной тектоники, в том числе на подработанных территориях, когда на глубине производится выемка полезных ископаемых (например, угля) без заполнения грунтом отработанных штреков, можно отслеживать изменение напряженно-деформированного состояния грунтов в зонах малоамплитудных тектонических нарушений, по которым в дальнейшем может происходить резкое неравномерное смещение грунта, приводящее к разрушению зданий и сооружений *(Киселев, 1993)*.

- Контроль оползневых процессов геофизическими методами в составе комплексной системы мониторинга.

- Изучение во времени процессов внедрения соленых морских вод внутрь суши, например когда в прибрежной зоне на суше ведется интенсивная откачка пресной воды для полива сельскохозяйственных угодий или водоснабжения портовых городов(*Hagemeyer,1990*).

Важной особенностью мониторинга физических полей во многих случаях является чрезвычайно малые изменения сигналов и во многих случаях существенно высокий уровень шума. Это становится особенно важным при ведении мониторинга опасных инженерно-геологических процессов, которые развиваются на значительной глубине, угрожая безопасности зданий или сооружений.

Обоснование выбора физических полей для ведения постоянного мониторинга явилось задачей отдельного исследования и было выполнено авторами настоящей статьи, в том числе, путем их численного моделирования с учетом существующих в мире аппаратурных технических возможностей. На основании проведенного анализа был сделан вывод о необходимости построения системы электрического мониторинга.

Электрический мониторинг – это совокупность многократных измерений электрических полей, вызванных искусственными или естественными источниками тока, для выявления и изучения динамики процессов, происходящих в грунтовом массиве, с целью принятия необходимых управленческих решений.

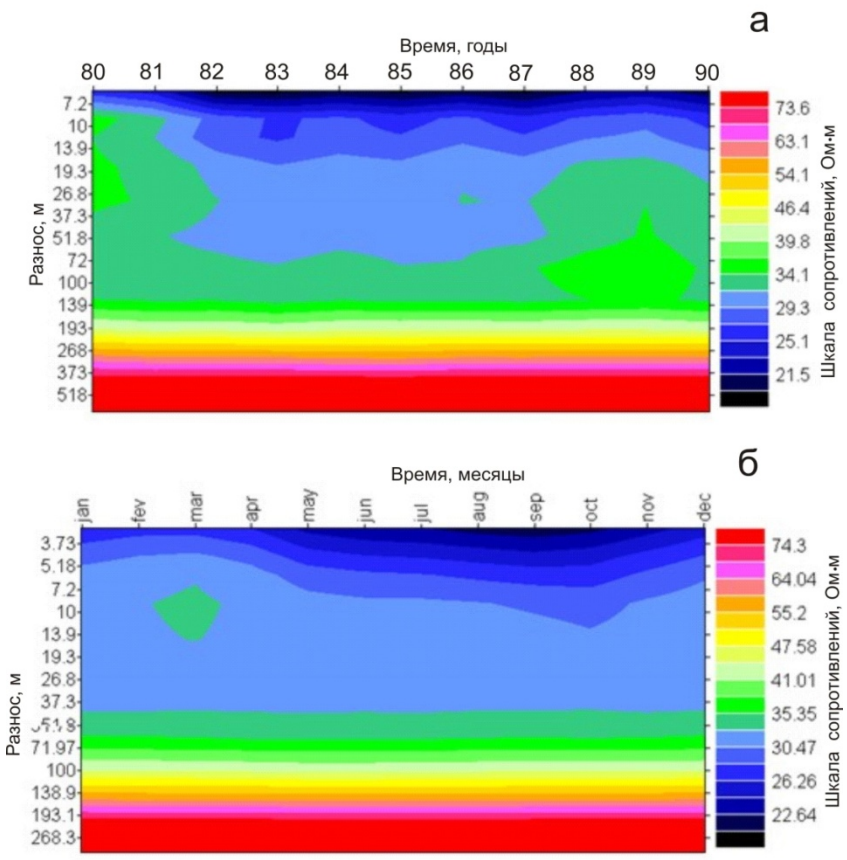

Рисунок 1. *Изменение разреза кажущегося сопротивления во времени в одной точке (по Дещеревскому А.В. и Сидорину А.Я.,). Результаты эксперимента 1980–1990 гг., выполненного на Гармском полигоне Института физики Земли: а –кривые кажущегося сопротивления, собранные как среднее по годам, б – кривые кажущегося сопротивления, собранные как средние по месяцам*

Электрический мониторинг является, вероятно, самой перспективной современной технологией слежения в силу двух основных причин: во-первых, для электрического мониторинга возможно разработать надежную помехозащищенную аппаратуру, с помощью которой можно сравнительно просто вести автоматический сбор данных при стабильном возбуждении поля и постоянном контроле за источником; во-вторых, именно параметры электрического поля и удельное электрическое сопротивление грунтов(*Рисунок 1*) являются наиболее чувствительными к изменениям физико-механических свойств изучаемого грунтового массива, в том числе влажности, а также к изменениям геометрии структуры, включая ее внутреннее строение.

Электрический мониторинг является разновидностью геофизического мониторинга. При проведении геофизического мониторинга можно выделить три этапа *(Богословский и др., 2000)*. На первом этапе выполняется детальная съемка объекта с помощью электрической томографии (*Рисунок 2*) и других геофизических методов. С учетом инженерно-геологической информации составляется максимально приближенная к реальности геолого-геофизическая модель верхней части разреза, которая включает в себя объект мониторинга. Кроме этого определяется чувствительность мониторинговой установки к изменениям параметров изучаемого объекта. На втором этапе производится накопление фонового сигнала в условиях, когда объект и вме-

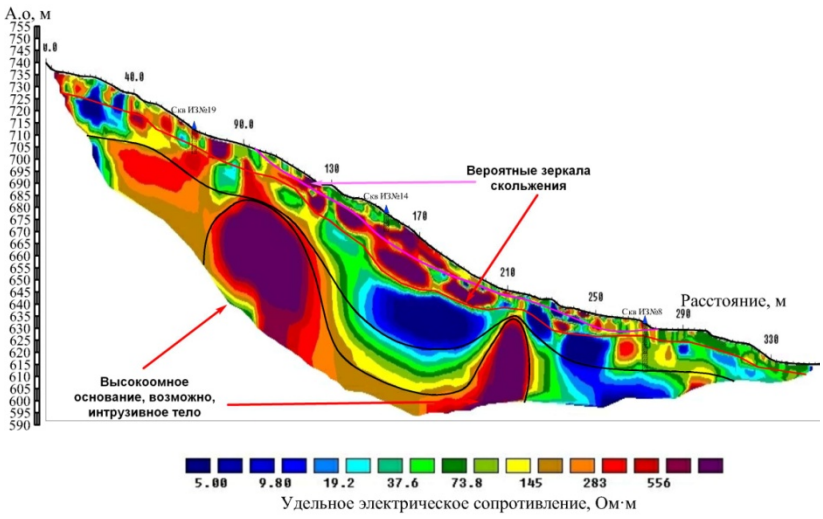

Рисунок 2. *Двумерная геоэлектрическая модель оползня, полученная по результатам электрической томографии, выполненной в Краснодарском крае институтом ОАО «ПНИИИС» в 2012 г.*

щающая среда находятся в стабильном состоянии. На третьем этапе выполняется собственно сам мониторинг – многократные и длительные повторные измерения, которые выполняются с различной периодичностью в зависимости от уровня ответственности объекта и скорости изменений параметров модели. Если процесс развивается очень медленно, то измерения можно выполнять редко – 1–2 раза в год, но желательно в одни и те же сезонные сроки, придерживаясь точности в 5-7 дней. Если процессы в верхней части разреза протекают быстро, то мониторинговые измерения нужно проводить чаще – 1–2 раза в сутки или даже каждый час. Например, такого типа наблюдения следует проводить при исследованиях суточных колебаний уровня грунтовых вод или при детальном учете суточных колебаний температур в верхней части разреза. Слежение за изменением температуры уже довольно активно выполняются в настоящее время. По сути, речь идет о дистанционном мониторинге температурных изменений в горном массиве с помощью измерения электрического поля искусственных источников тока. Подобные измерения могут существенно дополнять измерение температур с помощью термокос, позволяя увеличивать расстояние между наблюдательными скважинами. Кроме того, периодичность измерений может определяться техническими особенностями объекта исследований. Так, при наполнении водохранилища периодичность измерений должна устанавливаться с учетом предполагаемой скорости подъема воды *(Козлов и Павлова, 2013)*.

Организация геофизического мониторинга и техника измерений

Один из важнейших вопросов при организации мониторинга – это периодичность установки оборудования в пределах исследуемого объекта.

Самая простая технология предусматривает выполнение измерений на профиле или площадке без постоянного размещения аппаратуры и оборудования, когда повторные измерения каждый раз проводятся как при обычной геофизической съемке. Точность таких измерений очень сильно зависит от точности повторного позиционирования датчиков поля. В этом случае, невозможно рассчитывать на точность съемки лучше чем 3-5%. При второй технологии ведения мониторинга датчики поля для повторных измерений на постоянное время размещаются на местности, а один и тот же измерительный прибор используется для сбора данных с разных датчиков, расположенных на одной или нескольких разных площадках. Такая методика требует, чтобы геофизики успевали передвигаться между всеми площадками исследования для обеспечения полного цикла измерений. Если период измерений на каждом участке меньше или намного меньше их общего цикла измерений на всех площадках, то необходимо переходить к третьей технологии – использованию мониторинговых стационаров, на которых на длительный срок устанавливается автоматическая система сбора данных. Такая система никуда не передвигается. При этом применение только второй и третьей технологии мониторинга позволяет добиваться относительной точности физических измерений менее 1%. В этом случае точность оценивается как гарантированная повторяемость измеряемых сигналов в течение короткого времени в условиях сравнительно стабильной температуры и влажности грунта, а также формы и амплитуды внешней электромагнитной помехи.

Наиболее перспективной технологией для решения этих задач является методика измерений на низкой частоте, когда рабочие частоты, как правило, не превышают 25 Гц. Эта технология зарекомендовала себя с наилучшей стороны по нескольким причинам. Во-первых, ее отличительной особенностью является возможность создать высокую помехозащищенность при измерениях сравнительно малых сигналов, что резко увеличивает чувствительность аппаратуры и соответственно дает возможность качественно проводить измерения сравнительно небольших сигналов. Во-вторых, использование низкой частоты позволяет избавиться от влияния индукционных помех, которые возникают в проводящем грунте от магнитного поля токоподводящих проводов. При этом во время измерений мы точно знаем, что должны выделять лишь те полезные сигналы, которые имеют нулевую фазу относительно сигнала в питающей линии, что соответствует теории постоянного тока. В третьих, в случае применения тока низкой частоты мы гарантируем прохождение тока только в нижнем полупространстве, которое, собственно, и является объектом исследований. При этом металлические конструкции, которые находятся под землей, практически не оказывают никакого влияния на аномальное электрическое поле, если эти конструкции окружены электрогидроизоляцией. При работах на переменном токе высокой частоты все металлические конструкции, которые расположены в земле, над землей, в зданиях и сооружениях, вне зависимости от того, есть или нет

электрическая изоляция на их поверхности, будут возбуждать сильные электромагнитные поля, создавая дополнительную индукционную помеху при измерениях. В четвертых, многие исследователи-геофизики предпочитают работать с низкочастотными полями в силу сравнительной простоты теории постоянного тока и, соответственно, хорошо развитой теории геолого-геофизической интерпретации полученных данных.

Обычная электроразведочная съемка предусматривает пространственное разделение генератора и измерителя по методическим причинам. При электрическом мониторинге генератор тока и измерительная система конструктивно находятся в одном блоке (такая же ситуация возникает при электрической томографии). Это создает дополнительные возможности для увеличения точности измерений. Наиболее эффективным алгоритмом выделения полезного сигнала, обеспечивающим высокую и контролируемую точность измерений на переменном токе, является синхронное детектирование. Оно возможно даже тогда, когда уровень шума существенно выше полезного сигнала (*Рисунок 3*). Для выделения последнего синхронный усилитель использует метод фазочувствительного синхронного детектирования на частоте опорного сигнала. Шумовые компоненты сигнала на других частотах отфильтровываются выходным фильтром низких частот. При синхронном детектировании используется опорный сигнал на рабочей частоте, который создает генератор электрического тока. Исследуемая система получает возбуждение от этого сигнала, а отклик системы анализируется синхронным усилителем. В основе метода лежит простое перемножение гармонических сигналов*(Основы радиофизики, 1996)*.

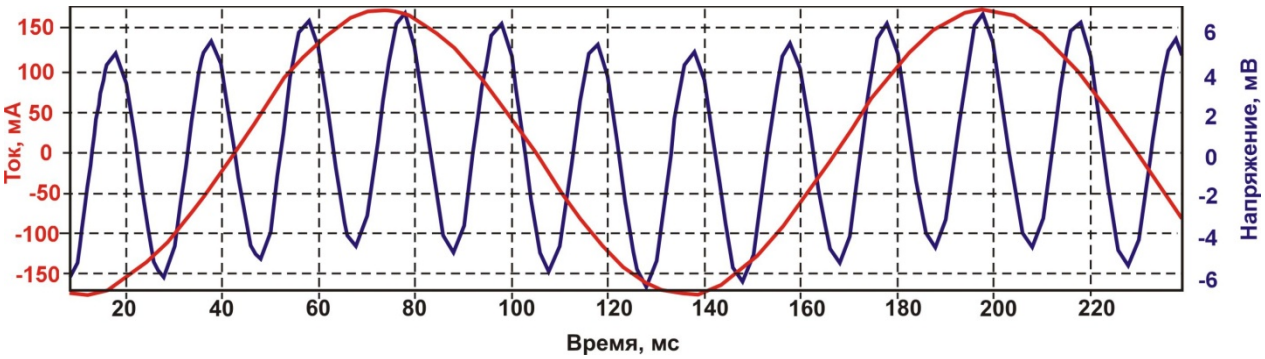

Рисунок 3. *Пример записи сигналов в условиях сильной помехи 50 Гц. В данном случае для точного измерения сигнала синхронному детектору требуется накопить 290 периодов.*

Пусть для простоты опорный токовый сигнал представляет собой синусоидальный сигнал:

$$U_{AB} = A_{AB} \cdot \sin(\omega_{AB} t + \varphi_{AB}),$$

где A_{AB} - амплитуда токового сигнала, ω_{AB} - круговая частота исходного токового сигнала, φ_{AB} - фаза токового сигнала,

а сигнал разности напряжения на приемных электродах можно записать как

$$U_{MN} = A_{MN} \cdot \sin(\omega_{MN} t + \varphi_{MN}),$$

где A_{MN} - амплитуда принимаемого сигнала, ω_{MN} - круговая частота приемного сигнала, φ_{MN} - фаза приемного сигнала,

то в результате перемножения, используя тригонометрическую формулу для произведения синусов, получим:

$$U_{OUT} = U_{AB} \cdot U_{MN} = A_{AB} \cdot A_{MN} \sin(\omega_{AB} t + \varphi_{AB}) \cdot \sin(\omega_{MN} t + \varphi_{MN}) =$$
$$1/2\ A_{AB} \cdot A_{MN} (\cos((\omega_{AB} - \omega_{MN})t + \varphi_{AB} - \varphi_{MN}) - \cos((\omega_{AB} + \omega_{MN})t + \varphi_{AB} + \varphi_{MN})\ .$$

Таким образом на выходе имеются два сигнала – на суммарной $(\omega_{AB} + \omega_{MN})$ и разностных $(\omega_{AB} - \omega_{MN})$ частотах. Если частоты совпадают, то получается сигнал на двойной частоте и сигнал постоянного тока с амплитудой $U_{OUT} = 1/2\ A_{AB} \cdot A_{MN} \cos(\varphi_{AB} - \varphi_{MN})$.

Если отфильтровать сигнал на двойной частоте, то останется сигнал постоянного тока. Как видно из полученного выражения, амплитуда сигнала будет пропорциональна амплитуде входного сигнала и косинусу смещения по фазе относительно опорного сигнала. В нашем случае фазовый сдвиг измеряемого сигнала относительно опорного токового сигнала должен быть равен нулю, а косинус нулевой фазы – единице. Зная точную амплитуду токового сигнала, можно легко найти амплитуду измеряемого сигнала.

Накопление сигнала, по сути, соответствует преобразованию Фурье при математическом расчете спектров идеальных функций. В зависимости от амплитуды и формы помехи требуется различное время для выделения полезного сигнала на фоне помех. При этом можно накапливать сигнал с какой угодно заранее заданной точностью. В результате правильно организованного входного канала только полезный сигнал на частоте опорного генератора свободно проходит через синхронный детектор. Как показывают выполненные эксперименты, при соотношениях сигнал/шум=1/1 для того, чтобы выйти на точность порядка 0,1%, требуется несколько десятков накопленных периодов. При этом скорость работы синхронного детектора очень сильно зависит от стабильности помехи. Если помеха сильно изменяется во время измерения, то для точного определения сигнала может понадобиться несколько сотен периодов. Таким образом схема измерений построена с целью достижения наперед заданной точности.

Влияние метеофакторов на результаты мониторинга

Кроме внешних электромагнитных помех на показания приборов сильное влияние оказывает температура. Во-первых, при отсутствии термостатирования приборов может нарушаться стабильность основных параметров измерительной аппаратуры – входного сопротивления, коэффициентов передачи, характеристик фильтров, идентичности каналов и др. Такие разбалансировки мало заметны при обычной съемке, когда требуется точность измерений до 5%. Когда же мы хотим добиться точности измерений 1,0 или 0,5% , необходимо все время отслеживать передаточные параметры приборов. Во-вторых, под влиянием температуры будет изменяться собственно удельное сопротивление грунтов медленно на глубине и быстро в приповерхностном слое. В условиях континентального климата сезонные изменения удельного электрического сопротивления в верхней части разреза могут быть очень заметными. Разница температуры воздуха между зимой и летом может составлять 50–60 °С. Это означает, что в верхней части разреза грунты от поверхности земли до глубины 1,0–1,5 м периодически переходят из мерзлого состояния в талое и обратно. При этом электрические сопротивления верхнего слоя грунта могут меняться в десятки или даже сотни раз, а температурный фронт сезонных изменений может распространяться на глубину порядка 10 м. Ниже этой глубины (уровня нулевых годовых колебаний температуры) температура мерзлых и талых грунтов в течение года не меняется. Снежный покров сглаживает амплитуду сезонных изменений температуры. Даже в условиях Крайнего Севера снег мощностью более 60 см практически не дает развиваться промерзанию грунта. При среднегодовой температуре в Москве около плюс 8 °С на площадках с обнаженной поверхностью грунта(например, дороги) годовые температурные колебания на глубине 0,6 м достигают 22 °С (*Корнева и, Локощенко, 2012*).

Суточные колебания температур также могут быть значительными. В условиях Центральной России разница между дневными и ночными температурами в антициклональных условиях может составлять 20 °С, но при этом такого рода изменения температуры проникают в грунт не глубже 30–35 см.

Обычно в наблюдаемых погодных условиях температура воздуха в течение суток может различаться на 10-15 °С. Известно, что электрическая проводимость водного раствора меняется примерно на 2% при изменении температуры на 1°С. Получается, что при изменении температуры на 10°С электрическое сопротивление поровой влаги изменится на 20%, что является существенной

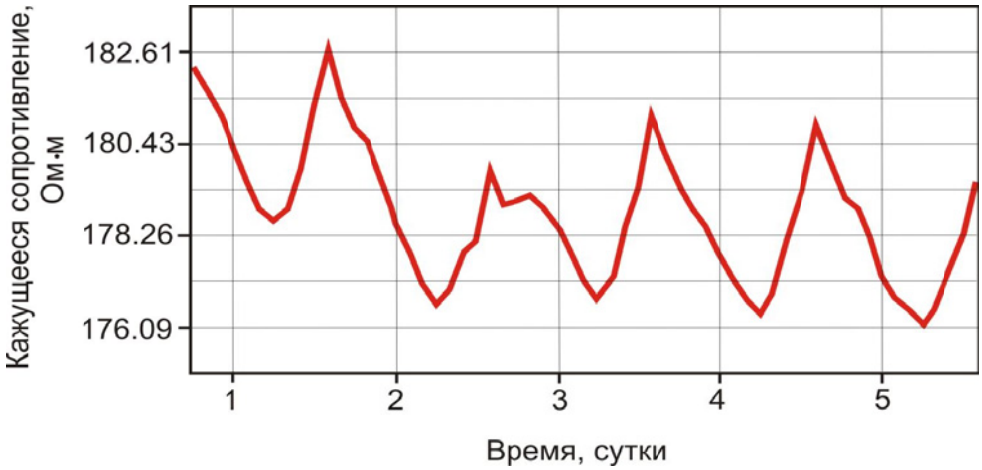

Рисунок 4. *Пример суточных вариаций кажущегося удельного сопротивления грунтов, расположенных в верхней части разреза, измеренных на полигоне ОАО «ПНИИИС» около города Петушки во Владимирской области. Вертикальные линии соответствуют 24 часам местного времени.. Максимальные значения кажущегося сопротивления фиксируются в 13.00. Минимальные – в 6.00.*

величиной. Однако таких изменений даже при размещении измерительных электродов на открытом грунте мы ни разу не наблюдали. Амплитуда суточных температурных колебаний на графике(*Рисунок 4)* составляет около 2.4%. На *Рисунке 6* показан пример, когда датчики были установлены на глубину 0.5 м. Суточные изменения кажущегося сопротивления составили всего 1% от уровня фона. При измерениях еще на одном объекте была зарегистрирована длительная последовательность суточных колебаний близкой к синусоидальной форме с размахом амплитуды от минимума до максимума 1.7% (датчики были поставлены в грунт на глубину порядка 0.3 м и сверху ничем не закрывались).

На одном из участков во Владимирской области были проведены измерения, полученные с установкой летом 2013 года. Измерения проводились в автоматическом режиме с интервалом 2 часа в течении 12 дней. Использовалась дипольная осевая установка. Приемные неполяризующиеся электроды в количестве 19 штук были размещены вдоль профиля с шагом 2.5 м. Питающие электроды были расположены в начале профиля. Расстояние между ними составляло 15 м (*Рисунок 5*). При анализе степени влияния температуры на кажущееся сопротивление были выбраны данные по пяти измерительным диполям (1-2, 5-6, 9-10, 15-16, 18-19).

Из наборов значений температуры воздуха и кажущегося сопротивления по диполям была вычтена фоновая низкочастотная составляющая. Для количественной оценки степени влияния температуры воздуха на электрическое сопротивление были построены кросс-плоты и рассчитаны коэффициенты корреляционной связи Пирсона (*Рисунок 7*). Используя последние можно не только оценить тесноту связи между величинами, но и определить фазовый сдвиг между ними. Фаза, на которой коэффициент корреляции принимает свое максимальное по модулю значение, соответствует временной задержке между изменением метеорологической величины и реакцией системы измерения, проявляющейся в искажении измеряемого сигнала и, как следствие, изменении кажущегося сопротивления.

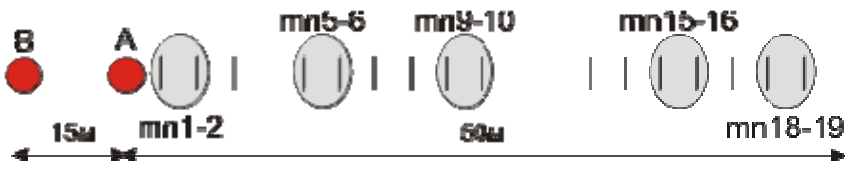

Рисунок 5. *Схема измерительной установки для мониторинга*

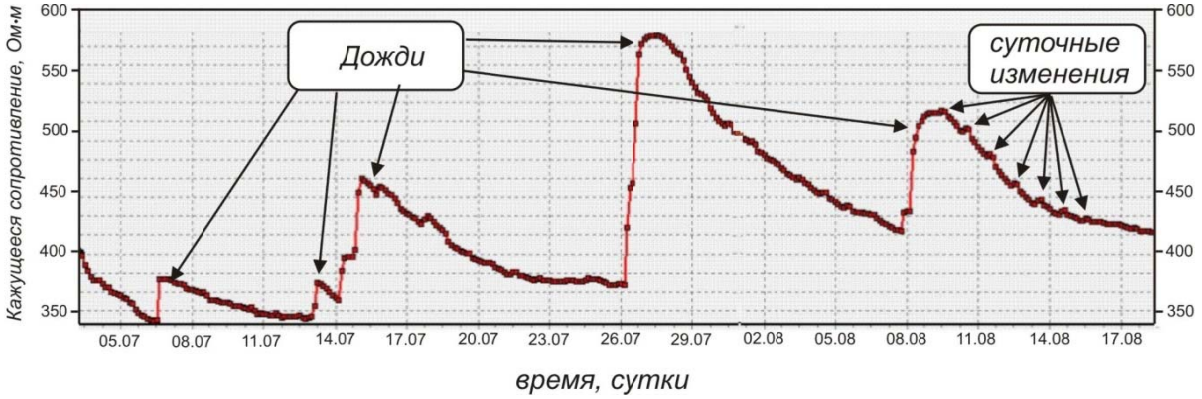

Рисунок 6. *Пример вариаций кажущегося удельного сопротивления грунтов в течении полутора месяцев. Сильные цуги апериодических сигналов связаны с выпадением сильных продолжительных дождей. Строго периодичные малоамплитудные аномалии 10-15 августа - пример суточных температурных колебаний.*

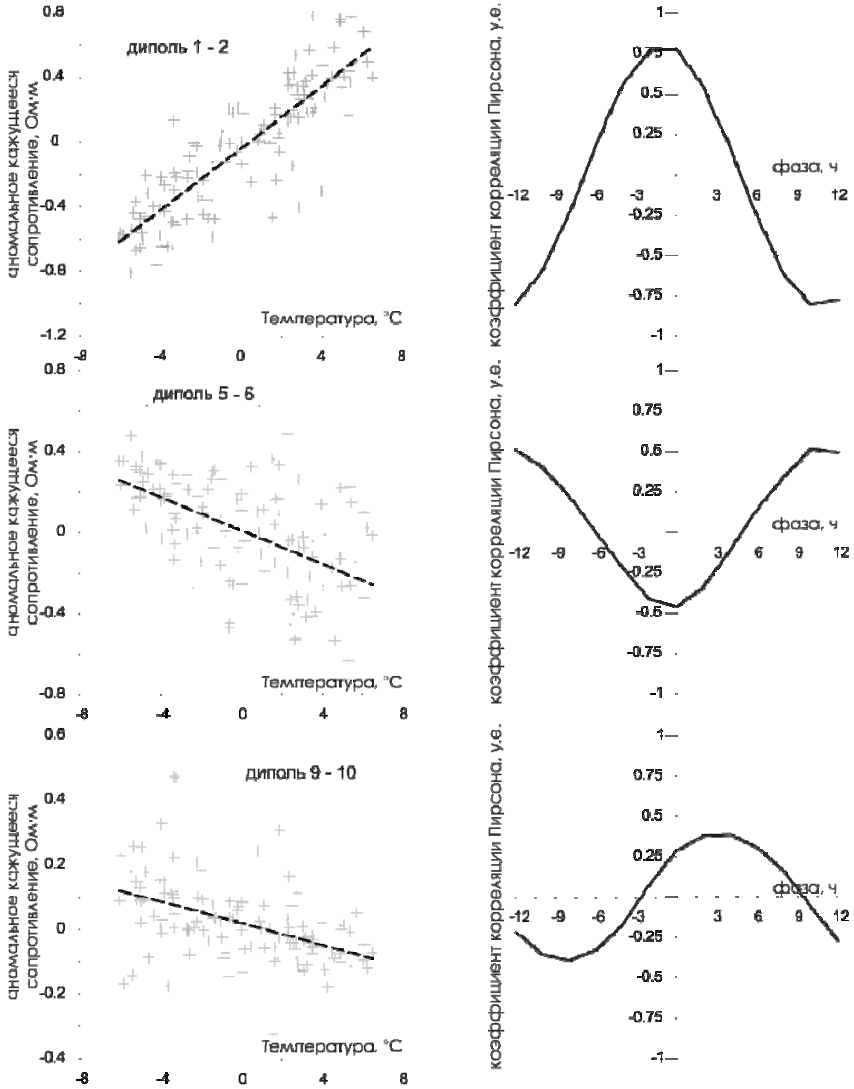

Рисунок 7. *Кросс-плоты суточной компоненты кажущегося сопротивления и температуры воздуха (слева), зависимость коэффициента корреляции Пирсона от фазового сдвига между температурой и кажущимся сопротивлением (справа)*

Гораздо более сильное воздействие летом оказывают дожди. На *Рисунке 6* показаны последствия длительных и обильных выпадений осадков на другом подмосковном участке. Во время сильного дождя амплитуда кажущегося сопротивления резко нарастает, достигая максимума в момент прекращения дождя. Если выпадение осадков заканчивается постепенно, то это приводит к появлению закругленного максимума (см.на рис.6 аномалии 28 июля и 9 августа 2013 г.). Если выпадение осадков прекращается быстро, то сразу после этого момента начинается релаксационный процесс и сигнал постепенно выходит на уровень фона. Время релаксации зависит от амплитуды аномалии. По характеру графика на *Рисунке 6* можно заметить, что в разрезе происходит постепенное накопление воды и даже к концу лета график не выходит полностью на асимптоту 6 июля. Поскольку сброс воды происходит по экспоненциальному закону для полной релаксации понадобится около 25 дней, в то время как периодичность выпадения дождей в среднем составляла от 9 до 12 дней.

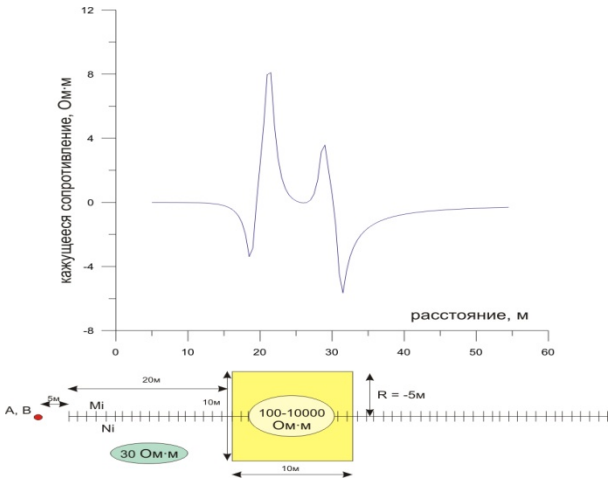

Рисунок 8. *Пример искажения аномалии кажущегося сопротивления приповерхностной неоднородностью под измерительной установкой. Изменение сопротивления неоднородности произошло от 100 до 100000 Ом·м*

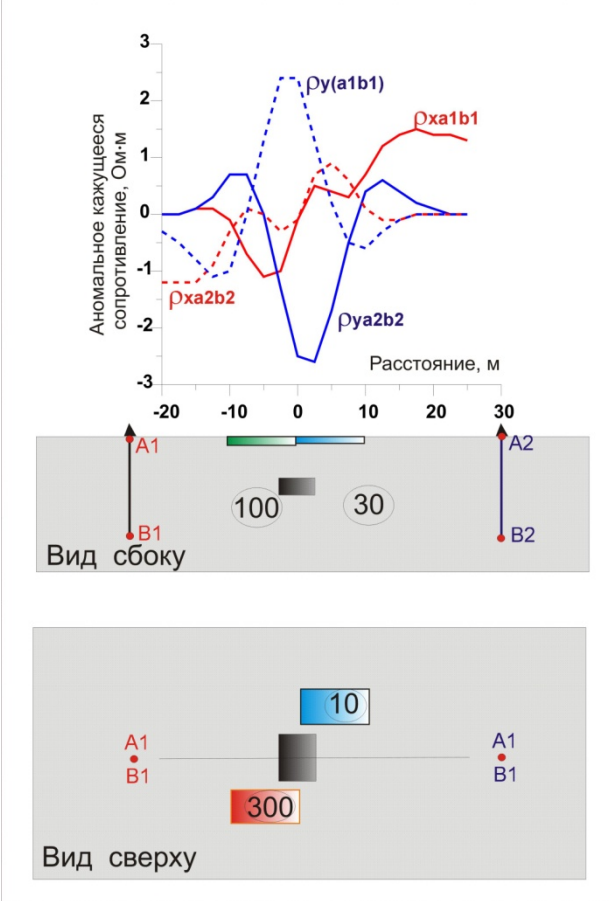

Рисунок 9. *3D модель возникновения аномалий кажущегося сопротивления от приповерхностных неоднородностей, расположенных в стороне от профиля наблюдения. Расчеты выполнены с помощью программы IE3R1. Цифрами указаны сопротивления объектов: вмещающая среда 30 Ом·м, объект мониторинга 100 Ом·м, приповерхностные неоднородности 300 и 10 Ом·м*

Кроме этого можно предположить, что даже на небольшой территории, занимающей по площади, например, 1 га, грунтовые условия будут разными. Поэтому будут наблюдаться динамические Р- и С-эффекты, которые возникают как аномалии электрического поля на приемных и питающих электродах, связанные с неодинаковостью изменений во времени электрических свойств приповерхностных неоднородностей. И как результат этого явления - значительные изменения наблюдаемого электрического поля. Наиболее резкие изменения будут происходить из-за вариаций сопротивления зон расположенных непосредственно вблизи приемных электродов (*Рисунок 8*). Такие изменения напрямую можно учесть только с помощью резистивиметров, установленных вблизи приемных датчиков. На флангах приповерхностных аномалий (там, где развиваются так называемые сопряженные отрицательные аномалии кажущегося сопротивления (см.*Рисунок 8*)) будет возникать антикорреляция между температурой воздуха и аномальным электрическим полем(см.*Рисунок 7*, диполь 5-6). Гораздо более

серьезные проблемы возникают с удаленными приповерхностными неоднородностями, которые могут создавать шум в пределах 1-2 %, сходный с аномалией от изучаемого объекта*(Рисунок 9)*. Единственная панацея от этого - научится распознавать аномалии поверхностные и глубинные.

Заключение

На основании проведенных исследований были сделаны следующие основные выводы, которые использованы при создании высокоточной геофизической аппаратуры для ведения мониторинга опасных инженерно-геологических процессов.

1. Для увеличения чувствительности при ведении мониторинга к небольшим изменениям геоэлектрического разреза необходимо увеличивать точность измерений за счет применения специальной аппаратуры, позволяющей учитывать информацию об мгновенных изменениях параметров исходного сигнала. При обработке данных измерений должны использоваться алгоритмы обработки сигналов, основанные на синхронном детектировании.
2. Результаты исследования показывают сильное влияние метеорологических условий на данные электрического мониторинга. Коэффициент линейной корреляции Пирсона между температурой воздуха и кажущимся сопротивлением в ряде случаях достигает 0.8. При этом корреляция бывает как отрицательной, так и положительной. В летние периоды суточные колебания температуры воздуха приводят к изменению кажущегося сопротивления до 1-2% от фоновых значений при расположении измерительных датчиков на глубине 0.3-0.5 м.
3. Наибольшую угрозу качеству материалов при мониторинге несут интенсивные осадки в виде дождей. Выпадение осадков также приводит к искажениям в сопротивлении. В отдельных случаях изменение кажущегося сопротивления достигает почти 50% от фона.

Библиография

Богословский В.А., Жигалин А.Д., Хмелевской В.К.[2000] Экологическая геофизика: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2000. 256 с.

Зыков Ю.Д. [2005] Геофизические исследования геокриолитозы: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2005. 254 с.

Киселев Н.Н., Модин И.Н., Одинцов К.Л.[1991] Электроразведка при изучении площадок под строительство в Донецке / Материалы Всесоюзной конференции «Геолого-геофизические исследования при решении экологических задач», Звенигород, 19–21 марта, 1991.

Козлов О.В., Павлова А.М. [2013] Геоэлектрический мониторинг каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС методом электротомографии. Инженерные изыскания, 2013 г.,№5, с.32-42.

Корнева И.А., Локощенко М.А.[2012] Многолетние изменения температуры грунта на разных глубинах в Москве / Труды 16-й Международной школы-конференции молодых учёных. Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты. Т. 16. С. 119–122. М.: Изд-во Института физики атмосферы РАН, 2012.

Макаров, Д.В., Модин И.Н. [2013] Электрометрические исследования насыпной плотине в зоне вечной мерзлоты: первый этап мониторинга. Инженерные изыскания, 10-11, 2013, 116-121.

Огильви А.А. [1990]Основы инженерной геофизики / под ред. В.А. Богословского. М.: Недра, 1990. 493 с.

Основы радиофизики[1996] / под ред. А.С. Логгинова. М.: УРСС, 1996.

Hagemeyer R.T., Stewart M. [1990] Resistivity investigation of salt-water intrusion near a major sea-level canal // Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysics, 1990. V. 2. P. 67–77.

Ottowitz D., Jochum B., Supper R., Römer A., Pfeiler S., Keuschnig M. [2011] Permafrost monitoring at Mölltaler Glacier and Magnetköpfl / Proceedings of the International Workshop on Geoelectric Monitoring // Berichte der Geologischen Bundesanstalt. 2011. № 93. P. 57–64.

Sjodahl P.[2006] Resistivity investigation and monitoring for detection of internal erosion and anomalous seepage in embankment dams: doctoral thesis. 2006. 86 p.

Контактная информация

Богданов Михаил Игоревич, ген. директор ОАО «ПНИИИС», к. г.-м. н., *mail@pniiis.ru*
Макаров Дмитрий Валентинович, младший научный сотрудник МГУ им.М.В.Ломоносова; *tern0vnik@yahoo.com*
Модин Игорь Николаевич, профессор геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.т.н., *imodin@yandex.ru, sv-ak@yandex.ru*