

А.Н. Камшилин, П.А. Казначеев

АКТИВНЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Рассмотрены принципы активного геоэлектрического и сейсмоэлектрического мониторинга. Рассмотрен вопрос оптимизации способа измерений при геоэлектрическом мониторинге. Приведены результаты экспериментальных исследований метода на лабораторной установке, построенной для изучения процессов образования и развития подземных полостей. Для сейсмоэлектрического мониторинга приведены результаты лабораторных исследований преобразований сейсмической энергии в электрическую в образцах горных пород. Рассмотрен режим как вынужденных колебаний, так и автоколебаний, при создании положительной обратной связи в системе акустический преобразователь – образец породы – измерительные электроды. В качестве примера приведены результаты опыта с влиянием очень малой дозы флюида – пресной воды – на параметры сейсмоэлектрических преобразований. Обсуждаются результаты опытов о влиянии других флюидов. Сделаны выводы о возможности применения геоэлектрического и сейсмоэлектрического мониторинга для контроля состояния геологической среды при техногенных воздействиях.

Ключевые слова: геофизический мониторинг, активный геоэлектрический мониторинг, активный сейсмоэлектрический мониторинг, эквипотенциальный способ, провал грунта, лабораторное моделирование, автоколебания, флюиды.

Геофизический мониторинг необходим для обеспечения надежного и безопасного функционирования сложных хозяйственных объектов, непосредственно связанных с геологической средой. Аномальные изменения свойств и состояния горных пород, которые могут привести к нарушению нормального функционирования объекта с последующими катастрофическими последствиями, проявляются в пространственно-временных вариациях параметров геофизических полей [10]. Исследование этих вариаций – цель мониторинга. Значительные трудности связаны с тем, что необходимо выделять малые отклонения, составляющие доли процентов от «номинальных» параметров полей. При длительных непрерывных наблюдениях задача усложняется внешними переменными воздействиями (температура, осадки, давление и пр.). Следовательно, создавая методы геофизического мониторинга, необходимо решать

проблему выделения малых сигналов на фоне значительных помех различного происхождения. Кроме этого следует обратить внимание на разработку принципиально новых методов.

Активный геоэлектрический мониторинг (АГЭМ)

АГЭМ – это мониторинг, при котором создается (с помощью искусственных источников энергии) и измеряется электрическое поле [6].

Пусть в среде с помощью системы излучающих электродов и источника энергии создано начальное электрическое поле E_1 . Геодинамические процессы, структурные изменения среды искажают первоначальное поле. Видно, что носителем информации служит разностное поле:

$$\Delta E = E_2 - E_1 \quad (1)$$

где E_2 – поле в изменившейся среде. ΔE можно представить как поле совокупности фиктивных источников,

определяемых как мультипликативная функция от неоднородности (связанной с изменением среды) и источника энергии и связанных с ними пространственно и количественно. В разностном поле ΔE есть составляющая, ортогональная исходному полю. Для надежной регистрации изменения геофизических параметров, связанного с изменением среды, необходимо выполнить следующие условия:

1. Как правило, начальное поле (синфазная электрическая помеха) на несколько порядков превышает разностное поле (полезный сигнал). Поэтому способ измерения должен обеспечить максимальную чувствительность к ΔE и минимальную чувствительность к E_1 .

2. Необходимо максимально подавить влияние изменяющихся во времени помеховых факторов (температуры, влажности, давления и пр.).

3. Взаимное расположение в пространстве источника поля, неоднородности и приемника определяет диаграмму направленности измерительной установки. Это следует принимать во внимание при создании процедуры контроля известного объекта (активного разлома, например) или определении координат новых неоднородностей.

Первое и второе условие выполняются при размещении измерительных электродов на одной эквипотенциальной линии исходного поля E_1 [1]. В этом случае начальная разность потенциалов на приемных электродах M и N стремится к нулю. Помехообразующие факторы, равномерно распределенные по площади (температура, осадки, атмосферное давление и пр.), вызывают скалярные изменения поля E_1 . Форма эквипотенциальных линий в этом случае не меняется, значит, разностное поле равно нулю. Третье условие выполняется при размещении измерительных электродов на луче, исходящем из фиктивного источника.

Электрические установки с расположением измерительных электродов с учетом эквипотенциальных линий начального поля E_1 называются эквипотенциальными [3]. Они могут иметь различную конфигурацию. В полевых и лабораторных условиях часто использовалась установка с двумя взаимно ортогональными парами измерительных электродов (трехэлектродная эквипотенциальная двухкоординатная установка). Измерительные пары M_1N_1 и M_2N_2 располагались на одной эквипотенциальной линии излучающего электрода A . Второй излучающий электрод B находился на значительном удалении («в бесконечности») от MAN .

Как показали длительные полевые эксперименты [4] этот способ измерения позволил не менее чем на три порядка уменьшить синфазную электрическую помеху. Влияние изменения проводимости приповерхностного слоя вследствие изменения температуры снизилось на два порядка и более. Непосредственное влияние осадков не отмечалось.

Примером крупной катастрофы, связанной с техногенным воздействием человека на геологическую среду при разработке месторождений, может служить серия провалов грунта в городе Березники Пермского края в 2006–2012 гг. [9]. Всего за этот период произошло 3 крупных провала, причиной стало растворение соляных залежей из-за попадания подземных и сточных вод. Некоторые из провальных воронок имели горизонтальные размеры около 120×80 м, глубина достигала 100 м. Были серьезно повреждены выработки, железнодорожные пути, дорожное полотно, промышленные сооружения.

Рассмотрим возможную схему геоэлектрического мониторинга в случае такого катастрофического явления, как образование подземной полости и подготовка провала грунта (рис. 1).

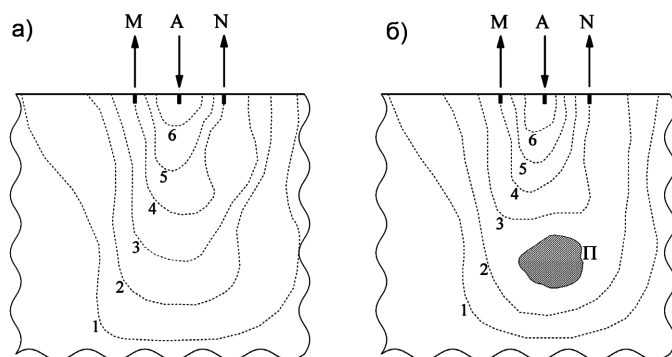


Рис. 1. Условная схема эквипотенциальной установки геоэлектрического мониторинга и распределение электрического поля: а) в исходном состоянии; б) после изменения состояния геологической среды – появления подземной полости П; А – первый излучающий электрод (второй электрод В отнесен «в бесконечность»); М и N – измерительные электроды; штриховыми линиями условно показаны эквипотенциальные линии электрического поля, созданного в среде излучающей системой; цифрами 1–6 обозначены условные «номера» эквипотенциальных линий

На рис. 1, а показано исходное состояние среды до появления подземной полости (полости нет) и соответствующая ему конфигурация поля (эквипотенциальные линии). На дневной поверхности расположен излучающий электрод А (электрод В не показан, т.к. отнесен на большое расстояние $AB \gg AM, AN, MN$) и измерительные электроды М и N. Измерительные электроды М и N расположены на эквипотенциальной линии под номером 4, и поэтому $U_{MN} \approx 0$.

На рис. 1, б показано состояние среды после появления полости П и соответствующая ему (изменившаяся по сравнению с рис. 1, а) конфигурация поля. Электрод М оказался на эквипотенциальной линии под номером 4, а электрод N – на линии под номером 3. Появится разность потенциалов ΔU_{MN} , которая будет свидетельствовать об изменении среды.

Важно еще раз отметить, что в эквипотенциальной установке мы минимизируем влияние уже существующих неоднородностей. Исходная установочная разность потенциалов U_{MN0} минимальна по сравнению с другими электрометрическими установками. При

этом достигается максимальная чувствительность к изменению среды (соотношение изменения разности потенциалов ΔU_{MN} к исходной разности потенциалов U_{MN0}). Теоретическое исследование метода показало, что при использовании современной элементной базы можно создать аппаратуру для метода, которая будет обладать достаточной чувствительностью и разрешающей способностью для регистрации процессов, подобных подготовке провалов грунта [8].

Экспериментальное исследование эквипотенциального способа геоэлектрического мониторинга проводилось на лабораторной модели, построенной для изучения суффозионных процессов [12] и принадлежавшей предприятию ОАО «Противокарстовая и береговая защита» (рис. 2).

Была проверена возможность применения эквипотенциального способа для обнаружения закрытых обрушений грунтов над подземными полостями [3, 12].

Рабочая камера модели, имеющая размеры $95 \times 74 \times 30$ см, полностью заполнялась влажным песком. При открытии отверстия в раздвижном дне 4

в результате вывала песка 2 в грунтоприемник 5 в песчаном теле модели 3 образуется закрытая полость обрушения 1.

На поверхности песка две ортогональные пары измерительных электродов $M_x N_x$ и $M_y N_y$ располагались максимально точно на одной эквипотенциальной линии. На рис. 2, а условно показана диаграмма направленности пар измерительных электродов (обозначение б; без заливки – $M_x N_x$, залитые – $M_y N_y$). На графиках сигналов $U_{M_x N_x}$ и $U_{M_y N_y}$ (рис. 2, б) четко прослеживается процесс подготовки, возникновения (первый вывал) и расширения (второй вывал) закрытой полости.

Таким образом, результаты теоретических и экспериментальных (полевых и лабораторных) исследований показали, что эквипотенциальный способ позволяет уверенно регистрировать разностное поле ΔE , обусловленное возникновением и развитием неоднородностей в среде.

Сейсмоэлектрический мониторинг

Если для изучения среды используются искусственные вибросейсмические источники, а измеряется электрическое поле, то такой мониторинг можно назвать сейсмоэлектрическим [7].

Известно, что упругие колебания возбуждают в осадочных породах переменное электрическое поле [2, 11]. Объем горных пород можно рассматривать, как преобразователь энергии упругих колебаний в электрическую энергию с передаточной функцией:

$$H_S = E_{\text{вых}}^2 / S_{\text{вх}}^2 \quad (2)$$

где S^2 – энергия упругих колебаний, E^2 – энергия электрического поля. H_S можно назвать коэффициентом сейсмоэлектрического преобразования. H_S зависит от частоты упругих колебаний f и физических параметров среды.

В основе идеи о возможности использования сейсмоэлектрических эффектов для контроля геодинамических

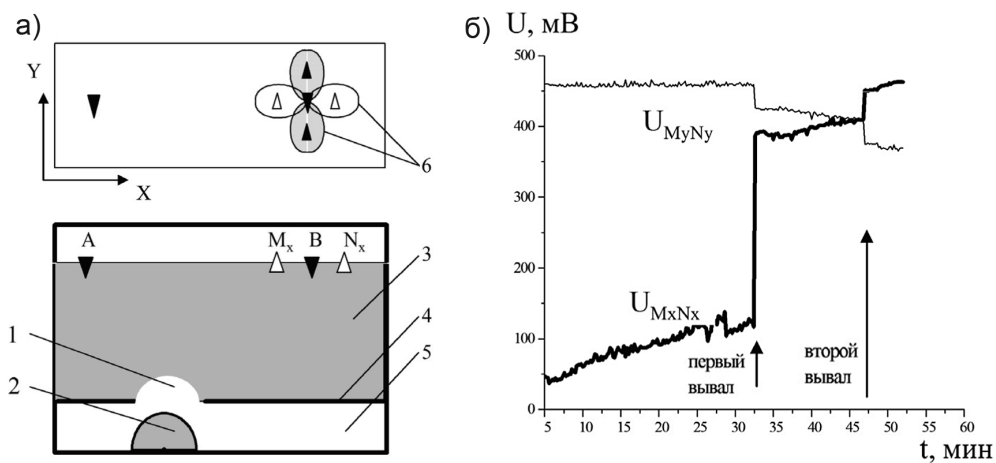


Рис. 2. Лабораторное моделирование и исследование процесса образования подземной полости: а) схема рабочей камеры с размещенной на ее поверхности двухкоординатной эквипотенциальной установкой (вверху вид в плане; внизу вид в разрезе); б) результаты выполненных измерений. А и В излучающие электроды; М и N пары измерительных электродов, ориентированные по разным осям (треугольники без заливки – по оси X ($M_x N_x$), залитые треугольники – по оси Y ($M_y N_y$)). Стрелками на рис. б) отмечены моменты первого и второго вывалов; на вертикальной оси отложена измеряемая разность потенциалов, на горизонтальной оси время от начала регистрации, мин

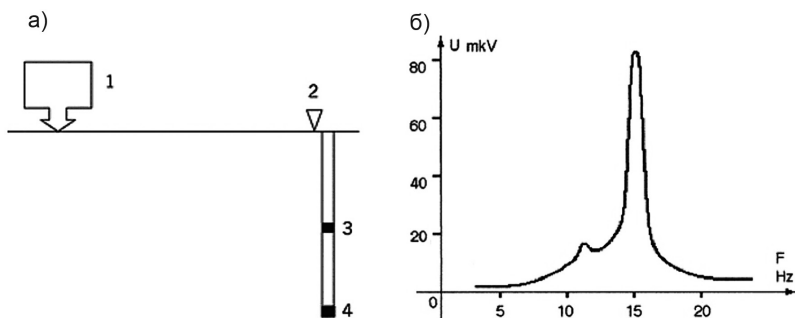


Рис. 3. Полевой эксперимент с вибросейсмическим воздействием на среду: а) схема; б) результаты: 1 – вибратор; 2 – сейсмоприемник; 3, 4 – измерительные электроды Э1 и Э2 соответственно

процессов лежат следующие утверждения:

1. Неоднородность и вмещающая среда различаются по физическим свойствам. Поэтому процессы взаимного преобразования сейсмоакустических и электрических полей во вмещающей среде и в неоднородностях должны различаться по совокупности параметров.

2. Результаты преобразования (параметры электрических откликов и H_S) обладают большой чувствительностью к изменению свойств неоднородности. При этом особое значение имеет флюиды, их количество и качество. Следует отметить, что наибольшая чувствительность достигается в резонансной области амплитудно-частотной характеристики H_S (см. ниже).

Следовательно, наряду с традиционными методами контроля необходимо развивать методы, основанные на изучении горных пород как преобразователей энергии.

В процессе полевых экспериментов с вибросейсмическими источниками мы обнаружили, в частности, что амплитудно-частотная характеристика H_S имеет вид резонансной кривой [5]. Работа проводилась в Краснодарском крае, вблизи поселка Абузы (район г. Горячий Ключ). Схема эксперимента и результаты приведены на рис. 3. Измерительные электроды Э1 и Э2

погребены на глубине 33 м и 48 м от поверхности Земли в необсаженной скважине. Сигнал от электродов усиливался и поступал на регистрирующее устройство; над электродами на поверхности Земли был установлен сейсмометр. Вибратор находился на расстоянии 50 м от сейсмометра. Он излучал свип сигнал в диапазоне частот от 5 до 25 Гц. Было проведено два последовательных воздействия с интервалом 10 минут. На рис. 3, б показаны измеренные значения разности потенциалов U между электродами во время первого воздействия. Величина U нормирована к сейсмическому сигналу. В первом эксперименте значение резонансной частоты составило 14,75 Гц, во втором составило 13,8 Гц.

В результате этого эксперимента возникла идея о возможности тестирования среды, анализируя изменения резонансных свойств передаточной функции H_S , поскольку параметры резонанса должны обладать повышенной чувствительностью к изменениям свойств среды как преобразователя энергии [7].

Эта идея нашла свое подтверждение в процессе лабораторных опытов по изучению зависимости результатов механоэлектрических преобразований от добавления в образцы малых доз различных флюидов. Далее представлены результаты, полученные при ув-

лажнении образца дистиллированной водой.

Для проведения экспериментов была создана лабораторная установка (рис. 4), которая может работать как в режиме вынужденных колебаний (ВК), так и в режиме автоколебаний (АК) на резонансных частотах H_s . Акустические колебания в образце 6 возбуждаются пьезопреобразователем (вибратором) 1. В режиме ВК на вибратор поступает гармонический свип сигнал от генератора 7, что позволяет регистрировать особенности АЧХ и ФЧХ электрического и акустического откликов образцов. В режиме АК генератор отключается и замыкается цепь обратной связи с выхода фазовращателя 4 на вход вибратора 1.

Как известно, для возбуждения автоколебаний необходимо обеспечить баланс амплитуд (3) и баланс фаз (4):

$$K = 1 \quad (3)$$

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (4)$$

Здесь K и φ – соответственно коэффициент усиления и набег фазы по образованному замкнутому контуру. Частотозадающим элементом установки становится образец, охваченный положительной обратной связью.

Результат одного из экспериментов показан на рис. 5. Образец песчаника весом 46 г помещался в установку и в режиме ВК в диапазоне частот 1000–10000 Гц регистрировались акустический и электрический отклики образца. Затем установка переводилась в режим АК – регулировкой коэффициента усиления усилителя 3 и регулировкой фазы с помощью фазовращателя 4 достигалось выполнение условий (3) и (4). После этого начиналась долговременная регистрация спектров акустического и электрического сигналов. Затем на поверхность образца при помощи шприца вводилась вода в количестве 0,02 мл. Регистрация в режиме АК продолжалась до момента

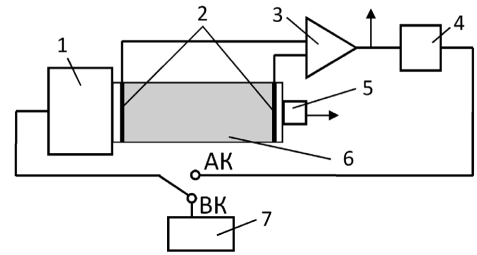


Рис. 4. Лабораторная установка по исследованию сейсмoeлектрических преобразований в образце горной породы: 1 – акустический пьезопреобразователь (вибратор); 2 – электроды; 3 – селективный усилитель; 4 – фазовращатель; 5 – акустический приемник; 6 – образец; 7 – генератор свип сигналов; → – выходы для регистрации акустических и электрических сигналов; АК и ВК положение переключателя в режиме автоколебаний и вынужденных колебаний соответственно

резкого самопроизвольного изменения частоты автоколебаний (с 1343 Гц на 3149 Гц), что происходило через некоторый интервал времени (здесь – через 15 минут) от момента увлажнения образца. Сразу после этого установка переводилась в режим ВК и снова регистрировались акустический и электрический отклики образца. Эксперимент заканчивался сравнительным анализом АЧХ и ФЧХ сигналов, полученных в режиме ВК, и параметров автоколебаний до и после увлажнения образцов.

Итак, даже небольшие количества флюидов вызывают значительные изменения АЧХ коэффициента передачи энергии H . Это проявляется в изменении АЧХ и ФЧХ электрических откликов образцов при практически неизменных АЧХ и ФЧХ акустических откликов. Этого и следовало ожидать, поскольку именно электрические сигналы являются результатами сейсмoeлектрического преобразования. Изменения электрических откликов вызывают перестройку автоколебаний, поскольку условия (3) и (4) выполняются уже на других частотах.

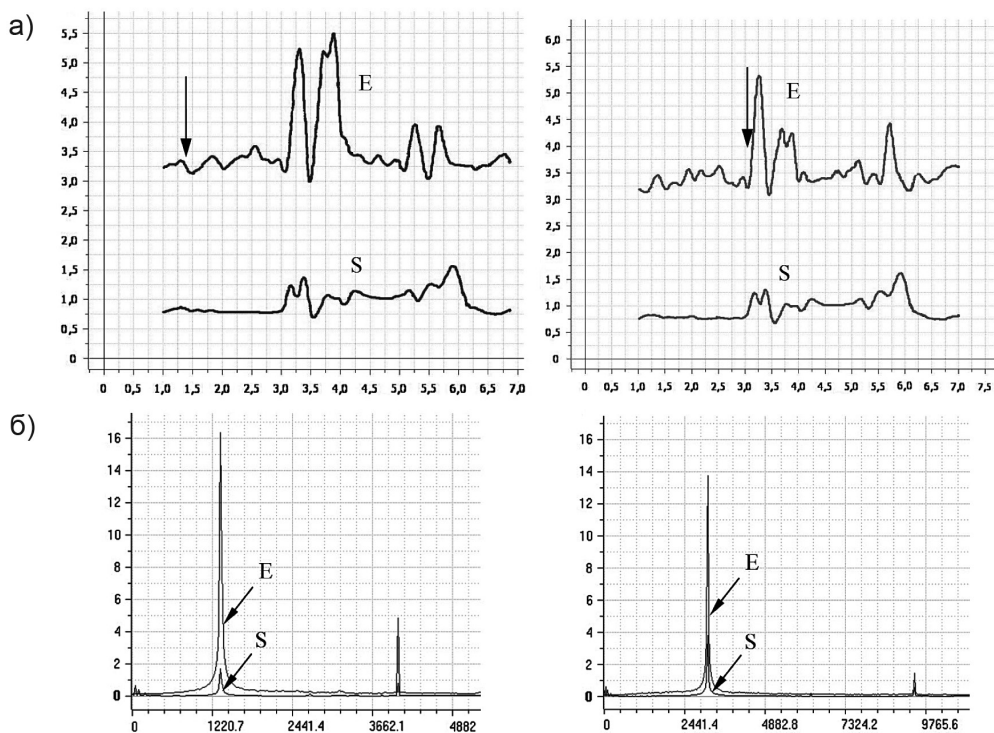


Рис. 5. Пример результатов эксперимента при исследовании сейсмoeлектрических преобразований: до (слева) и спустя 15 минут после увлажнения водой (справа), когда произошла перестройка АК; а) АЧХ акустического (S) и электрического (E) сигналов (отклики в режиме ВК); вертикальными стрелками указаны частоты автоколебаний; б) спектры автоколебаний

Таким образом, приходим к выводу, что автоколебания «отслеживают» изменение состояния образцов и после введения флюидов с некоторой задержкой, зависящей от проницаемости образцов (это выяснилось в ходе дополнительных экспериментов) резко перестраиваются. Как показывают эксперименты, под действием различных флюидов эффективность сейсмoeлектрических преобразований может как увеличиваться (вода, керосин), так и подавляться (растворы NaCl). В случае растворов эффект зависит также от концентрации. Это означает, что исследуя сейсмoeлектрические преобразования, можно определять как изменение флюидонасыщенности горных пород, так и тип и свойства флюида.

В упомянутом выше примере провалов в Березниках исследование сейсмoeлектрических преобразований может помочь выявлению растворения солей еще до начала разрушения пород. Очевидно, что другие свойства пород тоже влияют на параметры автоколебаний, что требует дополнительных исследований. Контроль состояния исследуемой неоднородности может осуществляться путем регистрации пространственно-временных изменений параметров передаточных функции H_S . Измеряемые характеристики – амплитуда, фаза, параметры резонанса, скорость становления отклика.

В заключение можно отметить, что, судя по результатам теоретических и экспериментальных исследований, ме-

тоды активного геоэлектрического и сейсмoeлектрического мониторинга с высокой разрешающей способностью позволят контролировать опасные геологические процессы, вызванные тех-

ногенными воздействиями. Совместное применение этих методов может помочь отслеживать опасные геологические процессы на разных этапах развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камшилин А.Н., Волкова Е.Н., Кравченко В.Б. Авторское свидетельство 1048439 СССР, МКИЗ G 01 V 3/02. Способ измерения временных вариаций удельного сопротивления земли. № 3302854/18 25; заявл. 19.06.1981; опубл. 15.10.1983, Бюл. № 38.
2. Агеева О.А., Светов Б.С., Шерман Г.Х., Шипулин С.В. Сейсмoeлектрический эффект второго рода в горных породах (по данным лабораторных исследований) // Геология и геофизика. – 1990. – Т. 40. – № 8. – С. 1251–1257.
3. Волкова Е.Н., Казначеев П.А., Камшилин А.Н., Попов В.В. Геоэлектрические исследования процессов подготовки провалов грунта // Геофизические исследования. 2013. – Т. 14. – № 3. – С. 64–79.
4. Волкова Е.Н., Камшилин А.Н., Александров С.И., Эфендиев М.И. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 2 / Под ред. Н.П. Лаверова и др. – М.: Научный мир, 1998. – С. 168–174.
5. Волкова Е.Н., Камшилин А.Н. Возбуждение геоэлектрических колебаний и изменение проводимости земли под действием вибрационного источника // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 302. – № 4. – С. 816–818.
6. Волкова Е.Н., Камшилин А.Н. Геоэлектрический мониторинг. Методы, способы и средства / Эффективная и безопасная добыча угля на базе современных достижений геомеханики: международная конференция. – СПб., 1996. – С. 127–130.
7. Волкова Е.Н., Камшилин А.Н. Механоэлектрические преобразователи / Горная геофизика: международная конференция. – СПб., 1998. – С. 486–488.
8. Казначеев П.А. Разработка и исследование комплекса средств активного геоэлектрического мониторинга с использованием локальных измерителей тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых. – М., 2014. – 28 с.
9. Макашов С.Э. Установление закономерностей фильтрации рассолов для решения проблем загрязнения природных вод на верхнекамском месторождении калийных солей (на примере шахтных полей 1-го Березниковского и 3-го Соликамского калийных рудоуправлений): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук: 25.00.07 Гидрогеология. – СПб., 2012. – 24 с.
10. Моисеев С.В., Волкова Е.Н., Гамбурцев А.Г., Камшилин А.Н., Калинина А.В., Харазова Ю.В. Анализ результатов геоэлектрических режимных наблюдений (рудник «Таштагольский») / Горная геофизика: международная конференция. – СПб., 1998. – С. 444–450.
11. Пархоменко Э.И. Основные закономерности сейсмoeлектрического эффекта осадочных пород и пути его использования в геофизике / Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. – М.: Наука, 1978. – С. 200–207.
12. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. – М.: ГЕОС, 2003.
13. 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. 12–14. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Камшилин Анатолий Николаевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: kamshilin@ifz.ru,

Казначеев Павел Александрович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, e-mail: p_a_k@mail.ru, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

ACTIVE GEOELECTRICAL AND SEISMOELECTRICAL MONITORING OF STATE OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT

Kamshilin A.N.¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Researcher, e-mail: kamshilin@ifz.ru,

Kaznacheev P.A.¹, Candidate of Technical Sciences,
Junior Researcher, e-mail: p_a_k@mail.ru,

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

Principles of active geoelectrical and seismoelectrical monitoring are considered in the article. Question of measurement technique optimization by geoelectrical monitoring are considered. The results of experimental investigations of method on laboratorial facility, constructed for research of formation and evolution of underground caverns, are presented. For seismoelectrical monitoring, the results of laboratorial investigation of transformation of seismic energy in electrical energy in rocks are presented. Both forced oscillation mode and self-oscillation mode are considered. Self-oscillation mode appears by formation of positive feedback in system "acoustic transducer – rock sample – measurement electrodes". For example, the results of experiment as very small dose of fluid (sweet water) influences parameters of seismoelectrical transformation are given. The results of experiments with other fluids are reviewed. Resume about ability of application of geoelectrical and seismoelectrical monitoring for geological environment control by anthropogenic impact are made.

Key words: geophysical monitoring, active geoelectrical monitoring, active seismoelectrical monitoring, equipotential technique, sink, laboratory simulation, self-oscillation, fluids.

REFERENCES

1. Kamshilin A.N., Volkova E.N., Kravchenko V.B. Patent of USSR 1048439 G 01 V 3/02, 15.10.1983.
2. Ageeva O.A., Svetov B.S., Sherman G.Kh., Shipulin S.V. *Geologiya i geofizika*. 1990, vol. 40, no 8, pp. 1251–1257.
3. Volkova E.N., Kaznacheev P.A., Kamshilin A.N., Popov V.V. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2013, vol. 14, no 3, pp. 64–79.
4. Volkova E.N., Kamshilin A.N., Aleksandrov S.I., Efendiev M.I. *Atlas vremennykh variatsiy prirodnykh, antropogennykh i sotsial'nykh protsessov*. T. 2. Pod red. N.P. Laverova (Atlas of time variations in natural, anthropogenic and social processes, vol. 2, Laverov N.P. (Ed.)), Moscow, Nauchnyy mir, 1998, pp. 168–174.
5. Volkova E.N., Kamshilin A.N. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1988, vol. 302, no 4, pp. 816–818.
6. Volkova E.N., Kamshilin A.N. *Effektivnaya i bezopasnaya dobycha uglja na baze sovremennykh dostizheniy geomekhaniki: mezhdunarodnaya konferentsiya* (Efficient and safe coal mining based on present-day developments in geomechanics: International Conference), Saint-Petersburg, 1996, pp. 127–130.
7. Volkova E.N., Kamshilin A.N. *Gornaya geofizika: mezhdunarodnaya konferentsiya* (Rock geophysics: International Conference), Saint-Petersburg, 1998, pp. 486–488.
8. Kaznacheev P.A. *Razrabotka i issledovanie kompleksa sredstv aktivnogo geoelektricheskogo monitoringa s ispol'zovaniem lokal'nykh izmeriteley toka* (Development and analysis of geoelectric monitoring package using local current meters), Candidate's thesis, Moscow, 2014, 28 p.
9. Makashov S.E. *Ustanovlenie zakonornostey fil'tratsii rassolov dlya resheniya problem zagryazneniya prirodnykh vod na verkhnekamskom mestorozhdenii kaliynykh soley (na primere shakhnykh poley 1-go Bereznikovskogo i 3-go Solikamskogo kaliynykh rudoupravleniy)* (Finding regular patterns in seepage of brines to handle problems of natural water contamination at the Upper Kama Potash Salt Deposit (in terms of Berezniki Mine 1 and Solikamsk Mine 3)), Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2012, 24 p.
10. Moiseev S.V., Volkova E.N., Gamburtsev A.G., Kamshilin A.N., Kalinina A.V., Kharazova Yu.V. *Gornaya geofizika: mezhdunarodnaya konferentsiya* (Горная геофизика: International Conference), Saint-Petersburg, 1998, pp. 444–450.
11. Parkhomenko E.I. *Fizicheskie svoystva gornykh porod i mineralov pri vysokikh davleniyakh i temperaturakh* (Physical properties of rocks and minerals under high pressures and temperatures), Moscow, Nauka, 1978, pp. 200–207.
12. Khomenko V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* (Mechanisms and prediction of suffusion processes), Moscow, GEOS, 2003.
13. Khomenko V.P., Kamshilin A.N., Kuzichkin O.R., Volkova E.N. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2007, no 11, pp. 12–14.