

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.837

Результаты исследований по разработке аппаратурно-программного обеспечения для наземно-подземного электромагнитного зондирования**В.П. Колесников^а, С.Б. Карпов^а, Т.А. Ласкина^б**^аПермский государственный национальный исследовательский университет
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: vp@uralgeopole.ru^бООО «НПО Уралгеополе», 614025, г. Пермь, ул. Героев Хасана, 68.

E-mail: tl@uralgeopole.ru

(Статья поступила в редакцию 22 апреля 2022 г.)

В данной работе рассмотрены результаты исследований по формированию аппаратурно-программного комплекса для развиваемого метода наземно-подземного электромагнитного зондирования с обеспечением необходимой достоверности и экономической эффективности результатов наблюдений в условиях специфических особенностей практического его применения. Для этого на основе экспериментальных исследований и численного анализа наблюдаемого поля разработан ряд аппаратурных и программных модулей, обеспечивающих взаимосогласованность и синхронизацию во времени функционирования наземного и шахтного аппаратурных блоков с визуальным контролем формы и значений регистрируемого сигнала для используемого набора рабочих частот при заданном режиме полевой съемки и глубине залегания обследуемой толщи пород. Результаты опытных работ, выполненных данным комплексом, показали технологичность и перспективность практического его применения для контроля физического состояния водозащитной толщи пород в условиях соляного месторождения.

Ключевые слова: *электромагнитное поле, наземно-подземное зондирование, рабочие частоты, аппаратурно-программный комплекс.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.2.124

Введение

Одной из актуальных задач при отработке соляных месторождений является осуществление надежного контроля физического состояния водозащитной толщи пород (ВЗТ). Основная причина этого заключается в высокой растворимости соляных пород, при которой любое проникновение слабоминерализованных вод в шахты, вызванное природными и антропогенными факторами, приводит к образованию подземных карстовых полостей, сопровождаемых просадками и провалами земной поверхности (Anderson, Brown, 1992; Andreichuk et al., 2000; Contrucci et al., 2010; Eso et al., 2006; Land, Veni, 2012).

Одной из важных физических величин, весьма чувствительных к пористости, влагосодержанию, степени минерализации водных растворов, наличию газообразований и др.,

сопровождающих процессы соляного карстообразования (Кудряшов, 2001; Boys, 1993), является электрическое сопротивление соляных пород, обладающих возможностью значительного его изменения (в десятки и сотни раз) (Петрофизика, 1992). Однако эффективность использования электрометрии для контроля физического состояния водозащитной толщи пород во многом зависит от информационных возможностей используемых методов электрометрии, их аппаратурных средств, степени влияния и способов снижения различного рода геологических и техногенных помех. Поэтому формирование рационального, достаточно информативного метода требует разработки специальных модификаций методов электрометрии, наиболее учитывающих специфику исследуемого объекта (Колесников, Ласкина, 2020а).

Одним из перспективных в этом направлении является метод наземно-подземного

зондирования (НПЗ), обладающий потенциальными возможностями существенного повышения контрастности отображения аномальных зон, расположенных в области надштрековой водозащитной толщии пород в силу значительного приближения точек измерений поля к исследуемому объекту (Колесников, Ласкина, 2018; Колесников, 2019; Колесников, Ласкина, 2020b). НПЗ представляет собой электромагнитное зондирование геологической среды при расположении источника электромагнитного поля на земной поверхности и регистрации сигнала в пределах шахтных выработок (или наоборот – в модификации подземно-наземного зондирования (ПНЗ)).

Практическая реализация данного нетрадиционного метода требует проведения специального комплексного анализа, включающего разработку физико-математического и программного обеспечения для интерпретации результатов наблюдений, создание специального аппаратурно-программного обеспечения и рациональной технологии выполнения полевых измерений.

В результате ранее выполненных исследований (Колесников, Ласкина, 2020b; Kolesnikov, Laskina, 2021) разработан приближенный способ истолкования результатов наблюдений методом НПЗ, обеспечивающий возможность получения экспресс-информации о наличии зон повышенной нарушенности водозащитных свойств пород надштрековой части разреза, показавший результативность и перспективность его развития.

В данной публикации приведены основные результаты исследований по формированию и реализации необходимого для НПЗ аппаратурно-программного комплекса, наиболее учитывающего специфику и особенности практического применения данного метода в условиях наземно-шахтных измерений с обеспечением необходимой информативности, оперативности и контроля достоверности результатов полевых наблюдений.

Аппаратурно-программное обеспечение

В процессе опытно-методических работ, проводимых с 2018 года, апробирован доста-

точно широкий набор различных вариантов технологии с использованием специально создаваемых аппаратурных модулей, методик, интерпретационных средств с проведением экспериментальных заверочных наблюдений на ряде промышленных участков (Колесников, Ласкина, 2018; Колесников, Ласкина, 2020b; Kolesnikov, Laskina, 2021). Рассмотрим некоторые из них.

Одной из трудностей реализации полевых наблюдений являлась сложность контроля синхронизации генератора и измерителя ввиду расположения одного из них на поверхности, а другого – в шахте. С целью осуществления контроля процесса полевой съемки в режиме реального времени запущен программный модуль Test_FFT, позволяющий контролировать форму регистрируемого сигнала и в оперативном режиме выполнять спектральный анализ регистрируемых данных (рис. 1). Визуализация формы сигнала позволила контролировать соотношение между компонентами магнитного поля и правильность подключения каналов АЦП, а также регулировать величину усиления. Результаты спектрального анализа позволили контролировать корректность работы измерительного модуля, стабильность работы генератора и его синхронизацию с измерителем.

В целях формирования оптимального набора рабочих частот в условиях промышленных помех проведены экспериментальные работы по оценке влияния на результаты наблюдений методом НПЗ электромагнитного поля, создаваемого различными видами шахтного электрифицированного оборудования: комбайном, конвейером (рис. 2), системой обеспечения безопасности. В результате выявлен ряд частот и области их интенсивного проявления в наблюдаемом поле, включающих 50 Гц с наличием и особенностями проявления четных и нечетных ее гармоник, $f = 90, 110$ Гц и др., с областью заметного их проявления до 100–120 м от анализируемого источника. Исходя из этих выявленных особенностей, для снижения влияния промышленных помех выполнена редакция задаваемого аппаратурного набора рабочих частот, наиболее отличающихся от промышленных помех, а также создан ряд дополнительных приемов: разработка аппа-

ратурно-программных средств фильтрации заданного набора частот, повышение мощности генератора для увеличения соотношения «сигнал/помеха», либо исключение выявленной частотной области повышенного влияния помех при интерпретации наблюдений. При формировании оптимального набо-

ра рабочих частот помимо снижения уровня промышленных помех учитывались данные о глубине залегания шахтных выработок, априорная информация и выбранная система наблюдений с использованием численного моделирования (Heagy et al., 2017; Werthmüller, 2017).

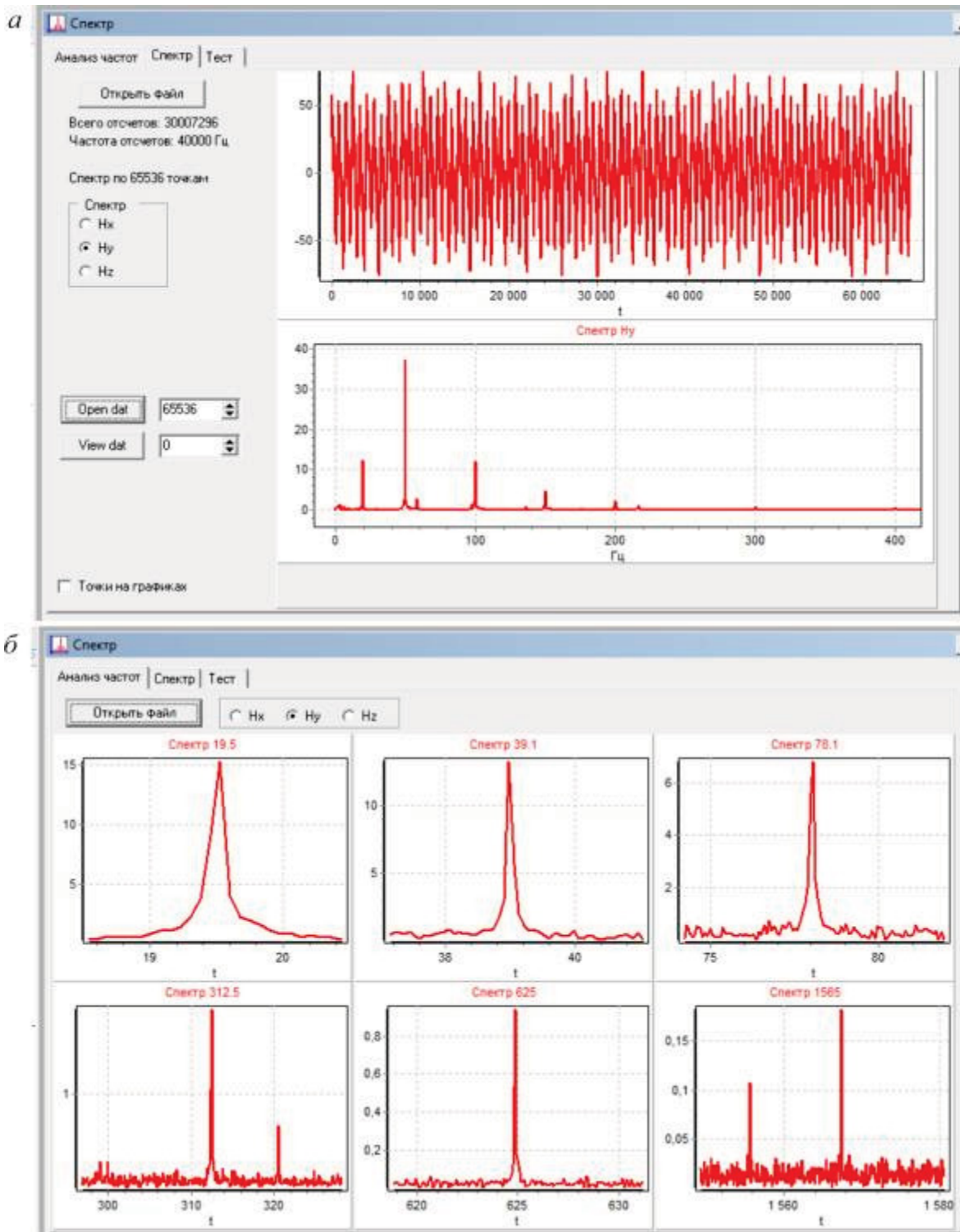


Рис. 1. Модуль контроля процесса полевой съемки с визуализацией формы и спектра сигнала (а) и контролем проявления набора рабочих частот в спектре регистрируемого сигнала (б)

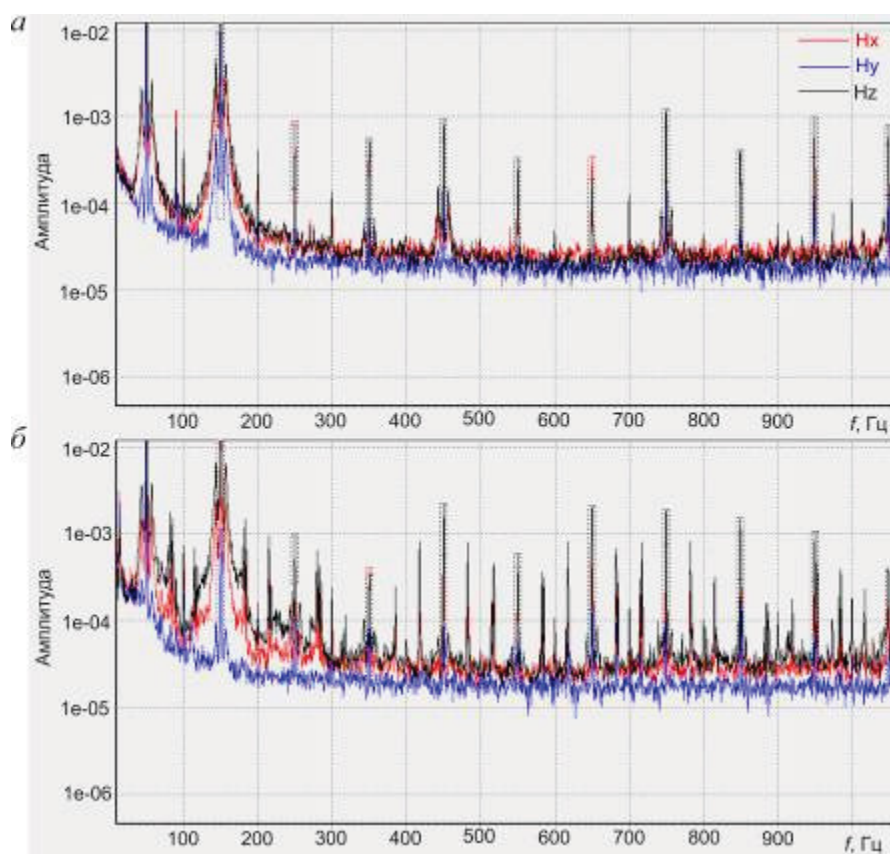


Рис. 2. Примеры спектров зарегистрированного электромагнитного поля при выключенном (а) и включенном (б) конвейере

В целях развития метода НПЗ апробирована его модификация в виде подземно-наземного зондирования (ПНЗ), обладающего по своей природе рядом дополнительных информационных возможностей: 1) выполнение площадных наземных наблюдений с любой детальностью (в отличие от НПЗ) при фиксированном положении подземного источника; 2) обследование определенной области, выходящей за пределы площади расположения шахтных выработок в целях прогнозной оценки физического состояния прилегающих к ним пород.

Одна из трудностей процесса съемки методом ПНЗ связана с реализацией заземления электродов линии АВ в шахтных условиях в связи с высоким электрическим сопротивлением соляных пород. Для решения данной проблемы, помимо применения принципа группирования электродов, апробирована возможность использования индуктивного источника поля в виде замкнутой петли. Поскольку поле индуктивного источника (вертикального диполя) убывает с глу-

биной значительно быстрее (примерно на порядок) по сравнению с гальваническим (линейным) источником (Электроразведка, 1989), это требует повышения мощности генератора, а в данном случае и адаптации к разрабатываемому для линейного источника аппаратно-программному комплексу АНПЗ-1. Для реализации этого использована блочная конструкция генератора поля, включающая три блока: задающий генератор, усилитель мощности (УМ) и излучатель. Особенностью УМ является полная гальваническая изоляция от задающего генератора, что значительно повышает помехозащищенность и надежность работы. При этом могут быть использованы различные режимы генерации поля, в том числе автоматическая последовательность сигналов с разной частотой электромагнитного поля. Напряжение питания разработанного модуля составляет 24–48 В, настройка под выбранное напряжение происходит автоматически. Выходное напряжение имеет форму меандра с амплитудой, равной напряжению питания. Макси-

мальный выходной ток составляет 20 А. Диапазон рабочих частот 0–10 кГц. В модуле предусмотрено измерение напряжения питания и тока нагрузки.

Помимо рассмотренных выше способов для повышения эффективности полевых наблюдений реализована возможность одно-временной съемки с двумя аппаратурно-измерительными комплексами при одном фиксированном положении источника поля. Выполненные экспериментальные работы при этом показали необходимость дополнительной калибровки используемых измерительных модулей для обеспечения идентичности получаемых результатов, что потребовало тестирования на основе проведения лабораторных исследований с использованием изготовленного соленоида. На основе сопоставления данных, полученных разными измерительными модулями, были скорректированы коэффициенты передачи преобразователей магнитной индукции.

Использование двух идентифицированных измерительных комплексов обеспечивает возможность повышения производительности работ (в том числе позволяет сократить количество спусков в шахту для обследования участка), а также достоверности результатов за счет дублированной съемки на контрольных участках.

В итоге проведения предварительных экспериментальных исследований разработан и реализован аппаратурно-программный комплекс АНПЗ-1 (рис. 3), включающий генератор, измеритель с модифицированным трехкомпонентным магнитным датчиком, блок питания и специально созданное программное обеспечение для автоматизации и оптимизации процесса генерирования и регистрации электромагнитного поля с заданным набором частот и расширенными функциональными и информационными возможностями, обеспечивающими: а) выбор необходимого режима генерации электромагнитного поля: с одной рабочей частотой и ее гармониками; одновременной генерации набора из трех рабочих частот; последовательной генерации заданного набора рабочих частот; б) задание необходимого набора рабочих частот (до 10 частот), отличающихся от промышленных волн-помех, и формируемого на

основе предварительного анализа параметрических зондирований для обследования заданной толщи пород; в) увеличение величины шага дискретизации измеряемого поля (до 10–50 кГц) и интервала времени регистрации сигнала каждой из частот на одном пикете (до 25–60 с) в целях повышения информативности результатов измерений.

Выполнена оптимизация технологии площадных наблюдений на основе использования разработанного аппаратурно-программного комплекса АНПЗ-1 и численного моделирования (Heagy et al., 2017; Werthmüller, 2017), обеспечивающих: а) автоматизацию измерительного процесса с использованием синхронизации функционирования генераторного и измерительного модулей в соответствии с заданным режимом и измерительными параметрами; б) численное обоснование размеров информативной области, составляющей порядка 1 км x 1.6 км при используемой питающей линии АВ = 1000 м и величине генерируемого тока $I = 1.5$ А.

Генератор электромагнитного поля АНПЗ-1 (табл. 1, рис. 4) характеризуется максимальной силой тока 2 А при диапазоне основных частот генерируемого сигнала от 0.15 до 5125 Гц. При необходимости увеличения силы тока (в два-три раза) могут быть использованы генераторы повышенной мощности, разработанные в дополнение к аппаратурно-программному комплексу АНПЗ-1. Реализована возможность применения сигнала с одной основной частотой и ее гармониками, а также широкополосного полигармонического сигнала с тремя основными частотами и их гармониками, что значительно повышает эффективность полевых работ.

Также предусмотрена возможность формирования поля на основе автоматически задаваемой последовательности сигналов с одной основной частотой. Генератор может быть использован для работы с заземленной питающей линией как на поверхности, так и в условиях шахтных выработок.

Для работы генератора АНПЗ-1 используется источник питания в виде аккумулятора RT-L150PRO-24 (с номинальным напряжением 24 В и емкостью 75 А·ч).

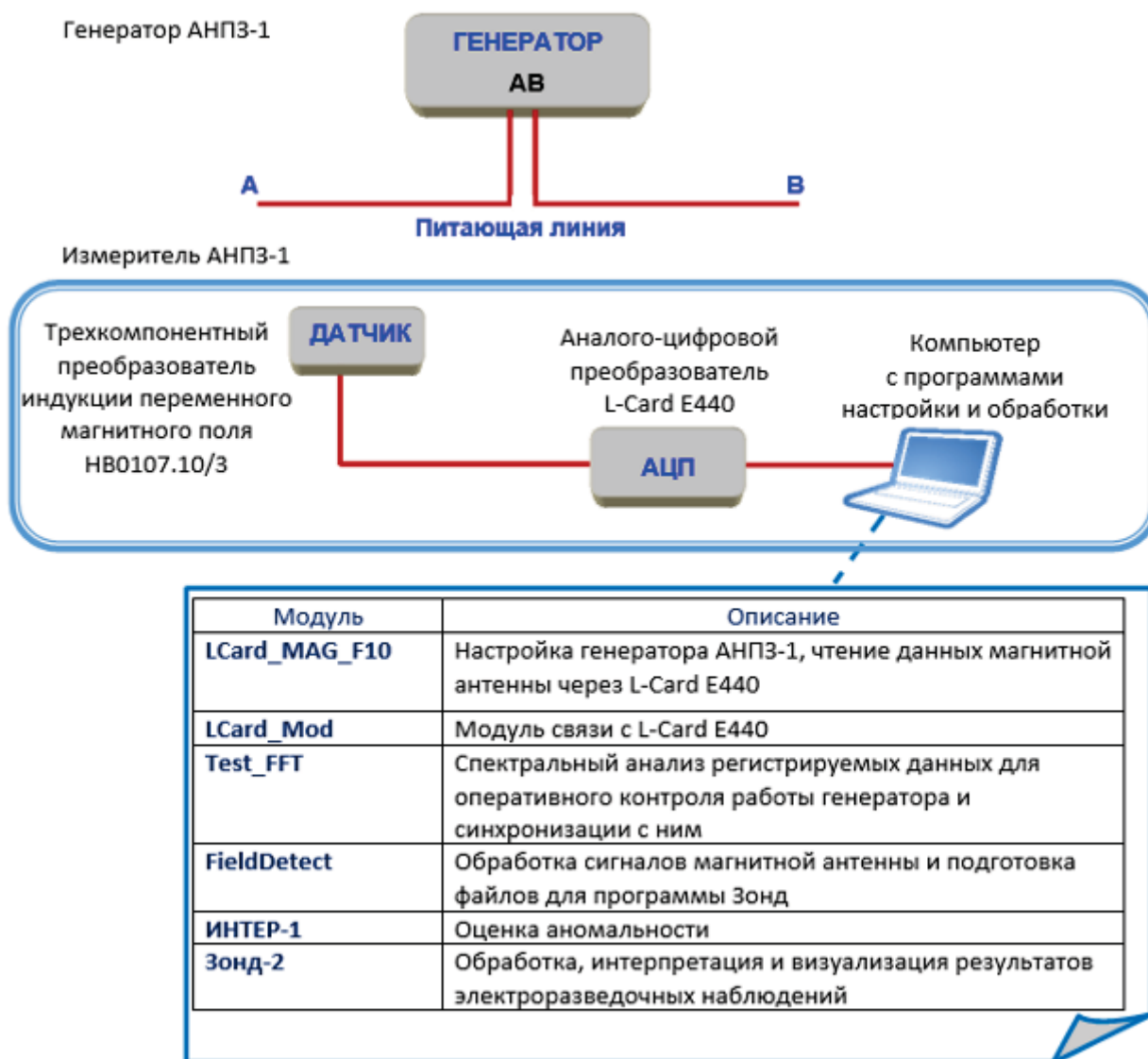


Рис. 3. Блок-схема аппаратно-программного комплекса АНПЗ-1

Он обеспечивает возможность генерации поля в режиме автоматической последовательности сигналов в течение 7–8 часов. Предусмотрена возможность автономной работы генератора в заданный период времени с автоматическим отключением после завершения генерации запрограммированной последовательности сигналов.

Измеритель АНПЗ-1 (рис. 5) включает трехкомпонентный преобразователь индукции переменного магнитного поля NB0107.10/3 (табл. 2), выполненный с необходимыми параметрами применительно к методу НПЗ (в контакте с ООО «Магнитные приборы», г. Санкт-Петербург),



Рис. 4. Генератор АНПЗ-1

Таблица 1. Технические характеристики генератора АНПЗ-1

1	Максимальное выходное напряжение (мощность до 300 Вт)	300 В
2	Значение выходного тока	50; 100; 200; 500; 1000; 1500; 2000 мА
3	Форма выходного напряжения – «меандр» (прямоугольные разнополярные импульсы без паузы, форма 0), либо прямоугольные разнополярные импульсы разной длительности в периоде основной частоты без постоянной составляющей, (форма 1-3)	0.15; 0.30; 0.61; 1.22; 2.44; 4.88; 9.76; 19.5; 39.0; 78.0; 156.0; 312.5; 625; 780; 1250; 1565; 2500; 3125; 5125 Гц
4	Погрешность стабилизации при активной нагрузке, не более	1%
5	Напряжение питания (встроенный литий-ионный аккумулятор)	15.2 В (допустимый диапазон напряжений от 16.8 до 12 В)
6	Емкость встроенного аккумулятора	2.6 А·час
7	Радиоканал для дистанционного управления	868 МГц
8	Bluetooth 4 для дистанционного управления	
9	Степень защиты от воздействия окружающей среды	IP65
10	Диапазон рабочих температур	от –30 до +50 °С
11	Габариты, не более:	160x80x55 мм
12	Масса, не более:	0.95 кг
13	Генератор выполнен в ударопрочном корпусе из поликарбоната	

аналого-цифровой преобразователь L-Card E440, блок питания, ноутбук с программным обеспечением для синхронизации с генератором и регистрации магнитного поля. (Этот достаточно компактный по объему измерительный комплекс по весу составляет не более 3 кг.) При использовании разработанного измерительного комплекса обеспечивается достаточно высокая частота дискретизации регистрируемого сигнала (до 50 кГц), необходимая для расширения диапазона исполь-

зуемых частот и повышения детальности исследования измеряемого поля.

Разработанное *программное обеспечение* комплекса АНПЗ-1 позволяет выполнять настройку генератора и измерителя: выбирать режим генерации поля, задавать количество и значения используемых частот, время генерации каждой из них, длительность паузы для перехода между пикетами, а также осуществлять их синхронизацию по времени.

Таблица 2. Характеристики трехкомпонентного преобразователя НВ0107.10/3

Наименование характеристики	Ед. измерения	Значение
Рабочий диапазон индукции переменного магнитного поля	нТл	120
Рабочий диапазон частоты	Гц	3-10000
Коэффициент передачи	мВ/нТл	53
Напряжение питания	В	±10
Ток потребления сборки	мА	18
Габариты датчика преобразователя	мм	250x250x330
Масса датчика преобразователя	кг	1,5

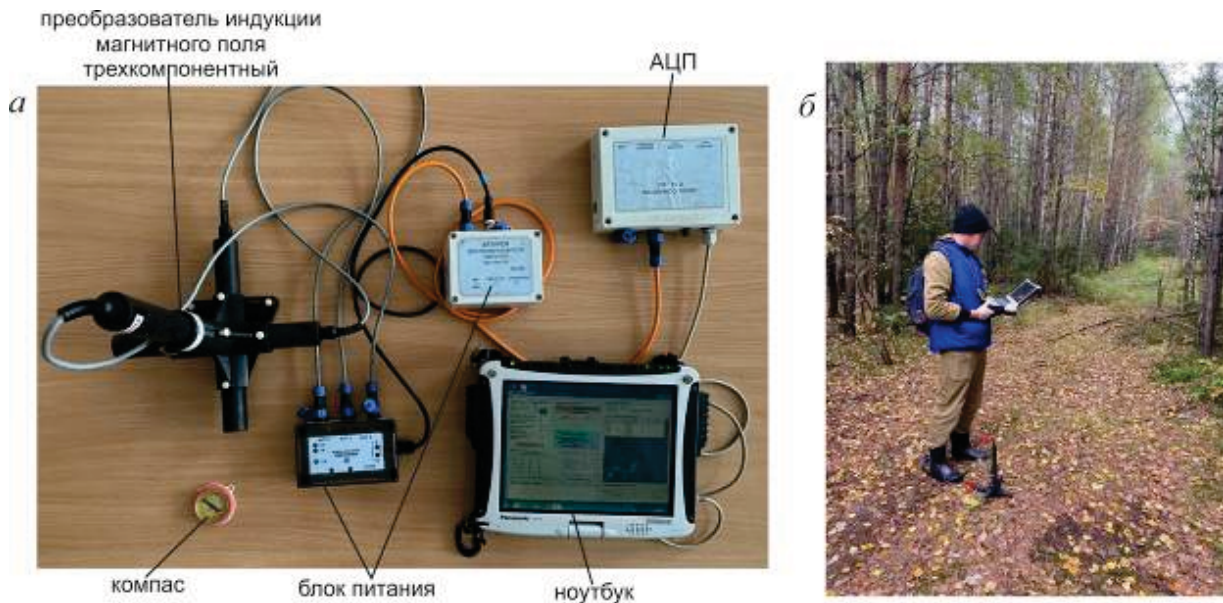


Рис. 5. Аппаратура и оборудование для регистрации магнитного поля (а) и процесс полевой съемки методом ПНЗ (б)

Общая схема съемки методом наземно-подземного зондирования с использованием разработанного аппаратурного и программного обеспечения включает:

- 1) настройку аппаратурного комплекса (до спуска в шахту);
- 2) установку источника электромагнитного поля на земной поверхности;
- 3) спуск в шахту и проведение профильных либо площадных наблюдений вдоль заданных штреков в пределах шахтного поля.

Настройка аппаратурного комплекса, выполняемая в подготовительный перед съемкой период, содержит следующие операции:

а) выбор режима генерации электромагнитного поля (с одной рабочей частотой и ее гармониками; единовременной генерации набора из трех рабочих частот; последовательной генерации заданного набора рабочих частот);

б) задание необходимых значений частот из общего их набора, заложенного в аппаратурный комплекс, на основе предварительного анализа параметрических зондирований для обследуемого участка;

в) задание величины шага дискретизации измеряемого поля (от 10 до 50 кГц) и интервала времени регистрации сигнала каждой из частот на одном пикете (от 20 до 60 с);

г) выполнение синхронизации по времени измерительного и генерируемого аппаратурных модулей;

д) задание интервала времени для перемещения оператора между соседними пикетами (в аппаратуре предусмотрено автоматическое отключение генератора во время перехода на очередной пикет для обеспечения экономичности использования источника питания (в два-три раза по сравнению с вариантом непрерывной генерации поля в течении полевой съемки).

Реализация генераторной установки на земной поверхности включает:

а) подготовку питающей линии АВ;

б) подключение генератора к питающей линии и задание необходимой величины тока путем формирования оптимальных значений переходного сопротивления заземлений питающей линии R;

в) запуск генератора в заданное, синхронизированное с измерителем, время начала наземно-подземных наблюдений (процесс генерации может выполняться в автоматическом режиме без участия оператора в течение 7–8 часов).

Шахтная съемка выполняется с регистрацией трех компонент магнитного поля (B_x , B_y , B_z). Она начинается автоматически в заданное при начальной настройке аппаратурного комплекса время с последующей визуализацией и контролем процесса измерений, а также оповещением о времени перехода на следующий пикет, с перемещением измерительного комплекса. При этом X-компонента

магнитного датчика ориентируется вдоль направления питающей линии.

Аналогичный процесс осуществляется и для варианта подземно-наземного зондирования (ПНЗ), выполняемого при расположении источника в пределах шахтных выработок с проведением площадной съемки на земной поверхности.

При исследовании с фиксированным положением источника поля и использованием набора из шести частот генерируемого электромагнитного поля с длительностью генерации каждой из них 25 с и расстоянием между пикетами съемки 50 м время, необходимое для регистрации данных на одном пикете и для перехода на следующий, в целом составляет 5 минут. Таким образом, производительность работ составляет 12 точек в час при выполнении измерений одной бригадой из двух человек и может быть увеличена при одновременной съемке двумя бригадами по два человека до 24 точек в час.

Обработка наблюдаемых данных

Данные, полученные в процессе полевых измерений, представляют собой временные ряды для трех каналов в отсчетах АЦП на каждой точке наблюдения. Записи разделены на субпакеты в зависимости от частот генерации поля в соответствии с проводимым экспериментом. Также файлы содержат информацию о параметрах съемки (номер профиля и пикета, дата и время выполнения измерений, частота дискретизации сигнала, количество частот, коэффициент АЦП).

Алгоритмы обработки данных адаптированы к формату полевых записей, получаемых при использовании автоматической последовательности сигналов с разными частотами, и реализованы в программе FieldDetect. Это позволяет исключить необходимость конвертации данных и значительно повысить степень автоматизации процесса обработки.

Также усовершенствован способ выделения полезного сигнала с использованием синхронного детектирования и автоматического выбора интервала с минимальным уровнем помех для определения амплитуды

полезного сигнала. Программа позволяет вычислять и отображать спектры сигналов компонент для каждого субпакета, а также проводить синхронное детектирование на рабочей частоте субпакета и дальнейшую фильтрацию с помощью фильтра низких частот высокого порядка. Детектированный сигнал для каждой частоты эксперимента разбивается на сегменты, в каждом из них оценивается отношение «сигнал/шум» и выбирается сегмент с лучшими параметрами.

Результатом обработки являются амплитуды измеряемых компонент магнитного поля V_x , V_y , V_z и полного вектора магнитной индукции B для набора используемых частот на каждой точке наблюдения, которые далее используются для расчета интерпретационных параметров.

Экспорт полученных данных осуществляется в формате «data.dta» для их визуализации в программе Зонд, а также в «data.csv» для дальнейшей оценки параметра аномальности магнитного поля в программе ИНТЕР-1.

Пример полевых работ

Процесс разработки и совершенствования рассмотренных выше результатов исследований сопровождался применением различных способов их тестирования, включая использования двух взаимно идентифицированных аппаратурно-измерительных комплексов с проведением экспериментальных исследований на контрольном участке, а также использования гальванического и индуктивного источников поля и сопоставление полученных данных с результатами численного моделирования.

Разработанный аппаратурно-программный комплекс и технология его применения для метода ПНЗ были апробированы на ряде участков в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей. Фрагменты экспресс-интерпретации по одному из них представлены на рис. 6–8. В этом случае съемка была выполнена при расположении заземленной питающей линии АВ длиной 1 км в шахтной выработке на глубине 375 м. Сила тока в питающей линии составляла 1.5 А.

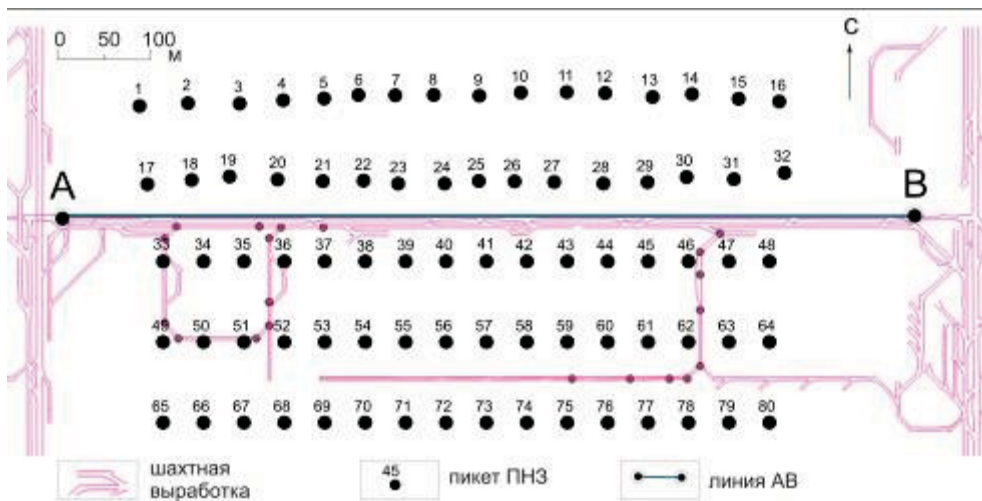
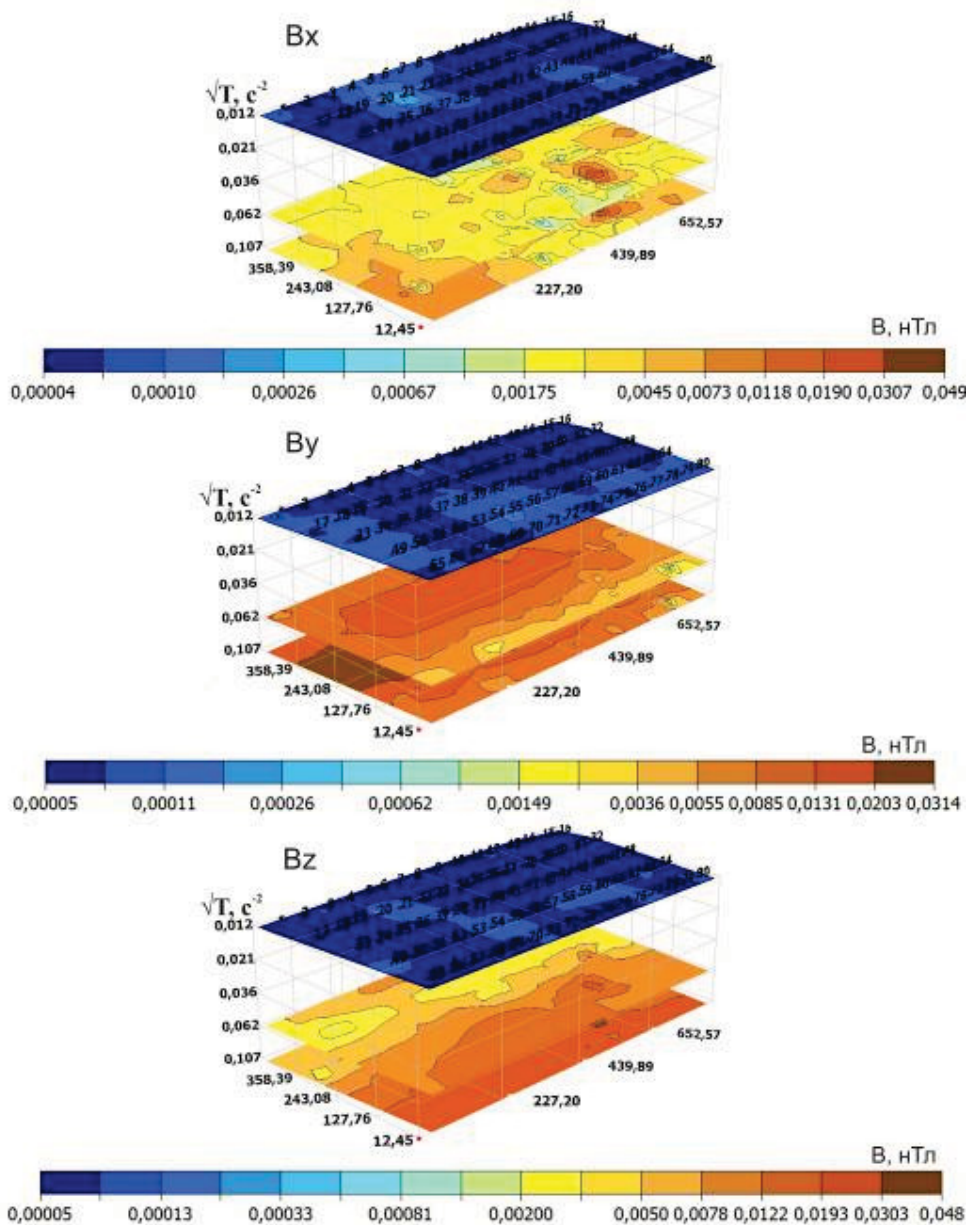


Рис. 6. Схема участка работ методом ПНЗ



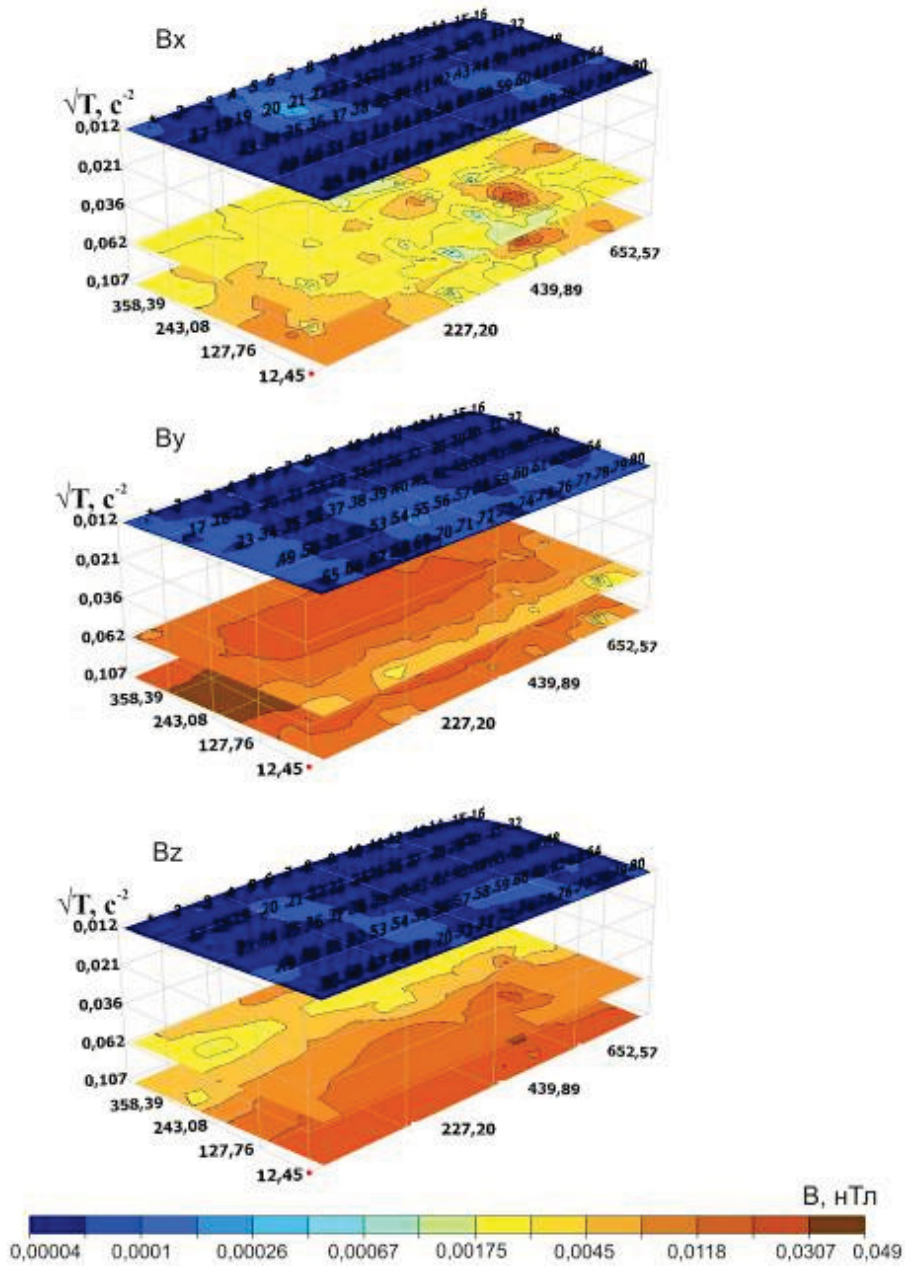


Рис. 7. Визуализация пространственного изменения компонент магнитного поля, полученных в результате полевых измерений и первичной обработки наблюдаемых данных

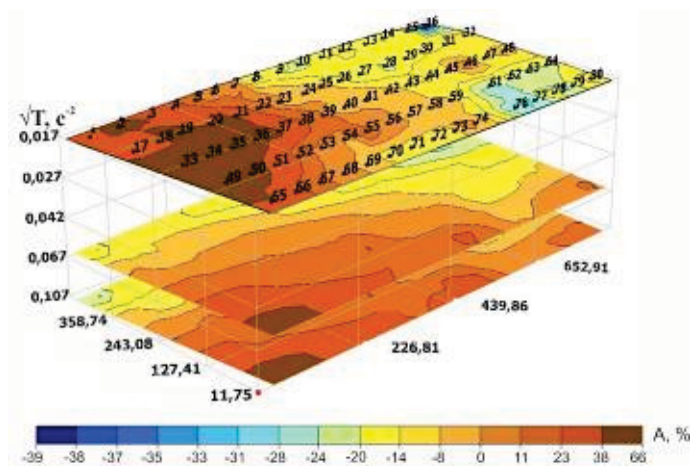


Рис. 8. Оценка параметра аномальности с использованием программного комплекса ИНТЕР1-ЗОНД

Поле генерировалось в режиме автоматической последовательности сигналов с различной частотой (39, 78, 312, 625, 1565 и 3125 Гц). Время генерации поля на одной частоте – 25 с; общее время генерации поля на шести частотах – 155 с; пауза для перехода на следующий пикет – 145 с. Регистрация проводилась на земной поверхности по сети профилей (рис. 6). Общее время регистрации поля на одном пикете с переходом на следующий пикет – пять минут.

Компонента H_x ориентирована вдоль профиля наблюдений (параллельно питающей линии). Отработано пять профилей субширотного направления по 16 пикетов. Общее число пикетов составило 80 на площади 400x750 м. Расстояние между профилями – 100 м, между пикетами – 50 м. Полевые наблюдения были выполнены одной бригадой в условиях залесенной местности. Общее время съемки составило семь часов.

В процессе обработки наблюденных данных выполнена оценка амплитуды трех ортогональных компонент магнитного поля B_x , B_y , B_z (рис. 7). Результатом экспресс-интерпретации полученных материалов является оценка параметра аномальности (рис. 8) (Kolesnikov, Laskina, 2021). Визуализация выполнена в системе Зонд (Колесников, 2016).

В целом, полученные данные свидетельствуют о понижении сопротивления присоляной части пород в северо-восточной части участка, что согласуется с априорной информацией и результатами исследований другими геофизическими методами.

Выводы

Основные результаты выполненных исследований по разработке аппаратурно-программного комплекса АНПЗ-1 для развиваемого метода наземно-подземного зондирования сводятся к следующему:

1. Разработаны способы и программы, обеспечивающие синхронизацию и оперативный контроль функционирования наземного и подземного аппаратурных модулей с контролем процесса полевой съемки в режиме реального времени с визуализацией результатов спектрального

анализа регистрируемого поля в каждой точке наблюдений.

2. Для повышения информативности полевых наблюдений выполнены экспериментальные работы по оценке влияния на результаты измерений промышленных электромагнитных полей, создаваемых наземными и различного рода шахтными источниками, в виде комбайна, конвейера, системы обеспечения безопасности и др., что позволило выявить области наиболее интенсивного проявления волн-помех и оптимизировать формирование рабочих частот генерируемого электромагнитного поля. Вместе с тем усовершенствован способ выделения полезного сигнала с использованием синхронного детектирования и автоматического выбора интервала с минимальным уровнем помех для определения амплитуды полезного сигнала.

3. В целях развития метода наземно-подземного зондирования реализована его модификация в виде подземно-наземного зондирования, обладающего рядом дополнительных информационных возможностей: а) выполнение площадных наземных наблюдений с любой детальностью (в отличие от НПЗ) при фиксированном положении подземного источника; б) обследование определенной области, выходящей за пределы площади расположения шахтных выработок в целях прогнозной оценки физического состояния примыкающих к ним пород.

4. Ввиду затруднительного гальванического способа заземления электродов в условиях соляных пород, обладающих весьма высоким электрическим сопротивлением, для обеспечения необходимой технологичности создан и апробирован вариант аппаратурного комплекса с использованием индуктивного источника электромагнитного поля, показавший положительные результаты его применения.

5. Для повышения оперативности работ и осуществления дополнительного контроля полевых наблюдений реализован вариант одновременной съемки с двумя аппаратурно-измерительными комплексами при фиксированном положении источника поля с их взаимной идентификацией на основе

использования экспериментальных полевых наблюдений и лабораторного тестирования для определения коэффициентов передачи преобразователей магнитной индукции.

6. Реализован программный модуль для обработки наблюдаемых данных с последующей передачей результатов в интерпретационный комплекс ИНТЕР1-ЗОНД, повышая технологичность и значительно ускоряя аппаратурно-измерительный и интерпретационный процесс с визуализацией разрезов, карт и объемных отображений анализируемых величин.

В итоге проведенных исследований создан рабочий вариант аппаратурно-программного комплекса АНПЗ-1 для практического применения развиваемого метода наземно-подземного зондирования. Результаты экспериментальных работ с использованием данного комплекса, выполненных на ряде участков ВКМС для контроля физического состояния ВЗТ, показали результативность и перспективность практического его применения в условиях соляного месторождения с возможностью проведения полевых наблюдений в сложных геоморфологических, физико-геологических и техногенных условиях обследуемой территории.

Благодарности

Авторы данной публикации выражают искреннюю благодарность сотрудникам ООО «НПП Интромаг», а также к.ф.-м.н. Михайловскому А.Г. за проявленный интерес к нашей работе, поддержку, полезные консультации и помощь в практической реализации разрабатываемого аппаратурно-программного комплекса.

Библиографический список

Колесников В.П. Электрометрия. Теоретические основы методов электрометрии: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т. 2019. 263 с.

Колесников В.П., Ласкина Т.А. Разработка и реализация метода низкочастотного наземно-подземного зондирования // Вестник Пермского университета. Геология. 2018. Т. 17, № 3. С. 284–291. DOI: 10.17072/psu.geol.17.3.284.

Колесников В.П., Ласкина Т.А. Комплексный электроразведочный мониторинг процессов соляного карстообразования // Геофизика. 2020а. № 5. С. 39–49.

Колесников В.П., Ласкина Т.А. Наземно-подземное электромагнитное зондирование в условиях соляных месторождений // Инженерная и рудная геофизика 2020. 2020б. 21 с. DOI: 10.3997/2214-4609.202051035.

Колесников В.П. Интерпретация электрических зондирований с использованием системы программ ЗОНД. Пермь: Изд-во ПГНИУ. 2016. 212 с.

Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. Пермь: ГИ УрО РАН. 2001. 429 с.

Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра. 1992. 391 с.

Электроразведка: Справочник геофизика: в 2 кн. / под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М.: Недра. 1989. 438 с.

Andreichuk V., Eraso A., Domigues M.C. A large sinkhole in the Verchnekamsky potash basin in the Urals // Mine water and the Environment. 2000. 19(1). P. 2–18.

Anderson N.L., Brown R.J. Dissolution and deformation of rock salt, Stettler area, Southeastern Alberta // Canadian Journal of Exploration Geophysics. 1992. 28. P. 128–136.

Boys C.A. Geological Approach to Potash Mining Problems in Saskatchewan, Canada // Exploration & Mining Geology. 1993. 2. P. 129–138.

Contrucci I., Klein E., Bigarre P., Lizeur A., Lomax A. and Bennani M. Management of Post-mining Large-scale Ground Failures: Blast Swarms Field Experiment for Calibration of Permanent Microseismic Early-warning Systems // Pure and Applied Geophysics. 2010. 167. P. 43–62.

Eso R.A., Oldenburg D.W., Maxwell M. Application of 3-D electrical resistivity imaging in an underground potash mine // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2006. P. 629–632.

Heagy L.J., Cockett R., Kang S., Rosenkjaer G.K., Oldenburg D.W. A framework for simulation and inversion in electromagnetics // Computers & Geosciences. 2017. 107. P. 1–19. doi:10.1016/j.cageo.2017.06.018.

Kolesnikov V.P., Laskina T.A. On the development and method of ground-underground probing for the study of the physical state of the overhead strata of rocks // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. 2021. P. 217–223. DOI 10.34660/INF.2021.17.68.031.

Land L., Veni G. Electrical resistivity surveys of anthropogenic karst phenomena, southeastern New

Mexico // New Mexico Geology. 2012. 34. P. 117–125.

Werthmüller D. An open-source full 3D electro-

magnetic modeler for 1D VTI media in Python: em-pymod // Geophysics. 2017. 82(6). P. WB9–WB19. DOI: 10.1190/geo2016-0626.1.

Results of the Research on Development of the Hardware-Software Complex for Surface-to-Mine Electromagnetic Sounding

V.P. Kolesnikov^a, S.B. Karpov^a, T.A. Laskina^b

^a Perm State University, , 15 Bukireva Str., Perm 614068, Russia. E-mail: vp@uralgeopole.ru

^b Uralgeopole, 68 Geroev Hasana Str., Perm 614025, Russia. E-mail: tl@uralgeopole.ru

Results of the research on development of the hardware-software complex for surface-to-mine electromagnetic sounding is considered in the paper. It taking into account its effectiveness, informativeness and peculiarities of its practical implementation. On the base of experimental studies and numerical analysis, the hardware and software modules providing synchronization of the transmitter and receiver, visual inspection of the measured signal including its frequency structure and amplitudes during the field observations with specified parameters was developed. Results of the experimental studies using the hardware-software complex showed technological effectiveness and prospects of its practical implementation to control physical state of the water protective strata over the salt mines.

Key words: *electromagnetic field, surface-to-mine sounding, operating frequencies, hardware-software complex.*

References

Kolesnikov V.P. 2019. Elektrometriya. Teoreticheskie osnovy metodov elektrometrii [Electrometry. Theoretical basis of the electrometry methods]. PGU, Perm, p. 263. (in Russian)

Kolesnikov V.P., Laskina T.A. 2018. Razrabotka i realizatsiya metoda nizkochastotnogo nazemno-podzemnogo zondirovaniya [Development and application of the surface-mine low-frequency sounding technique]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 17(3):284–291. doi: 10.17072/psu.geol.17.3.284. (in Russian)

Kolesnikov V.P., Laskina T.A. 2020a. Kompleksnyy elektrorazvedochnyy monitoring protsessov solyanogo karstobrazovaniya [Complex electrical monitoring of salt karst processes]. Geofizika. 5:39–49. (in Russian)

Kolesnikov V.P., Laskina T.A. 2020b. Nazemno-podzemnoe elektromagnitnoe zondirovanie v usloviyakh solyanykh mestorozhdeniy [Surface-to-mine electromagnetic sounding under the conditions of salt deposits]. Inzhenernaya i rudnaya geofizika p. 21. doi: 10.3997/2214-4609.202051035. (in Russian)

Kolesnikov V.P. 2016. Interpretatsiya elektricheskikh zondirovaniy s ispolzovaniem sistemy programm ZOND [Interpretation of the electrical sounding data using the ZOND program system]. Izd. PGU, Perm, p. 212. (in Russian)

Kudryashov A.I. 2001. Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley [Upper Kama salt deposit]. GI UrO RAN, Perm, p. 429. (in Russian)

Petrofizika [Petrophysics]. Spravochnik. V trekh knigakh. Kniga pervaya. Gornye porody i poleznye iskopaemye. Ed. N.B. Dortman. Nedra, Moskva, p. 391. (in Russian)

Elektrorazvedka [Electrical prospecting]: Spravochnik geofizika. Eds. V.K. Hmelevskoy, V.M. Bondarenko. Nedra, Moskva, p. 438. (in Russian)

Andreychuk V., Eraso A., Domigues M.C. 2000. A large sinkhole in the Verkhnekamsky potash basin in the Urals. Mine water and the Environment. 19(1):2–18.

Anderson N.L., Brown R.J. 1992. Dissolution and deformation of rock salt, Stettler area, Southeastern Alberta. Canadian Journal of Exploration Geophysics. 28:128–136.

Boys C.A. 1993. Geological Approach to Potash Mining Problems in Saskatchewan, Canada. Exploration & Mining Geology. 2:129–138.

Contrucci I., Klein E., Bigarre P., Lizeur A., Lomax A., Bennani M. 2010. Management of Post-mining Large-scale Ground Failures: Blast Swarms Field Experiment for Calibration of Permanent Microseismic Early-warning Systems. Pure and Applied Geophysics. 167:43–62.

Eso R.A., Oldenburg D.W., Maxwell M. 2006. Application of 3-D electrical resistivity imaging in an underground potash mine. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 629–632.

Heagy L.J., Cockett R., Kang S., Rosenkjaer G.K., Oldenburg D.W. 2017. A framework for simulation and inversion in electromagnet-

ics. *Computers & Geosciences*. 107:1–19. doi:10.1016/j.cageo.2017.06.018.

Kolesnikov V.P., Laskina T.A. On the development and method of ground-underground probing for the study of the physical state of the overhead strata of rocks. *In: Scientific research of the SCO countries: synergy and integration*, pp. 217–223. doi: 10.34660/INF.2021.17.68.031.

Land L, Veni G. 2012. Electrical resistivity surveys of anthropogenic karst phenomena, southeastern New Mexico. *New Mexico Geology*. 34:117–125.

Werthmüller D. 2017. An open-source full 3D electromagnetic modeler for 1D VTI media in Python: empymod. *Geophysics*. 82(6): WB9–WB19. doi: 10.1190/geo2016-0626.1.