МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский Национальный Исследовательский Технический университет имени К.И.Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова

Кафедра «Геофизика и Сейсмология»

Асемов Камбар Мустафаевич

Эффективность инженерно-геофизических изысканий и оценка целостности гидротехнических сооружений на примере плотины водохранилища К-25 в Алматинской области

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07105 – «Нефтегазовая и рудная геофизика»

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова Кафедра «Геофизика и Сейсмология»

УДК 550.837, 550.834

На правах рукописи

Асемов Камбар Мустафаевич

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	"Эффективность инженерно-геофизических изысканий и
	оценка целостности гидротехнических сооружений на
	примере плотины водохранилища К-25 в Алматинской
	области"
Направление подготовки	7М07105 "Нефтегазовая и рудная геофизика"

Научный руководитель доктор геол.-мин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член-корреспондент Академии минеральных ресурсов РК

Абетов А.Е. 2025г. << **>>** Рецензент TEXHUKA кандидат теол.-мин наук Ахметжанов А.Ж. OF GEOLOGY 2025г. Нормоконтроль ECHNICALU Магистр технических наук Асирбек Н.А. *Ю*» <u>06</u> 2025 г.



Алматы 2025 год

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова

Кафедра «Геофизика и Сейсмология»

7М07105 "Нефтегазовая и рудная геофизика"



ЗАДАНИЕ на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Асемову Камбару Мустафаевичу

Тема "Эффективность инженерно-геофизических изысканий и оценка целостности гидротехнических сооружений на примере плотины водохранилища К-25 в Алматинской области"

Утверждена приказом № 548 – П/Ө от 04 декабря 2023 года

Срок сдачи законченной диссертации 25 июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Архивные данные по плотине водохранилища К-25, информация и сведения из открытых источников о работах в области исследования, связанной с темой диссертации.

Этапность выполнения магистерской диссертации:

а) сбор информации о районе проведения исследований, сведений административного, физико-географического характера, об инфраструктурных особенностях, геологической, геофизической и буровой изученности и объекте исследований;

б) оценка полноты и достоверности собранных первичных данных;

в) анализ опыта организации безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений в различных странах ближнего и дальнего зарубежья и основных причин потери устойчивости гидротехнических сооружений на основании работ отечественных и зарубежных исследователей;

г) изучение физических основ применения геофизических методов для целей исследования;

д) подбор рационального геофизического комплекса для проведения исследований на объекте в геологических условиях Казахстана для решения задач по изучению состояния гидротехнических сооружений и прогнозированию их состояния;

е) полевые исследовательские работы на плотине водохранилища К-25 в Алматинской области с использованием электроразведочных методов, сейсмической разведки методов КМПВ-МРВ и георадарного зондирования;

ж) обработка и интерпретация полученных геофизических данных с использованием современных программных продуктов (V-master, Vista-65, SeiSee, X-Tomo, Surfer) с построением по их результатам профильных и площадных моделей;

з) комплексная интерпретация результатов применения геофизических методов и построение схемы фильтрационной обстановки плотины водохранилища К-25;

и) оценка информативности полученных результатов при изучении неоднородности тела гидротехнического сооружения по водопроницаемости в геоэлектрических параметрах;

к) подготовка рекомендаций по дальнейшему поэтапному изучению состояния гидротехнических сооружений геофизическими методами.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): Представлены 36 слайдов презентации магистерской работы.

Рекомендуемая основная литература:

1 Хмелевской В.К. Электроразведка, изд. 2-е. – Москва: издательство Московского Университета, 1984. - 422 с.

2 Владов М.Л., Старовойтов А.В. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач/. Москва: ГДС Продакшен, 1998. - 66 с.

3 Гурвич И.И., Боганик П.Н. Сейсмическая разведка. – 3-е изд.–Москва: Недра, 1980. – 324 с.

4 Справочник геофизика. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. – Москва: Недра, 1984. - 455 с.

5 Zhang L. M., Xu Y., Jia J. S. Analysis of earth dam failures - A database approach // ISGSR2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, Tongji University, China, - 2007.

6 Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии // Под ред. М.И. Финкельштейна. – Москва: Недра, 1986. – 128 с.

7 Camarero P.L., Moreira C.A. Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique // REM – International Engineering Journal. – 2017. – V. $70. - N_{\odot} 1$.

8 Fatoba J.O., Eluwole A.B., Ademilua O.L, Sanuade O.A. Evaluation of subsurface conditions by geophysical methods at Ureje Earth Dam Embankment, Ado-Ekiti, Southwestern Nigeria – a case study // Indian Journal of Geosciences. – 2018. – V. 72. – № 4. – P. 275–282.

9 Пригара А.М., Татаркин А.В., Пенский О.Г., Осовецкий Б.М., Коноплев А.В. Определение физико-механических свойств грунтов при оценке гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля // Научный журнал КубГАУ, – 2012. – № 84(10). – с.168-180.

10 Nwokebuihe S.C., Alotaibi A.M., Elkrry A., Torgashov E.V., Anderson N.L Dam seepage investigation of an Earthfill Dam in Warren County, Missouri using geophysical methods // AIMS Geosciences. -2017. - V. 3 (1). - P. 1-13.

11 Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. – Москва: Недра, 1979. – 143 с.

12 Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие /А.В. Старовойтов. /ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет»/ – Москва: Изд-во МГУ, 2000. -192 с.

ГРАФИК подготовки магистерской диссертации

N⁰	Наименование разделов, перечень	Сроки	Примещение
п/п	разрабатываемых вопросов	представления	примечание
		научному	
		руководителю	
1	Общие сведения о районе	16.01.2025	
	проведения исследовательских работ		
	и объекте изучения		
2	Анализ зарубежного и	30.01.2025	
	отечественного опыта организации		
	безопасной эксплуатации ГТС и		
	применения геолого-геофизических		
	методов для изучения строения ГТС		
	и прогнозированию их состояния		
3	Методология и методика	12.02.2025	
	проведения исследований по оценке		
	состояния гидротехнических		
	сооружений	04.00.0005	
4	Определение физической	04.03.2025	
	основы применения геофизических		
	методов	10.02.2025	
Э	Оценка выоранного аппаратно-	19.03.2025	
	методического комплекса и полноты		
6	имеющейся оазы данных	28 02 2025	
0	Синтез и анализ результатов	28.05.2025	
	полевых работ на плотине		
	лефицита первичной информации		
7	Изучение результатов	16 04 2025	
,	обработки и интерпретации	10.01.2020	
	геофизических ланных. построение		
	карт графиков и изолиний		
8	Моделирование и создание	30.04.2025	
	физико-геологических моделей		
	гидротехнического сооружения		
9	Оценка связи и степени	08.05.2025	
	применимости физико-		
	геологических моделей к реальным		
	ГТС и определение путей		
	фильтрации через тело ГТС		
10	Разработка рекомендаций по	15.05.2025	
	дальнейшему поэтапному изучению		
	состояния гидротехнических		
	сооружении геофизическими		
11	методами	27.05.2005	
	Написание разделов	27.05.2005	
	диссертации «Введение»,		
1	«заключение» и «содержание»		

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

№ п/п	Наименования разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
1	Общие сведения о районе проведения исследовательских работ и объекте изучения	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных	21.01.2025	Ang .
2	Анализ зарубежного и отечественного опыта организации безопасной эксплуатации ГТС и применения геолого- геофизических методов для изучения строения ГТС и прогнозированию их состояния	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных ресурсов РК	02.02.2025	Comp
3	Методология и методика проведения исследований по оценке состояния гидротехнических сооружений	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных ресурсов РК	17.02.2025	Burg
4	Определение физической основы применения геофизических методов	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных ресурсов РК	11.03.2025	King
5	Оценка выбранного аппаратно-методического комплекса и полноты имеющейся базы данных	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Акалемии минеральных	24.03.2025	Walt

		ресурсов РК	He	
6	Синтез и анализ результатов полевых работ на плотине водохранилища К-25 в условиях дефицита первичной информации Изучение результатов обработки и интерпретации	ресурсов РК А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных ресурсов РК А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук,	02.04.2025 21.04.2025	Burgs
	геофизических данных, построение карт графиков и изолиний	профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных ресурсов РК		Astrony
8	Моделирование и создание физико- геологических моделей гидротехнического сооружения	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных ресурсов РК	05.05.2025	18mm
9	Оценка связи и степени применимости физико-геологических моделей к реальным ГТС и определение путей фильтрации через тело ГТС	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных ресурсов РК	12.05.2025	John wards
10	Разработка рекомендаций по дальнейшему поэтапному изучению состояния гидротехнических сооружений геофизическими методами	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии наук РК, член- корреспондент Академии минеральных ресурсов РК	20.05.2025	Burk
11	Написание разделов диссертации «Введение», «Заключение» и «Содержание»	А. Е. Абетов, доктор геолмин. наук, профессор, академик Национальной академии	31.05.2025	Ming

		наук РК, член-	-	
		корреспондент		
		Академии минеральных		
		ресурсов РК		
12	Нормоконтролер	Н. А. Асирбек,	31.05.2025	no
		Магистр технических		Cip
-		наук		

Научный руководитель А. Е. А Задание принял к исполнению обучающийся Дата <u>«31»</u> 05 2025 г.

А. Е. Абетов

К. М. Асемов

АҢДАТПА

Диссертацияда гидротехникалық құрылыстардын жағдайын диагностикалау үшін отандық және шетелдік зерттеушілердің олардың пайдалану және геофизикалық әдістерді қолдану тәжірибесі пайдаланылады және геофизикалық әдістердің ұтымды кешенін пайдалана отырып, Қазақстан Республикасының Алматы облысындағы К-25 жер бөгетінің фильтрациялық қасиеттеріне зерттеулер жүргізілді.

Осы мақсатта келесі әдістер қолданылды: тік электрлік зондтау, индукцияланған поляризацияны модификациялаудағы дипольді электрлік зондтау, табиғи электр өрісі әдісі, жерге енетін радиолокациялық түсіру және сынған толқындардың корреляциялық әдісімен сейсмикалық барлау - сынған толқын әдісі. Алынған далалық деректерді заманауи бағдарламалық пакеттерді қолдану арқылы өңдеу және интерпретациялау бөгет корпусында осы параметрлердің аномальды мәндері бар бірнеше аймақтарды анықтауға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері дипольді электрлік зондтау және тік электрлік зондтау әдістерімен электрлік барлауды бөгет денесінің біркелкі еместігін бастапқы бағалау, өткізгіштігін бақылаудың бастапқы үлгілері ретінде пайдалану үшін инженерлікгеологиялық кесінділерді құрастыру үшін қолданған жөн екенін көрсетті.

Режимді бақылау нұсқасында табиғи электр өрісі әдісін қолдану арқылы аумақты электрлік барлау сазды бөгет корпусындағы су сүзу ағынының аймақтарын анықтауда тиімділік көрсетті.

Интенсивті тұрақты кедергілер жағдайында бөгет денесін зерттеуде жерге енетін радар әдісі жақсы нәтиже көрсетті.

Сыну толқындарының корреляциялық әдісі - сынған толқындар әдісі бөгет құрылымын зерттеуде және ондағы әлсіреген аймақтарды анықтауда өте ақпараттылығымен ерекшеленеді, өйткені фильтрация процестері болуы мүмкін ең ықтимал құрылымдар.

Геофизикалық әдістерді біріктіру суға қаныққан аймақтарды анықтауға және гидротехникалық құрылыс корпусы арқылы ықтимал суды сүзу жолдарының схемаларын құруға мүмкіндік береді. Белгілі бір қолайсыз жағдайларда бұл аймақтар белсенді эрозия аймақтары болуы мүмкін және құрылымның әлсіреуі немесе тұрақтылығын жоғалтудың себебі болуы мүмкін.

Мұндай суға қаныққан аймақтар туралы ақпарат гидротехникалық құрылыстарды пайдаланатын ұйымдарға төтенше жағдайлар қаупін азайту үшін алдын ала ұйымдастырушылық және техникалық шараларды қабылдауға мүмкіндік береді. Бұл технологияны жер бөгеттерінің жағдайын бағалау және олардың инженерлік-геологиялық мониторингі үшін кеңінен қолдануға болады.

АННОТАЦИЯ

В диссертации использован опыт эксплуатации гидротехнических сооружений и использования геофизических методов отечественными и зарубежными исследователями для диагностики их состояния и проведены исследования фильтрационных свойств земляной плотины К-25 в Алматинской области, Республики Казахстан с применением рационального комплекса геофизических методов.

Для этой цели использовались методы: вертикальное электрическое зондирование, дипольное электрическое зондирование в модификации вызванной поляризации, метод естественного электрического поля, георадиолокационная съёмка и сейсмическая разведка корреляционным методом преломленных волн – методом рефрагированных волн. Обработка и интерпретация полученных полевых данных с помощью современных программных комплексов позволили выявить в теле плотины несколько зон с аномальными значениями этих параметров.

Результаты исследований показали, что электроразведку методами дипольного электрического зондирования и вертикального электрического зондирования целесообразно использовать для первичной оценки неоднородности тела плотины, составления инженерно-геологических разрезов для использования в качестве исходных моделей для мониторинга водопроницаемости.

Площадная электроразведки методом естественного электрического поля в варианте режимных наблюдений показала эффективность при выявлении в суглинистом теле плотины струйных зон фильтрации воды.

Метод георадарных зондирований продемонстрировал хорошую результативность при изучении тела плотины в условиях действия интенсивных регулярных помех.

Корреляционный метод преломленных волн - метод рефрагированных волн весьма информативен при изучении строения плотины и выявления в ней ослабленных зон, как наиболее вероятных структур, в которых могут проходить фильтрационные процессы.

Комплексирование геофизических методов позволяет определить зоны с повышенной водонасыщенностью и построить схемы вероятных путей фильтрации воды через тело гидротехнического сооружения. Данные зоны при определенных неблагоприятных условиях могут быть участками активной эрозии и быть причиной ослабления или потери устойчивости сооружения.

Информация о таких водонасыщенных зонах дает возможность организациям, эксплуатирующим гидротехнические сооружения, провести заблаговременно меры организационного и технического характера для снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций. Данная технология может быть широко использована для оценки состояния земляных плотин и их инженерно-геологического мониторинга.

ABSTRACT

In the dissertation the experience of operation of hydraulic structures and the use of geophysical methods by domestic and foreign researchers for diagnostics of their condition is used and the research of filtration properties of earthen dam K-25 in Almaty region, Republic of Kazakhstan with application of rational complex of geophysical methods is carried out.

For this purposes the following methods were used: vertical electric sounding, dipole electric sounding in modification of the induced polarization, method of natural electric field, GPR sounding and seismic survey by correlation method of refracted waves. Processing and interpretation of the obtained field data with the help of modern software complexes allowed to identify several zones with anomalous values of these parameters in the dam body.

The results of the studies have shown that electrical exploration by methods of dipole electric sounding and vertical electric sounding is expedient to use for primary assessment of inhomogeneity of the dam body, compilation of engineering-geological sections for use as initial models for water permeability monitoring.

The area electric prospecting by the method of natural electric field in the variant of regime observations has shown efficiency in revealing jet zones of water filtration in the loamy body of the dam.

The method of GPR sounding showed good efficiency in studying the dam body under conditions of intensive regular interference.

Correlation method of refracted waves - method of refracted waves is very informative in studying the structure of the dam and identifying weakened zones in it as the most probable structures where filtration processes can take place.

The combination of geophysical methods makes it possible to identify zones with increased water saturation and to construct schemes of probable paths of water filtration through the body of a hydraulic structure. These zones under certain unfavourable conditions can be areas of active erosion and be the cause of weakening or loss of stability of the structure.

Information on such water saturated zones enables organizations operating hydraulic structures to take organizational and technical measures in advance to reduce the risks of emergencies. This technology can be widely used to assess the condition of earthen dams and their engineering and geological monitoring.

СОДЕРЖАНИЕ

BBE	ДЕНИЕ	14
1	Общие сведения о районе проведения исследовательских работ и	18
	объекте изучения	
1.1	Оценка полноты и достоверности первичных данных	22
2.	Методология и методика проведения исследований по оценке	23
	состояния гидротехнических сооружений	
2.1	Актуальность проведения исследований по диагностики и	23
	мониторингу состояния гидротехнических сооружений	
2.2	Анализ зарубежного опыта организации безопасной	28
	эксплуатации гидротехнических сооружений и применения	
	геолого-геофизических методов для решения задач по изучению	
	строения ГТС и прогнозированию их состояния	
2.3	Анализ отечественного опыта организации безопасной	33
	эксплуатации гидротехнических сооружений и применения	
	методов инженерной геофизики для оценки состояния	
~ .	гидротехнических сооружений	26
2.4	Интеграция мирового опыта и выбор рационального	36
	геофизического комплекса для исследований в геологических	
2	условиях Казахстана	27
3.	Определение физическои основы использования геофизических	37
2 1	Методов	27
3.1.	Электроразведочные методы	57 16
3.2.	Георадарные исследования	40
5.5. 1	Опытие метениноские пологие реботи на плотино	/ 60
4.	опытно-методические полевые работы на плотине	00
<i>I</i> 1	водохранилища К-25 Топогродерицеское обеспецение	61
4.1.	Топотеодезическое обеспечение	01
4.2.	Дипольные электрические зондирования	62
4.3.	Электроразведка методом естественного электрического поля	62
4.4.	Вертикальные электрические зондирования	63
4.5.	Георадарное зондирование	64
4.6.	Сейсмическая разведка КМПВ-МРВ	64
5.	Обработка и интерпретация геофизических данных, построение	65
	профильных и площадных моделей	
5.1	Дипольные электрические зондирования	65
5.2	Электроразведка методом естественного электрического поля	65
5.3	Вертикальные электрические зонлирования	68
5.4	Геораларное зонлирование	69
5 5		60
J.J	Ссисмическая разведка КІЛПБ-ІЛРБ	09

6.	Моделирование и создание физико-геологических моделей ГТС	
6.1.	Дипольные электрические зондирования	
6.2.	Метод естественного электрического поля	78
6.3.	Вертикальные электрические зондирования	84
6.4.	Георадарное зондирование	87
6.5.	Сейсмическая разведка КМПВ-МРВ	93
6.6.	Комплексная интерпретация геофизических данных	98
6.7.	Моделирование процессов фильтрации и прогноза возможных направлений просачивания на плотине водохранилища К-25	100
7.	Рекомендации по дальнейшему изучению гидротехнических сооружений	102
7.1.	Оценка информативности результатов примененных геофизических методов при изучении состояния гидротехнического сооружения	102
7.2.	Рекомендации по поэтапному изучению состояния гидротехнических сооружений геофизическими методами	103
Заклі	ючение	105
Пере	чень терминов. Перечень сокращений	107
Спис	сок использованной литературы	108

введение

Актуальность

Вопрос безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений по своей сути всегда актуальным, т.к. их разрушение приводит к серьезным отрицательным последствиям для жизнедеятельности человека. Возросшее количество прорывов земляных плотин в Казахстане ставит вопрос об необходимости об организации системного мониторинга за их состоянием и раннего определения внутренних изменений. Поэтому разработка различных методов для контроля их физического состояния является востребованным.

Традиционные методы определения состояния гидротехнических сооружений основываются на данных наружного осмотра и натурного наблюдения. Для определения деструктивных процессов, протекающих в теле плотины, также используются данные изучения водно-физических свойств проб, взятых из специально пробуренных скважин.

Изучение тела и фундамента гидротехнических сооружений при помощи неинвазивных методов инженерной геофизики является весьма эффективным. Оно позволяет экспрессно определить ослабленные участки в теле плотины, в которых идет процесс фильтрации воды из водохранилища, постоянное воздействие которой на тело плотины может привести к суффозии или эрозии грунта в зонах фильтрации. Организация системных исследований по применению недорогих геофизических методов для оценки и мониторинга состояния ГТС позволила бы заблаговременно обнаруживать развитие неблагоприятных процессов в теле плотин.

Научно-исследовательские работы по данному направлению В Республике Казахстан проводились недостаточно активно, что также подтверждает актуальность исследований, связанных с оценкой эффективности использования инженерно-геологических и инженерногеофизических методов для оценки состояния и системного мониторинга устойчивости гидротехнических сооружений, в частности плотин земляного типа. Таким образом существующие подходы и аппаратурно-методические комплексы не позволяют до конца провести эффективный мониторинг за состоянием гидротехнических сооружений. Этим определяется актуальность диссертационной работы.

Цель магистерской диссертации

Изучение эффективности применения инженерно-геофизических изысканий и оценка целостности гидротехнических сооружений на примере плотины водохранилища К-25 в Алматинской области.

Основные задачи

1. Сбор и системный анализ информации о районе проведения исследований и объекте изучения и оценка их полноты;

2. Анализ отечественного и зарубежного опыта организации безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений, основных причин

потери устойчивости гидротехнических сооружений и применения методов инженерной геофизики для оценки состояния гидротехнических сооружений;

3. Выбор рационального геофизического комплекса для исследований в геологических условиях Казахстана;

4. Проведение опытно-методических полевых работы на плотине водохранилища К-25;

5. Обработка и интерпретация геофизических данных, построение профильных и площадных моделей;

6. Моделирование и создание физико-геологических моделей ГТС;

7. Проведение численного моделирования в целях оценки аномальности проявления в физических полях зон с ослабленными физикомеханическими свойствами;

8. Оценка информативности результатов методов дипольэлектрического зондирования вызванной поляризации, вертикального электрического зондирования, метода естественного электрического поля, георадарного зондирования, сейсморазведки методом КМПВ-МРВ при оценке неоднородности тела земляной плотины;

9. Изучение коррелятивных соотношений между разными физическими характеристиками среды.

Методы исследований

Для решения поставленных задач в работе использованы следующие методологические подходы:

- анализ и обобщение литературных данных по предпосылкам применения геофизических методов при изучении гидротехнических сооружений;

- систематизация, анализ и обобщение литературных данных по физико- механическим свойствам горных пород;

- подбор рационального геофизического комплекса для опробирования на земляной плотине водохранилища К-25;

использование современного аппаратурного комплекса для полевых измерений с помощью геофизических методов: электроразведочных (методы вертикального электрического зондирования, липольное электрическое зондирования в модификации вызваннойполяризации, метод естественного электрического поля), сейсморазведочного корреляционного метода рефрагированных преломленных волн метод волн И георадиолокационного зондирования;

- обработка и интерпретация полевых геофизических данных с использованием современных программных продуктов (V-master, Vista-65, SeiSee, X- Tomo, Surfer) с построением профильных и площадных моделей;

- анализ достоверности и информативности полученных геофизических данных, методов их обработки при выявлении и картировании локальных обводнённых зон по отчетным материалам.

15

Достоверность полученных данных

Достоверность результатов работы обеспечивалась инновационными методами полевых измерений, высокотехнологичной аппаратурой, проведением анализа большого объема материала, а также использованием современного программного обеспечения для обработки и интерпретации данных и построения моделей.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами

Автор в соответствии с диссертационными исследованиями принимал участие в реализации научного проекта AP19675038 «Геоинформационная система для мониторинга и инвентаризации гидротехнических сооружений РК».

Научная новизна

В работе оценены возможности интеграции различных геофизических методов для определения пространственного расположения зон повышенной водопроницаемости в теле гидротехнического сооружения и рисков их деструктивного развития. Ha конкретной плотине земляного типа опробирован рациональный геофизический комплекс И оценена информативность результатов входящих в него геофизических методов.

В работе впервые в Казахстане получены результативные данные о внутреннем строении плотины земляного типа, путях возможной фильтрации воды через тело плотины и сделано прогнозирование поведения сооружения при «благоприятных» обстоятельствах. Для этого при формирования геофизического комплекса использовался основной принцип- повышение геофизической решения обратной задачи физикооднозначности И истолкования физических параметров геологического с учетом индивидуальных информационных возможностей каждого методов ИЗ относительно определения структурных, литологических и петрофизических характеристик среды с применением современных программных продуктов (V-master, Vista-65, SeiSee, X- Tomo, Surfer).

Исследование дает развитие технологиям на базе рационального комплекса геофизических методов, ориентированных на выявление и картирование локальных обводненных зон повышенной опасности на ГТС.

Практическая значимость

Полученные в ходе реализации исследований результаты позволят на высоком уровне организовать системный мониторинг за изменением внутреннего состояния земляных плотин с применением современных технологий и исследовательской аппаратуры.

Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования комплекса геофизических методов при изучении районов проектируемых и действующих гидротехнических сооружений и других подобных инженерных сооружений.

Практическая значимость диссертации состоит в направленности на использование ее результатов водохозяйственными организациями и

специалистами, эксплуатирующими плотины и дамбы для ирригации в хозяйстве, работниками аварийных служб, структурами сельском региональных департаментов по чрезвычайным ситуациям. Своевременно полученные данные об изменениях состояния тела плотин дадут возможность заблаговременно предпринимать меры для снижения экологического, социального и экономического ущерба от их возможного разрушения.

Опробированная в работе методика может в широких масштабах быть распространена для использования при диагностике состояния грунтовых плотин и быть основой для повсеместной организации системного мониторинга ГТС средствами инженерной геофизики.

Апробация результатов исследований

В период исследования по теме данной магистерской диссертации были опубликованы статьи в научно-практическом журналах, входящих в базу SCOPUS:

1. Assemov K.M., Abetov A.E., Akhmetov Y.M. Assessment of Physical Condition and Identification of Inhomogeneities of the K-25 Earth Dam According to the Self-potential Method // International Review of Civil Engineering, 2024. – Vol.15(4). pages 353- 361. https://doi.org/10.15866/irece.v15i4.24824 (процентиль в базе SCOPUS= 55%);

2. Assemov K., Akhmetov, Y., Orazov D. Application of Electrical Prospecting Methods for Monitoring the Condition of Earth Dam in the Almaty Region of Kazakhstan // Infrastructures, 2024. – Vol.9(9), 163. https://doi.org/10.3390/infrastructures9090163 (процентиль в базе SCOPUS = 70%).

Также во время прохождения научной стажировки в Ошском государственном университете (г. Ош, Кыргызская Республика) была проведена презентация по теме магистерской диссертации.

Фактографическая база данных

Для выполнения научно-исследовательских работ по теме магистерской диссертации были собраны и изучены архивные материалы по плотине водохранилища: водохозяйственный паспорт плотины (1979), техно - рабочий проект реконструкции плотины водохранилища К-25 (1975), схемы строения плотины и др.

При написании настоящей диссертации были использования данные, изложенные в работах Хмелевского В.К., и других исследователей.

Кроме того, при подготовки диссертационной работы были использованы материалы 7 статей диссертанта, опубликованные в 2019-2024 годах.

1 Общие сведения о районе проведения исследовательских работ и объекте изучения

Исследовательские работы по теме диссертации проводились на плотине водохранилища К-25, которое в административном отношении относится к Карасайскому району Алматинской области. Плотина водохранилища К-25 находится у села Жалпаксай - административного центра Умтылского сельского округа Карасайского района. Плотина расположена примерно в 8 км к северо-востоку от центра города Каскелен, который является центром Карасайского района в соответствии с рисунком 1. Район занимает территорию 2,3 тыс. кв. км. На территории района находится 1 город и 10 сельских округов [1].



Рисунок 1 – Административная карта Карасайского района Алматинской области

Климат в районе расположения гидротехнического сооружения (ГТС) континентальный с короткой умеренно холодной зимой и продолжительным жарким летом. Переходные сезоны длинные.

Многолетняя среднегодовая температура воздуха составляет +10°С. Абсолютный минимум температур -37,7°С наблюдается в феврале,

абсолютный максимум +43,3°С зафиксирован в июле. Средняя продолжительность морозного периода 67 суток в году. Переход среднесуточной температуры через 0°С весной происходит в начале апреля, осенью — в конце октября.

В год в среднем выпадает 600-650 мм осадков, главный максимум приходится на апрель – май, второстепенный — на октябрь – ноябрь. Засушливый период приходится на август. Средней датой образования устойчивого снежного покрова считается 30 ноября, хотя время его появления колеблется от 5 ноября до 21 декабря. Средняя дата схода снега — 15 марта (колеблется от 26 февраля до 29 марта).

Карасайский район расположен в зоне повышенной сейсмической активности 7-9 баллов.

По территории района протекают реки Каскелен, Шамалган, Аксай, Киши Алматы и Улкен Алматы. Реки имеют большое хозяйственное значение и используются для питьевого и промышленного водоснабжения, орошения сельскохозяйственных угодий.

Через Карасайский район проходит Большой Алматинский канал им. Д. Кунаева, крупное гидротехническое сооружение, предназначенное в комплексе с Бартогайским водохранилищем для повышения водообеспеченности орошаемых земель.

На его территории можно встретить все ландшафты, почвенные зоны – от высокогорных черноземов до почв сухих степей – светло-каштановых.

На территории района растут полынь, типчак, чий, таволга, дикая яблоня, урюк, ель, сосна. Из млекопитающих обитают волк, лисица, заяц, сурок, архар, марал. Водятся фазан, утка, гусь.

Главное направление сельскохозяйственного производства – овощеводство, возделывание зерновых культур, развито мясо-молочное скотоводство, производство яиц.

Водохранилище К-25 расположена р. Казачка, которое имеет начало на высокогорном хребте на юге и течет в сторону низкогорного рельефа на севере. Этими определяется направление стока р. Казачка.

Географическое расположение Карасайского района удачно для его экономического развития: близость города Алматы, наличие железнодорожной станции, развитая сеть автомобильных дорог, наличие трудовых ресурсов.

На территории района исследований проходит хребет Заилийский Ала-Тау, который круто поднимается над пустынными степями Илийской равнины. Обширные площади в пределах северного склона в строении хребта сложены палеозойными отложениями, представленными гранитами, гранодиоритами, порфиритами, порфирами, туфами, конгломератами и песчаниками карбона. Вдоль подножий северных отрогов Заилийского Ала-Тау простирается слабонаклоненная предгорная равнина. По мере удаления от хребтов увеличиваются аллювиальные отложения, погребенные под более молодыми отложениями. В геологическом строении равнины преобладают

средне-верхнечетвертичные отложения аллювиально-пролювиального генезиса, представленные лессовидными суглинками, супесями, песками различной крупности. Комплекс аллювиальных отложений распространен весьма неравномерно, слагая надпойменные террасы средне-И верхнечетвертичного возраста и современные поймы. Надпойменные террасы относительно хорошо выражены и сохранились от размыва только в пределах широких долин и в устьях горных рек. Вниз по долинам рек их высота обычно понижается до нескольких метров. Русловые фации надпойменных террас сложены валунно-галечниковыми отложениями с песчаным наполнителем. Суглинистые грунты надпойменных террас относятся к просадочным. Нижнюю часть разреза отложений надпойменных террас слагают валунно-галечные образования с песчаным заполнителем и линзами песка [2].

В Карасайском районе имеются полезные ископаемые: Аксайское и Первомайское месторождения песка и гравия, Каскеленское месторождение известкового камня и мрамора. Какие-либо редкие геологические обнажения, минеральные образования, не выявлены.

2006-2009 B Южно-Казахстанского голах заланию по межрегионального территориального Департамента Комитета геологии и недропользования различными подрядными организациями были проведены геологоразведочные работы с целью обеспечения запасов суглинков пригодных для производства строительного кирпича. Были обследованы «Улан», "Восход", месторождения «Аманат», «Шамалган-Бакытнур», «Долан-1», Менжин, «Алмалыбак Западный и др. Данные месторождения приурочены к нижнечетвертичным отложениям. полезная толща - это суглинки серовато-желто-бурые, плотные, лессовидные, сухие, однородные. Крупнозернистые включения в основном отсутствуют. Проведены поисковые маршруты, поверхностные горные выработки, колонковое бурение, комплекс опробования с целью изучения вещественного и минерального состава, а также технологических свойств суглинков.

В 2012 году ТОО "Меркур Пром" и ТОО "Капчагайская ГПЭ" была песчано-гравийной месторождении проведена доразведка смеси на "Аксайское-V", в Карасайском районе Алматинской области с подсчётом запасов по промышленным категориям. Пройдены шурфы с опробованием для изучения вещественного состава и технологических свойств ПГС. Месторождение ПГС "Аксайское - V" расположено в 1,0 км западнее с. Каменка и административно относится к Карасайскому району Алматинской области. Месторождение приурочено к аллювиально-пролювиальным осадкам первой надпойменной террасы р. Аксай современного возраста.

В 2007-2015 годы в Карасайском районе также проводились поисковоразведочные работы, а также переоценка для обеспечения запасами подземных вод для хозяйственно-питьевого и производственно-технического водоснабжения с подсчетом эксплуатационных запасов подземных вод.

Отчеты о проведенных геологоразведочных работах хранятся в фондах

межрегионального Департамента «Южказнедра» Комитета геологии Министерства Промышленности и строительства Республики Казахстан.

Большая часть рассматриваемой территории в поисковом отношении изучена недостаточно, требуется проведение геологоразведочных работ различной детальности.

В 2004-2006 гг. ТОО "Геолог-А", выполнено геологическое доизучение масштаба 1:200 000 в северном Тянь-Шане. Целью доизучения являлось геологической отвечающей современным составление карты, представлениям о геологическом строении региона, а также выделение перспективных ископаемые площадей, наделённых на полезные прогнозными ресурсами категорий РЗ, Р2, на которых возможна постановка поисковых работ следующих стадий. Площадь доизучения охватывает фрагменты Чу-Кендыктасской и Заилийской структурно-формационных зон, Девонского и Илийского позднепалеозойского вулканоплутонических поясов, Чу-Сарысуйского и Илийского районов. В Чу-Сарысуйском и Илийском районах, перекрытых мощным чехлом кайнозойских отложений, обследование осуществлялось единичными геологическими и поисковыми маршрутами. В наиболее обнажённой горной части региона исследований проводились геологические поисковые маршруты, И геохимическое опробование (в варианте донных осадков), литохимическое опробование, горные и буровые работы.

выполнения Для научно-исследовательских работ ПО теме магистерской диссертации были собраны и изучены сохранившие материалы водохранилища. В частности, архивах ГКП по плотине В «Ушконырирригация» и института «Казгипроводход» были получены для изучения и анализа:

водохозяйственный паспорт плотины (1979 год) [3];

– техно-рабочий проект реконструкции плотины водохранилища К-25 (1975 год) [4];

схемы строения плотины.

Год ввода в эксплуатацию – 1964 год.

Плотина земляного типа высотой 18 и длиной 156 метров с шириной гребня 4.5 метра, сложенной суглинистыми грунтами.

В теле плотины имеются эксплуатационный и аварийный водоводы.

Во время разработки проекта реконструкции в 1975 году были проведены работы по забору проб и лабораторным исследованиям грунтов, слагающих тело плотины. Для сравнения были взяты пробы из шурфов с различных участков плотины и в грунтах с ненарушенной структурой за пределами плотины. В процессе работ было установлено, что насыпные грунты плотины по своим физико-механическим свойствам ничем не отличаются от грунтов с ненарушенной структурой. Поэтому насыпные грунты плотины можно рассматривать как грунты с ненарушенной структурой [4].

Геодезические реперы для привязки профилей к государственной нивелирной сети во время топографических съёмок не обнаружены.

1.1 Оценка полноты и достоверности первичных данных

Собранные материалы позволяют сделать общую оценку по району проведений исследований и определить наиболее благоприятные периоды года для выполнения геофизических работ.

Однако отсутствие данных по изыскательским исследованиям в период подготовки строительства плотины, проектной документации и всех проведенных ранее реконструкциях и ремонтах затрудняет понимание динамики изменений в конструкции плотины и ее геометрических размеров в период с даты сдачи в эксплуатацию и датой проведенных по диссертации работ.

Невозможность привязки проектных профилей к государственным геодезическим реперам вынуждает использовать переносные навигаторы системы глобальной навигации GPS, которые имеют погрешность в несколько метров, что влияет на точность проведения топографических съемок.

2 Методология и методы проведения исследований по оценке состояния гидротехнических сооружений

Объект, который используется для водных ресурсов имеет название сооружение (ГТС). Гидротехническое Гидротехнические сооружения себя включают В плотины водохранилищ, гидроэлектростанции, водорегулирующие сооружения ламбы хвостохранилищ различных предприятий, берегоукрепительные насыпи, каналы и другие сооружения для использования водных ресурсов и защиты от негативного действия вод и отходов.

Во время эксплуатации ГТС часто происходят аварии различного происхождения, причинами которых могут быть, как и ошибки при строительно-монтажных проектировании, В выполнении работ. несоблюдение режимов эксплуатации сооружений, так и износ ГТС и стихийные бедствии. Ранее считалось достаточным обеспечить безопасность ГТС во время разработки проектов и последующего строительства сооружений. Строительные нормы И правила. системы ГОСТов рассматривают только вопросы обеспечения качества проектирования и строительства ГТС.

В диссертации рассматриваются причины разрушения ГТС, методы контроля устойчивости отдельных видов ГТС, таких как плотины, дамбы и применение различных геофизических методов для анализа состояния плотин земляного типа в период их эксплуатации, информативность результатов исследований, полученными различными геофизическими методами.

2.1 Актуальность проведения исследований по диагностики и мониторингу состояния гидротехнических сооружений

Участившиеся в последниегоды разрушения плотин ставит актуальным вопрос своевременного обнаружения изменений в теле гидротехнических сооружений.

Учеными стран была ИЗ различных мира проанализирована устойчивости различной информация причинах потери плотин 0 конструкции от земляных до бетонных [5–7]. Были рассмотрены случаи разрушения 900 плотин в различных странах по миру, в том числе почти 600 случаев инцидентов с плотинами земляного типа.

Сравнение случаев разрушения различных типов плотин в процентном соотношении показывает, что 66% случаев разрушения происходят с земляными плотинами в соответствии с рисунком 2.



Рисунок 2 – Статистика разрушений типов плотин

В таблице 1 показаны высоты разрушенных земляных плотин, из которых более половина составляют сооружения высотой менее 15 м.

Таблица 1 – Высота разрушенных земляных плотин

Высота плотины (м)	Количество	Процент (%)
>100	4	0.7
100-60	10	1.7
60-30	44	7.4
30-15	135	22.8
<15	301	50.8
Неизвестна	99	16.6
Итого	593	100.0

В таблице 2 показан возраст земляных плотин в момент разрушения.

Таблица 2 – Распределение разрушений по срокам эксплуатации

Возраст, лет	Количество	процент (%)
0-1	85	14.3
1-5	96	16.2
5-10	36	6.1
10-20	62	10.5
20-40	58	9.8
40-60	31	5.2
60-80	16	2.7
80-100	7	1.2
100-150	10	1.7
>150	6	1.0
Неизвестен	186	31.3
Итого	593	100.0

Как видно из таблицы наиболее высок риск разрушения плотин в первые 5 лет после ввода в эксплуатацию. Исследованиями были определены много различных причин разрушений [8, 9], но назвать единственную причину очень затруднительно. И зачастую разрушения являются следствием сочетания нескольких причин. В таблице 3 представлены категории причин разрушения плотины [10].

Причины		
Перелив	недостаточная пропускная способность	
	экстремальное наводнение, превышающее проектные	
	параметры	
Проблемы состояния плотин	фильтрация воды в теле плотины	
	сдвиг тела плотины	
	просачивание воды в основании плотины	
	водонасыщенные зоны вокруг водосброса	
	состояние водосбрасывающих устройств	
	проблемы качества в водопропускных сооружениях и	
	других встроенных устройств	
Плохое управление	снижение пропускной способности водохранилища для	
	контроля потока из-за чрезмерного заполнения до	
	наводнения	
	плохое обслуживание и эксплуатация	
	организационная проблема: никто не несет	
	ответственности за управление плотиной	
Стихийные бедствия	землетрясение	
	война и террористическая атака	
	пробой защитной плотины	
Другие	повреждение в результате земляных работ на плотине	
	плохое планирование проекта	
Неизвестные причины		

Таблица 3 – Категории причин разрушения плотины

Большинство случаев (почти 4/5 от общего числа разрушений) вызвано либо переполнением, либо проблемами с состоянием плотин, в соответствии с рисунком 3.



Рисунок 3 – Соотношение причин разрушения плотин

Очевидно, что 58% проблем состояния плотины связаны с процессами просачивания воды («водопроводящий канал») в теле или основании плотины, в соответствии с рисунком 4.



Рисунок 4 – Процентное соотношение причин разрушения, связанных с состоянием плотины

В соответствии с рисунком 5 показаны два случая разрушения земляных плотин (а) из-за переполнения и (б) из-за водопроводящих каналов.



Рисунок 5 – (а) Плотина Баньцяо после аварии и (б) Плотина Baldwin Hills во время разрушения

В соответствии с рисунком 5(а) показана плотина Баньцяо провинция Хэнань, Китай, после разрушения. Это была земляная плотина с глиной с максимальной высотой 118 м и объемом хранения 375 млн. м³. Плотина была разрушена тайфуном Нину 8 августа 1975 года. В соответствии с рисунком 5(б) показана разрушенная плотина Baldwin Hills, Лос-Анджелес. Плотина была построена в 1951 году. Это была однородная плотная земляная плотина высотой 71 м и 198 м. После серьёзного размыва на плотине из-за «водопроводящего канала» произошел сброс почти миллиона кубометров воды, что вызвало крупное наводнение в регионе 14 декабря 1963 года.

Разрушения плотин из-за переполнения часто происходят в сезон наводнения, когда недостаточная пропускная способность водосброса является основной причиной переполнения. Поэтому наиболее потенциально опасное место находится на водосбросе. Другим потенциально опасным местом может быть основание плотины. Это связано с тем, что оседание гребня плотины уменьшает надводный борт, и это оседание часто связано с некачественным основанием. Третьим потенциально опасным местом является нисходящий склон. Подверженность эрозии материала нисходящего склона с течением времени является одним из решающих факторов процесса эрозии и, следовательно, определяет, разрушится ли плотина в конечном счете или нет. Одним словом, водосброс, основание и нисходящий склон, являются потенциальными местами риска, которые оказывают большое влияние на разрушение грунтовых плотин в результате перелива.

Одной из объективных причин, которая может способствовать возникновению аварий и различных инцидентов на ГТС является то, что объекты приходится возводить в менее благоприятных условиях, чем раньше: в сейсмически активных зонах сложного инженерно-геологического строения оснований, на слабо изученных в геологических отношениях реках, на территориях, подверженных сильному антропогенному процессу.

Старение большинства эксплуатируемых плотин, их физический износ, которые могут привести к чрезвычайным ситуациям, подтверждают

значимость проведения исследований по диагностики и мониторингу состояния гидротехнических сооружений для предотвращения техногенных катастроф.

2.2 Анализ зарубежного опыта организации безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений и применения геологогеофизических методов для решения задач по изучению строения ГТС и прогнозированию их состояния

a) Сравнительный анализ организации безопасности плотин в разных странах

кажлой B стране имеются свои нормативно-правовые акты. регулирующие организацию работы по безопасной эксплуатации плотин, **V**ЧИТЫВАЮТ местную специфику (традиции, которые организацию административной работы и т.д.). В работе [11] представлен анализ правовых и организационных форм регулирования, полномочий регламентирующих органов, нормативно-правовых актов, обеспечивающих безопасность плотин по 22 странам. В 12 странах (Австралия, Великобритания, Канада, Латвия, Норвегия, США, Финляндия, Мексика, Новая Зеландия, Франция. Швейцария, ЮАР) вопросы безопасности плотин отмечены в общем законодательстве по водному хозяйству, энергетики, плотинам и природным ресурсам. В некоторых странах дополнительно имеются специальные законодательные акты (Аргентина, Испания, Канада, Китай, Мексика, Португалия, США, Финляндия, Франция, Швейцария, ЮАР).

В 10 странах созданы специальные органы по вопросам безопасности плотин (Австралия, Австрия, Аргентина, Индия, Канада, Китай, Португалия, Румыния, США, Франция). Так во Франции – Главная служба контроля, в США – Межведомственный комитет по безопасности плотин. В Китае э тими вопросами занимаются Министерство водных ресурсов, Государственная энергетическая корпорация, Центр обеспечения безопасности плотин. В задачу этих органов входит оказание помощи в разработке и реализации программ, комплексов мероприятий и рекомендаций по безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений.

Правом на разработку норм и стандартов наделены государственные органы Австралии, Аргентины, Испании, Канады, Китая, Латвии, Мексики, Новой Зеландии, Норвегии, Португалии, Румынии, США, Финляндии Франции. Регламентирующие органы Великобритании, Испании, Франции, США и ЮАР также ведут реестр плотин.

В ряде зарубежных стран эти органы наделены дополнительными правами: выдача лицензий или разрешений на осуществление деятельности, связанной со строительством или эксплуатацией плотин, осуществления мониторинга и инспекций.

Основные обязанности в области безопасности плотин и проведения инспекций возложены на собственника плотин в 13 странах (Великобритания, Индия, Ирландия, Испания, Канада, Китай, Мексика, Норвегия, США, Финляндия, Франция, Швейцария, ЮАР). В семи странах (Австрия, Канада, Латвия, Норвегия, Румыния, США, Финляндия) в законодательстве четко прописано, что собственники плотин несут основную ответственность за безопасность плотин.

Регулярные инспекции предусмотрены в законодательстве 15 стран Великобритания, Индия, Ирландия, (Австралия, Австрия, Канала. Португалия, Румыния, США, Финляндия, Франция, Швейцария, ЮАР). В этих странах собственники или операторы плотин, лица, проводившие обязаны предоставить отчет проверке инспекцию, 0 орган В государственного регулирования. Органам государственного надзора в шести странах (Австралия, Канада, Новая Зеландия, Норвегия, США и ЮАР) Разрешено налагать штрафы на собственников плотин, не выполняющих требования законодательства. Размер штрафов может быть от несколько сотен до несколько тысяч долларов.

б) Зарубежный опыт применения геолого-геофизических методов для решения задач по изучению строения ГТС и прогнозированию их состояния

Созданные трудом человека водохранилища, оказывая значительное влияние на динамику земной коры, меняют физические свойства окружающей среды. Исследования изменения физических полей в породах, из которых сложена плотина, дают возможность понять эти динамические процессы, количественно охарактеризовать объект, его физические И геометрические особенности. Для определения этих параметров И применяются геофизические методы. В последние десятилетия получило использование неинвазивных геофизических развитие методов для определения прочности и прогнозирование динамики изменения физического состояния ГТС. В этом поле значителен вклад российских ученых [12-15].

Авторы исследований внесли значительный вклад в усовершенствование геофизических методов, в частности сейсморазведка и электроразведка, адаптируя их для решения специфических задач, связанных с изучением геологического строения ГТС и физико-механических свойств (ФМС) грунтов основания и тела плотины. Их работа сосредоточена на нескольких ключевых аспектах:

- разработка сейсмогеологической модели, которая базируется на данных бурения (включая параметрическое бурение), позволяющее получить информацию о свойствах грунта, литературе и ранее проведенных исследованиях;

- численное моделирование сейсмических методов, которое позволяет оптимизировать полевые работы и повышает точность интерпретации результатов. Преимуществом численного моделирования является

возможность подбора оптимальных режимов съемки, увеличения разрешающей способности метода и минимизации влияния помех;

- исследование состояния грунтов насыпных плотин с помощью сейсморазведочных методов, таких как метод отраженных волн (МОВ) и метод преломленных волн (МПВ), позволяют оценить внутреннее строение плотины, выявить зоны с пониженной плотностью или наличием трещин, а также определить границы между различными слоями грунта. Разработанная методика прошла прошедшая апробацию на практике.

В работе был проведен комплексный анализ методов МПВ и МОВ, включающий численное моделирование с использованием программы FModel и опытно-методические исследования на реальном объекте. Моделирование проводилось на пятислойной модели, которая показала высокую эффективность сейсмических методов в выявлении деструктивных элементов в теле плотины. Однако, анализ результатов выявил сложности в обработке и интерпретации данных, особенно в определении преломляющих границ по первому вступлению сигналов. Авторы предлагают оригинальный способ разделения преломленных волн во вступлениях.

Опытно-методические работы проводились на ГТС с глубиной исследуемого разреза 15-20 метров. В ходе исследований варьировались параметры съемочных систем МПВ и МОВ: расположение источников и приёмников, шаги дискретизации и длительность записи. Полученные данные показали существенное влияние интенсивных поверхностных волн на качество сейсмических записей, что затруднило однозначный выбор между МПВ и МОВ.

Численное обоих моделирование, проведенное для методов, способность их определению продемонстрировало к скоростных характеристик геологического разреза ГТС. Однако, для определения ФМС грунтов плотины, а именно выявления зон с потенциальными деформациями или разрушениями, сейсмических данных оказалось недостаточно. Авторы подчеркивают, что необходимо привлекать дополнительную информацию из других источников, таких как микросейсмический и акустический каротаж. В случае отсутствии каротажных данных, требуется априорный геологический материал для корректной интерпретации сейсмических данных. Построенные для детального анализа пространственного распределения ФМС внутри сейсмических слоев графики изменения физических параметров позволили визуализировать изменение свойств грунта по глубине и выделить зоны, требующие особого внимания.

Проведенное исследование показало эффективность сейсмических методов в мониторинге состояния ГТС. В тоже время подчеркнута необходимость применения комплексного подхода, включающего не только сейсмическую разведку, но и другие геофизические методы, а также анализ геологической информации.

В работах [14, 15] исследователи изучали возможности комплекса геофизических методов для оперативного контроля стабильности и

30

прогнозирования состояния земляных плотин в Пермском края. В рамках исследования применялся комплекс, состоявший из метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), метода естественного электрического поля (ЕП), георадиолокационного зондирования и сейсморазведки с на преломленных продольных и поперечных волнах. На основе данных с параметрических инженерно-геологических скважин была сформирована обобщенная физико-геологическая модель, а также выполнены численные расчеты с применением специализированных программных средств.

Результаты моделирования показали эффективное разделение разреза и выделение зон возможных рисков с учетом различий их физических характеристик. К примеру, увлажненные области характеризуются низкими значениями удельного электрического сопротивления. Исследования продемонстрировали, что методы сейсморазведки И георадарного зондирования позволяют достоверно отображать структурные особенности сооружения, а методы электрической разведки выявлять зоны просачивания воды и уровни водонасыщенности пород. На основании этих исследований был разработан научно обоснованный методический подход для оценки технического состояния ГТС [12–15].

В период 2002-2012 годов проводились наблюдения динамики изменений физических параметров плотины Иркутской гидроэлектростанции с использованием комплекса геофизических методов [16]. Анализ данных показал незначительные расхождения между методиками, укладывающиеся в допустимые пределы интерпретации. Электроразведочные данные указывают на вариации сопротивления, обусловленные изменением минерализации интенсификацией фильтрационных грунтовых вод И процессов. Сопоставление результатов ВЭЗ с данными из скважин показало их перспективность комплекса для мониторинга устойчивости плотин, в том числе с использованием метода ЕП. При этом отрицательные аномалии сопротивления связывались пористостью, водонасыщенностью с И просачиванием воды в теле плотины.

В исследовании [17] для анализа состояния ГТС использовались неинвазивные геофизические методы: метод сопротивлений, георадарное зондирование и измерение электрической проводимости. Объектом экспериментов стала старая дамба небольшой высоты в Чехии, построенная в XV веке. Работы проводились в условиях отсутствия документации о строении дамбы. Основные задачи исследования включали определение основания дамбы, его однородности, исходного материала конструкции, зон увлажненности и сопоставление эффективности примененных методов.

Результаты показали следующее:

- метод сопротивлений позволил выделить основание плотины, вероятно сложенное валунно-галечными отложениями;

- пониженные значения кажущегося сопротивления ρ_к указали на увлажненные зоны, а высокие – на новые материалы;

- георадар оказался менее информативным, но позволил выявить приповерхностные увлажненные слои.

Наиболее результативными оказались методы электрического сопротивления и проводимости.

В работе [18] исследовалось применение геофизических методов для выявления потенциальных зон утечек, ставящих под угрозу целостность насыпи плотины Витиневского водохранилица (Чешская Республика). В рамках анализа использовались электромагнитное профилирование (ЭМ), методы сопротивлений и ЕП. Быстрое сканирование территории плотины методом ЭМ выявило зоны водонасыщенности с общим снижением сопротивления до 8–24 Ом/м. Дополнительные измерения методом ЕП подтвердили наличие аномальных проводимостей в центральной части плотины, связанных с повышенной водонасыщенностью. Электромагнитное профилирование также позволило определить слабые места конструкции, впоследствии уточненные методами сопротивлений и ЕП. Комплексное применение трех методов показало эффективность при определении ослабленных мест плотины.

Для анализа состояния горных пород земляной дамбы в Адо-Экити (Нигерия) был использован комплекс геофизических методов, включающих метод сопротивлений и ЕП [19]. На основании данных ВЭЗ был построен геоэлектрический разрез, отражающий структурные особенности дамбы. Интерпретация полученных данных выявила, что верхний слой дамбы состоит из песчано-галечниковых пород с удельным сопротивлением в диапазоне 38–369 Ом*м и толщиной слоя от 1,2 до 2,7 м. Центральная часть дамбы (ядро) сложена породами с удельным сопротивлением от 38 до 175 Ом*м, а толщина ядра варьируется от 9,6 до 14,2 м. Внутри ядра была выделена зона с удельным сопротивлением около 90 Ом*м, которая, согласно выводам авторов, связана с повышенной влажностью, процессами фильтрации и потенциальным просачиванием воды. В основании дамбы на глубине 15-20 м залегают породы с высокими значениями удельного сопротивления, равными от 335 до 3999 Ом*м. Зоны с низкими значениями удельного сопротивления в ядре дамбы демонстрируют корреляцию с отрицательными значениями потенциала естественного электрического поля. Эти области ассоциируются с фильтрационными процессами в теле дамбы, которые могут стать предпосылкой чрезвычайных ситуаций в будущем.

Аналогичное исследование, посвященное оценке состояния земляной плотины Вольф Крик (штат Миссури, США), представлено в исследовании [20]. В этом случае применялись такие геофизические методы, как электротомография, вызванная поляризация и метод ЕП. Комплексная интерпретация результатов измерений позволила выявить две области, связанные с фильтрационными процессами: зоны контакта плотины с коренными породами и область возле выпускного дренажного канала. Эти зоны характеризуются пониженными значениями удельного сопротивления и отрицательными значениями естественного электрического поля. Авторы

32

предполагают, что результаты их работы могут помочь владельцам плотины предпринять меры по уменьшению утечек воды.

Электроразведочные методы находят широкое применение для оценки физического состояния плотин, как указано и в других исследованиях [21, 22]. Основные измеряемые параметры геофизического поля включают удельное электрическое сопротивление, проводимость, поляризуемость и потенциал естественного электрического поля. Если первые три параметра эффективно выявляют участки с ослабленной структурой или насыщением водой, то потенциал ЕП используется для определения направления фильтрационных потоков в теле гидротехнического сооружения.

2.3 Анализ отечественного опыта организации безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений и применения методов инженерной геофизики для оценки состояния гидротехнических сооружений

В Казахстане имеются различные типы и конструкции ГТС, используемые для нужд водоснабжения, ирригации, гидроэнергетики, водного транспорта, рыбного хозяйства, рекреационных целей и других задач. Вода в водохранилищах крупных гидроэлектростанций (ГЭС) используются как для выработки электроэнергии, так и регулирования стока воды в различные сезоны.

В настоящее время активно строятся новые объекты гидроэнергетики, в частности малые ГЭС. Среди них наиболее крупным является Мойнакская ГЭС, расположенная на реке Чарын. В период 2023–2030 годов планируется строительство новых водохранилищ для ирригационных целей и создания ГТС, предназначенных для предотвращения паводков.

Всего стране насчитывается более 1000 ГТС В подпорных коммунального, сельскохозяйственного, промышленного И водного назначения. Эти сооружения принадлежат как государству, так и частным владельцам. Более 90% из них используются главным образом для нужд сельского хозяйства. Многие из этих сооружений более четырех десятилетий эксплуатируются без проведения ремонта и реконструкции. Некоторые малые плотины бесхозные, что ухудшает их техническое состояние и делает их потенциально опасными [23].

Собственники ГТС зачастую не обладают достаточными средствами для поддержания таких объектов в рабочем состоянии, что увеличивает риск аварий. В целом состояние водохозяйственной инфраструктуры в Казахстане достигло критического уровня из-за физического износа и истечения сроков службы. Без выполнения восстановительных мероприятий этот процесс приводит к снижению надёжности ГТС и увеличению вероятности аварий.

Среди значимых инцидентов последних лет можно отметить наводнение, вызванное разрушением плотины в селе Кызылагаш (2010 год),

размыв плотины водохранилища Кокпекты в Карагандинской области (2014 год) и селевой сход на реке Каргалинка в Алматы (2016 год). Основные причины таких аварий связаны с ненадлежащим производственным контролем за безопасностью объектов, отсутствием контрольно-измерительной аппаратуры и недостаточной пропускной способностью водосбросных сооружений.

B Казахстане отсутствует специальное законодательство ПО обеспечению безопасности ГТС. Основная правовая база в этой области – Водный кодекс Республики Казахстан. Отдельные нормы, касающиеся обеспечения безопасности плотин, интегрированы в такие законы, как «О техническом регулировании», «О гражданской защите РК», Экологический законодательных Эти кодекс РК и ряд других актов. положения обеспечивают возможность установления комплекса технических. управленческих требований организационных И для поддержания сооружений в исправном и безопасном состоянии. Также они определяют их эксплуатационную пригодность, механизмы оценки технического состояния и уровня безопасности, а также способствуют выполнению сооружениями технологических задач.

В последние годы в Водный кодекс Республики были внесены изменения, дополнения и поправки, которые уточнили ответственность собственников водохозяйственных объектов за соблюдение установленных режимов функционирования и нормативных требований. Кроме того, изменения затронули порядок составления и подачи декларации безопасности плотин, а также другие аспекты регулирования.

за безопасностью Функции надзора плотин ΓTC. И других эксплуатируемых собственниками, осуществляются Министерством водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан, Комитетом предупреждения чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан и другими заинтересованными органами.

Декларация промышленной безопасности разрабатывается, пересматривается в составе проекта на строительство, расширение, реконструкцию опасных производственных зданий и сооружений.

В Казахстане отсутствует единая система мониторинга безопасности ГТС, что объясняется их разной ведомственной подчиненностью. В настоящее время Законом РК «О промышленной безопасности на опасных производственных объектах» наблюдение за состоянием ГТС возложено их собственников. В законе прописаны нормы, регулирующие отношения, связанные с безопасной эксплуатацией объектов, предупреждением инцидентов, представляющих опасность для жизнедеятельности человека и экологии.

За последние годы правительство Казахстана приняло ряд ключевых нормативных документов для повышения безопасности ГТС, в том числе правила эксплуатации водохозяйственных сооружений, требования к разработке декларации безопасности плотин, а также ряд нормативов,

регламентирующих деятельность организаций, аттестованных на проведение работ в этой области. Однако отсутствие специализированного закона о безопасности ГТС препятствует формированию целостной государственной политики в данной сфере и созданию единой системы для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, учитывающей особенности ГТС. Такой закон мог бы вывести вопросы безопасности водопользования и эксплуатации ГТС на новый уровень.

Немаловажную роль для понимания процессов, влияющих на геологическую обстановку в районе расположения гидротехнических сооружений, играет изучение структурного строения и геодинамики земной коры. Так результаты работ [24-26] дали эффективную оценку физикомеханических свойств горных пород различных районов Казахстана. Совместный анализ петрофизических характеристик горных пород и геологогеофизических данных дало возможность получения более достоверной информации о состоянии структуры изучаемого района. Для исследования поверхностных слоев земной коры все шире применяются методы инженерной геофизики. Эти методы в Казахстане также стали применяться состояния ГТС. Например, диагностики исследования лля методом радиолокационного зондирования состояния гидротехнических сооружений Капчагайского водохранилища на реке Или показали возможность выявления зон с ослаблением конструкции или повышенной влажностью в теле плотин [27]. исследования подчеркивают Авторы важность проведения долгосрочного мониторинга для изучения динамики таких зон.

Для безопасной эксплуатации Мойнакской ГЭС особую роль играют точные данные о наличии локальных обводненных участков и зонах с повышенной трещиноватостью, которые ослабляют горные породы в конструкции деривационного туннеля. Для выполнения данной задачи был проведен комплекс геофизических исследований, включающий магнитную съемку, электроразведку методом сопротивлений и сейсморазведку [28]. продемонстрировали, Полученные данные что зоны повышенной трещиноватости можно уверенно выявить понижением магнитного поля, а зоны – повышением электропроводности разреза локализованные И снижением скорости упругих волн. Эти результаты свидетельствуют об эффективности геофизических методов для диагностики и безопасности ГТС.

В работе [29] обобщены результаты применения георадара при исследовании технического состояния дамб Каратомарского и Актюбинского водохранилищ на реке Тобол. Исследования показали наличие зон декомпрессии и пустот в теле плотины, заполненных водой. При определенных сценариях они могут стать причиной развития деструктивных процессов, которые приведут к разрушению плотины. Было также отмечено, что качество интерпретации георадарных измерений во многом зависит от опыта геофизиков.

2.4 Интеграция мирового опыта и выбор рационального геофизического комплекса для исследований в геологических условиях Казахстана

Из анализа мирового опыта, проведенного в работе [30], для контроля устойчивости прогноза физического состояния ГТС земляного типа широкое применение нашли электроразведочные методы вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), диполь-электрического зондирования (ДЭЗ), вызванной поляризации (ДЭЗ-ВП), электропрофилирования (ЭП) и естественного электрического поля (ЕП), сейсмическая разведка и георадарные исследования [31].

Петрофизические свойства горных пород являются основой для применение геофизических методов. Для электроразведочных методов это удельное электрическое сопротивление (ρ_{κ}) и поляризуемость (η_k), для сейсморазведки - плотность горных пород (σ) и скорости продольных и поперечных волн (V_p, V_s), коэффициент Пуассона, модуль Юнга и отношения V_p/V_{s} , для георадарных методов - электрическая проницаемость (ϵ) и электропроводность (r).

Перечисленные методы достаточно хорошо решают вопросы диагностики состояния и прогноза устойчивости ГТС. Данный комплекс нацелен на решение нескольких задач:

- изучение геологического строения и физических характеристик пород, слагающих разрез;

- разделение тела плотины и ее основании на слои с различной степенью увлажненности и уплотненности;

- определение уровня, скорости и путей фильтрации подземных вод;

- установление потенциально опасных зон;

- краткосрочное прогнозирование изменений составляющих геологической среды под воздействием природных и техногенных факторов.

Исходя из проведенного изучения результатов работ исследователей из различных стран для проведения научно-исследовательских работ на плотине водохранилища К-25 был выбран рациональный комплекс, состоящий из следующих геофизических методов:

- дипольные электрические зондирования в модификации вызванной поляризации;

- метод естественного электрического поля;

- вертикальные электрические зондирования;

- георадарное зондирование;

- сейсмический корреляционный метод преломленных волн - метод рефрагированных волн.
3 Определение физической основы использования геофизических методов

Ниже приводятся теоретические основы выбора геофизических методов для применения при обследовании ГТС.

3.1 Электроразведочные методы

Вертикальное электрическое зондирование. Метод ВЭЗ является одним старейших методов (предложен братьями Конрадом ИЗ И Марселем Шлюмберже) и на сегодняшний день остается одним из самых широко применяемых. Одним из основных требований к применению метода сопротивлений является контрастность по петрофизическим свойствам исследуемого объекта и окружающих пород. Так для выделения объектов исследования, таких как тело, слой, и другие, необходимо, чтобы их удельное электрическое сопротивление (УЭС) значительно отличалось от УЭС прилегающих к ним пород. УЭС - характерное свойство пород и полезно для сравнения различных пород на основе ИХ способности проводить электрический ток, измеряется оно в Ом*м.

В рамках геофизики горные породы рассматриваются как трехфазная среда, включающая твердый минеральный скелет, трещины или поры, и заполняющие их газ и/или жидкость [32]. Даже самые плотные и прочные породы содержат поры (характерно для терригенных отложений), трещины (чаще встречаются в магматических и метаморфических породах) или оба типа пустот. Заполненные водой или глинами, такие поры и трещины выступают проводниками электрического тока [33,34].

Факторы, оказывающие влияние на УЭС горных пород, включают:

- удельное сопротивление минералов, составляющих породу;
- степень пористости или трещиноватости;
- уровень влагонасыщенности;
- удельное сопротивление поровой влаги;
- содержание глинистых компонентов.

Очевидна взаимосвязь между УЭС горных пород и коэффициентами и пористости, влагонасыщенности и сопротивлением поровой влаги: чем больше воды в породе (т.е. выше пористость и влагонасыщенность), тем ниже общее сопротивление породы. Например, сухие пески имеют высокое УЭС, которое снижается при увлажнении, а наименьшее значение достигается при полном насыщении водой. Минимальное значение УЭС породы равно удельному сопротивлению поровой воды.

Глины характеризуются очень низким УЭС, что связано с особенностями капиллярных процессов С В глинистых материалах. увеличением содержания глины в породе общий УЭС значительно снижается. В таблице 4 приведены значения УЭС некоторых горных пород.

Наименование горной породы	УЭС мин. Ом*м	УЭС типичное	УЭС макс. Ом*м
	OM M	OM M	OM ⁺ M
Глины	5	10	15
Суглинки	15	30	50
Супеси	30	50	80
Пески водонасыщенные	50	80	200
Пески слабо увлажненные	100	150	500
Пески сухие	200	500	10 000
Карбонатные скальные породы	500	1000	5 000
слаботрещиноватые			
Интрузивные горные породы	1000	2000	10 000
слаботрещиноватые			
Дресва	30	50	500
Вечномерзлые породы	500		80 000
различной льдистости			
Руды минералов проводников	0,001		1-5
(в основном сульфидов)			

Таблица 4 – УЭС некоторых горных пород

УЭС различных горных пород демонстрируют значительный диапазон значений — от единиц Ом*м до десятков тысяч Ом*м. Это открывает широкие возможности для выявления геологических особенностей верхней части земной коры и успешного решения таких задач, как:

- исследование и разведка подземных вод;
- составление карт мерзлых земель;
- выявление зон карстовых процессов в карбонатных породах;
- классификация осадочных терригенных пород по содержанию глины;
- и многое другое.

Физическая основа метода ВЭЗ достаточно проста. На поверхности размещается установка для электроразведки, обычно состоящая из двух питающих (обозначаемых как А и В) и двух приемных электродов (М и N) в соответствии с рисунком 6. В качестве электродов обычно используются металлические штыри, вбитые в грунт [35-37]. Источник тока, например батарея, подключается к электродам А и В, вызывая появление электрического поля и прохождение электрического тока через породы.



Рисунок 6 – Схема измерений методом ВЭЗ

Силу тока в линии питания (I_{AB}) измеряют с помощью амперметра, а разность потенциалов на приемных электродах (ΔU_{MN}), с помощью вольтметра. Эти данные позволяют оценить электрические свойства пород на глубинах, куда проникает ток. Глубина проникновения определяется главным образом расстоянием между питающими электродами.

По результатам измерений рассчитывается кажущееся электрическое сопротивление ρ_k , которое выражается в Ом*м. Для его вычисления используют формулу:

$$\rho_k = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \tag{1}$$

где K – геометрический коэффициент, зависящий от конфигурации электродов, ΔU_{MN} – разность потенциалов, I_{AB} – сила тока.

Кажущееся сопротивление представляет собой интегральную характеристику УЭС пород в зоне исследования. Эта зона расположена под центром установки и простирается от поверхности до глубины, приблизительно равной половине длины линии AB (AB/2). Если среда однородная, то ρ_k будет равно истинному удельному сопротивлению среды ($\rho_{среды}$). Если же среда неоднородна, то ρ_k будет находиться между минимальным и максимальным значением УЭС пород:

$$\rho_{min} < \rho_k < \rho_{max} \tag{2}$$

Для изучения свойств породы на увеличенных глубинах выполняют серию измерений, постепенно увеличивая размер линии питания (AB) в соответствии с рисунком 7. Чем больше значение AB/2, тем глубже ток проникает в исследуемую среду, охватывая более глубокие слои.



Рисунок 7 – Эффект зондирования в методе ВЭЗ

Максимальный размер AB/2 редко превышает первые километры, поэтому метод BЭЗ в основном используется для изучения до глубин не более сотен метров. Результаты измерений представляют в виде кривой зондирования, которая для удобства анализа строится на билогарифмических графиках с логарифмическими осями в соответствии с рисунком 8.



Рисунок 8 – Пример кривой ВЭЗ

Кривая зондирования передает изменения УЭС горных пород с глубиной: левая часть графика отражает приповерхностные слои, а правая —

более глубокие. На приведенной трехслойной кривой видно слоистую структуру породы. Метод наиболее эффективен для изучения горизонтальнослоистых сред с небольшими наклонами границ — до 15–20 градусов. Для локальных объектов, таких как интрузивные или рудные тела, разломы и другие нарушения, чаще применяют альтернативные подходы.

Электропрофилирование. Одной из таких методик является метод электропрофилирования (ЭП), который отличается большей от B₃ простотой. Измерения выполняются той же установкой, НО при фиксированных значениях АВ/2, и установка перемещается вдоль профиля с шагом 5-100 метров в зависимости от требуемой детализации и размеров изучаемых объектов. Таким образом, ЭП является своего рода укороченным вариантом ВЭЗ, удобным для поиска локальных аномалий. Размер разноса АВ/2 при ЭП выбирается исходя из необходимой глубины исследования, где расположены интересующие геологические тела. Полученные данные отображаются на графике изменений кажущегося сопротивления вдоль профиля наблюдений, например, как в соответствии с рисунком 9. Поскольку верхняя граница тела находится на глубине около 30 метров, для данного случая рекомендована установка с параметрами АВ порядка 100 метров.



Рисунок 9 – Применение ЭП для поиска рудного тела

Дипольные электрические зондирования. Если надо изучить разрез на больших глубинах (несколько сотен метров), то разносы АВ приходится увеличивать до 10 км. При таких разносах проводить ВЭЗ сложно. В этом случае предпочитают использовать дипольные установки (азимутальные, радиальные и др.). При дипольных электрических зондированиях измеряют кажущееся сопротивление при разных расстояниях или разносах "r" между питающим и приемным диполями. Электроды относят либо в одну сторону от неподвижного питающего диполя (одностороннее ДЭЗ), либо вначале в одну, а затем в противоположную сторону (двустороннее ДЭЗ). Дипольное зондирование выполняют с помощью электроразведочных станций. Сначала проводят топографическую подготовку работ. В зависимости от условий передвижения электроразведочных станций ДЭЗ можно выполнять по криволинейным маршрутам, приуроченным к дорогам, рекам и участкам, к которым может быть доставлена полевая лаборатория. Схема увеличения разносов дипольного азимутального зондирования приведена в соответствии с рисунком 10.



Рисунок 10 – Схема дипольного азимутального зондирования

Величина R должна увеличиваться примерно в геометрической прогрессии. Измерив ток в линии AB I₁ и разность потенциалов на MN ΔU_1 , можно получить $\rho_{\kappa} = k 1 \Delta U 1/I1$, где k₁ - коэффициент дипольной установки. После этого полевая лаборатория переезжает на новую точку O₂.

По радио устанавливают связь между станциями, снова измеряют ΔU , I и рассчитывают ρ_{κ} . В результате на бланках с двойным логарифмическим масштабом строят кривую ДЭЗ: по горизонтали откладывают r (в азимутальном и экваториальном зондированиях) или r/2 (в радиальном или осевом зондировании), а по вертикали - ρ_{κ} . Форма кривых ДЭЗ, их названия такие же, как и у кривых ВЭЗ.

При морских электрических зондированиях используют дипольные осевые установки, а сами зондирования проводят непрерывно. В процессе зондирования приемная линия и регистрирующая аппаратура, установленные на приемном судне, остаются неподвижными. Питающая линия непрерывно перемещается на генераторном судне сначала в одну, а затем в другую сторону от приемной линии. После обработки автоматических записей токов и разностей потенциалов рассчитывают кажущиеся сопротивления для разных расстояний между питающей и приемной линиями и строят кривые ДЭЗ.

Метод естественного электрического поля (ЕП) базируется на исследовании природных постоянных электрических полей, которые характеризуются периодами до 1 Гц. Такие поля формируются в процессе различных геохимических явлений, включая окислительно-

восстановительные (OB), фильтрационные и диффузионно-адсорбционные (ДА) процессы в геологических структурах.

Основы метода ЕП тесно связаны с физическими процессами. Электрическое поле, происхождение которого связано с ОВ-процессами, формируется в результате разделения зарядов, возникающего при окислении веществ. В этом случае окисляющийся объект представляет собой своеобразный гальванический элемент, для формирования которого необходимо выполнение двух условий: наличие контакта между веществами с разными типами проводимости (электронной и ионной) и различие OBрежимов в точках контакта этих проводников [38-40].

В условиях геологического разреза такие гальванические элементы могут формироваться на основе минералов с электронной проводимостью (например, сульфидов, графита или антрацитов), если они залегают в водонасыщенной породе с ионной проводимостью. Это иллюстрирует схема в соответствии с рисунком 11. Разность условий окисления и восстановления, возникающих при контакте электронного проводника с окружающей средой, определяется постепенным снижением концентрации кислорода при увеличении глубины.



Рисунок 11 – Механизм образования окислительно-восстановительных потенциалов

Сверху электронного проводника наблюдается окислительная среда, а снизу — восстановительная. Процесс окисления сопровождается высвобождением электронов из кристаллической решетки, вследствие чего отрицательные заряды накапливаются снаружи верхнего контакта, а положительные — внутри. В нижней части происходит поглощение электронов (восстановление), что приводит к накоплению положительных

зарядов на внешнем контакте. Такой процесс носит устойчивый характер, обеспечивая долговременное существование электрического поля.

Поля фильтрационного происхождения формируются при движении заряженных частиц с потоком воды, фильтрующимся через пористую среду. Для формирования такого поля необходимы три ключевых элемента: контакт между твердыми и жидкими фазами, наличие потока жидкости и пористая структура.

Фильтрационные поля часто возникают в напорных водоносных пластах. На стенках пор твердого скелета породы, обычно состоящего преимущественно из силикатов, образуется двойной электрический слой, принцип работы которого схематично представлен в соответствии с рисунком 12.



Рисунок 12 – Фильтрационный механизм возникновения ЕП I – двойной электрический слой, II – прочно связанная вода, III – рыхло связанная вода

Катионы (положительно заряженные ионы), более крупные по размерам, чем анионы, поэтому они стремятся выходить на поверхность. Это приводит к тому, что молекулы воды, имея электрический диполь с положительными ионами водорода и отрицательными ионами кислорода, притягиваются к стенкам пор отрицательными полюсами. Таким образом, формируется слой сильно связанной воды. В результате катионы смещаются в сторону жидкой фазы, продолжая сохранять связь с кристаллической решеткой. На внешний слой сильно связанной воды притягиваются другие молекулы воды, формируя слой рыхло связанной воды, где сохраняется некоторая подвижность молекул. Жидкость, текущая через поры, перемещает слой рыхло связанной воды вдоль их стенок. В результате на выходе пор появляется избыток катионов (положительный заряд), а на входе — их дефицит (отрицательный заряд). Размер пор должен быть таким, чтобы позволить формирование слоя рыхло связанной воды в области с высокой скоростью потока. При условии стабильного потока достигается устойчивость разделения зарядов, а электрическое поле сохраняется в течение длительного времени.

Поля ДА-происхождения образуются в водонасыщенных пористых средах при разделении зарядов из-за разницы в подвижности электролитных ионов противоположного заряда и их различного взаимодействия с двойным электрическим слоем. Для возникновения ДА-поля необходимы следующие условия: 1) контакт твердой и жидкой фаз, 2) наличие жидкой фазы в виде электролитного раствора, 3) пористая структура твердой фазы.

При локальном изменении минерализации жидкости (концентрации растворенных электролитов) запускается процесс диффузии, ведущий к выравниванию минерализации благодаря перераспределению ионов. Более подвижные катионы быстрее покидают область с высокой минерализацией. Это приводит к появлению избытка катионов на дальних концах пористой среды относительно области высокой минерализации, тогда как рядом с этой областью накапливаются анионы. Помимо диффузии происходит адсорбция анионов, которые взаимодействуют с двойным электрическим слоем.

Метод ЕП применяют для:

- исследований месторождений подземных вод;

- определения областей питания и разгрузки водных объектов.

- выявления зон карстово-суффозионных процессов;

- мониторинга состояния гидротехнических сооружений;

- обнаружения участков коррозии металлоконструкций;

- оценки качества гидроизоляции объектов, защищенных катодным методом.

Съемка естественных электрических потенциалов выполняется либо по отдельным линиям (профильная съемка), либо по системам обычно параллельных профилей, равномерно покрывающих изучаемый участок (площадная съемка).

Съемка естественных потенциалов может выполняться двумя способами: способом потенциала (U), при котором производятся измерения разности потенциалов между одной неподвижной точкой и всеми пунктами наблюдений изучаемого профиля или площади, и способом градиента-потенциала (ΔU), при котором измеряется разность потенциалов между двумя электродами, расположенными на постоянном расстоянии друг от друга и перемещаемыми одновременно по профилям.

Для проведения электроразведочных работ используется широкий спектр различного оборудования производства России и дальнего зарубежья, который может быть использован при проведении работ на плотинах и дамбах.

Для интерпретации результатов электроразведочных данных И информации визуализации отчетной каждый ИЗ вышеперечисленных комплексов своем составе соответствующее программное имеет В обеспечение.

3.2 Георадарные исследования

Георадар – это прибор радиолокационного зондирования (GPR), для подповерхностных исследований, направленных на получение детальной информации об объекте в реальном режиме времени. Работа георадара основана на явлении отражения высокочастотного электромагнитного сигнала от границ объектов с отличными от среды ИХ нахождения электрическими характеристиками в соответствии с рисунком 13.



Рисунок 13 – Отражение электромагнитных волн

Основные преимущества георадара:

-компактность в работе;

- использование георадара не требует дополнительного оборудования и мощных источников энергии. Георадар одинаково эффективный при исследовании вертикальных, наклонных и горизонтальных поверхностей.;

 применение используемого в георадаре георадиолокационного метода диагностики является на данный час самым перспективным для точного определения характеристик исследуемого объекта;

- и главное, георадар использует неразрушающий метод исследования и контроля – георадиолокацию.

Принцип действия георадара целиком и полностью основывается на радиолокации: излучение и фиксация отраженных электромагнитных импульсов. Импульс производится самим прибором и при помощи излучателя (антенны) направляется в изучаемую среду. Средой может быть любой материал: бетон, грунт и пр. Среда может иметь неоднородную структуру, что и отражает прибор. На основании таких исследований выявляются различные пустоты и вкрапления других материалов [41].

При инженерно-геологических изысканиях используются возможности георадара по сканированию грунта определения уровня грунтовых вод, зон повышенной обводненности; выявления участков развития опасных геологических процессов (карста, оползания и др.) и других задач [42, 43].

Современные георадары просвечивают грунт на глубину до 100 метров. Искомый объект должен быть сопоставим по своему размеру с глубиной залегания, а также должен быть контрастен по своим свойствам с окружающей средой.

Как правило в георадиолокации используются частоты сигналов от 50 до 1500 МГц, благодаря этому расширяются возможности поиска скрытых объектов как в конструкциях, так и в грунтах на самых больших глубинах.

3.3 Сейсмическая разведка КМПВ-МРВ

На вещество Земля действуют различные физические, химические и другие явления. Возникающие при этом силы стремятся изменить форму вещества, его объем и положение в пространстве. В любом случае энергия воздействия затрачивается на три вида процессов:

– механические перемещения массивов вещества (работу),

 неупругие процессы, приводящие к изменению структуры вещества или его разрушению (изменение внутренней энергии, которое выделяется в виде тепла),

– упругие волны, уносящие часть энергии от места воздействия и затухающие по мере распространения (эта энергия, в конечном итоге, также выделяется в виде тепла).

Поле упругих волн, трясений, создаваемое различными процессами в толще земной коры называется сейсмическим полем. Твердые тела сопротивляются изменению своего объема (при растяжении, сжатии) и формы (при кручении, сдвиге отдельных его частей). Таким образом твердое тело обладают упругостью объема и упругостью формы. Жидкости и газы обладают только упругостью объема, но не обладают упругостью формы, за счет того, что частицы вещества не связаны между собой, а спокойно проскальзывают друг относительно друга.

Упругие волны в твердых геологических средах называют сейсмическими волнами. В их состав входят как акустические волны, так и волны, связанные с изменением форм тел. Поле сейсмических волн в реальных условиях представляет собой сложную комбинацию волн, созданных различными источниками возбуждения и прошедших по геологическим средам с различными физическими свойствами.

То есть структура сейсмического поля зависит от свойств среды, в которой оно создается. Это позволяет посредством наблюдения поля сейсмических волн и определения его характеристик узнавать физические геологические свойства изучаемых сред.

Геологические среды (в нашем случае, дамба) в первом приближении можно считать упругими. Поэтому для описания сейсмических волн используют теорию упругости – раздел механики сплошных сред, изучающий деформации упругих твердых тел, ИХ поведения при статистических и динамических нагрузках.

Упругие волны, основным законом теории упругости является закон Гука, связывающий напряжение и деформацию упругой среды. Изучая растяжение тонких стержней, он получил, что для случая малых напряжений и деформации сила упругости \mathbf{F}_{ynp} , возникающая в стержне и сопротивляющаяся деформации, прямо пропорциональна величине этой деформации $\Delta \mathbf{I}$ в соответствии с рисунком 14.

$$F_{\rm ynp} = -k\Delta l \tag{3}$$

где *k* – коэффициент упругости, зависящий от свойств материала и размеров стержня.



Рисунок 14 – К описанию закона Гука

Закон действует при малых деформациях в одном направлении не только для тонких стержней, но и для любых малых объёмов однородного вещества

$$\sigma = E\varepsilon \tag{4}$$

где $\sigma = F/S$ – механическое напряжение, равно отношению силы F, приложенной к поперечному сечению S тела. Единицей измерения модулей

напряжения σ является паскаль (Па) или Н/м². Величина $\varepsilon = \Delta l/l$ обозначает относительное изменение длины 1 тела, а E – модуль продольного растяжения (Модуль упругости Юнга).

Изменение формы объёма и размеров под действием напряжения называются деформацией. Напряжения (силы, действующие на единицу быть площади), как И деформации, могут растягивающими ИЛИ слвиговыми всесторонне стягивающими, или сжимающими. Коэффициентами связи между напряжениями и деформациями среды называются модулями упругости.

Абсолютно упругим телом называется такое, которое после прекращения действия приложенных к нему сил восстанавливает свою первоначальную форму и объем. Если же часть энергии уходит на необратимые деформации, называют вязкоупругим. Тела, в которых наблюдаются только необратимые деформации, называются пластичными, неупругими.

При приложении к телу растягивающего усилия оно начинается удлиняться, а поперечное сечение уменьшатся. Эту особенность характеризуют коэффициент Пуассона, равный отношению поперечной и продольной деформации

$$\nu = \frac{\epsilon_{\rm non}}{\epsilon_{\rm np}} \tag{5}$$

v = 0 (для абсолютно хрупкого материала)

v = 0,5 (для абсолютно упругого материала)

Если к телу приложена произвольная нагрузка, то поведение материала при всестороннем сжатии описывает модуль объёмного сжатия *К*, а отклик материала на сдвиговую нагрузку описывает модуль сдвига. Модули связаны между собой отношениями:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$
 (6)

Единицей измерения модулей *E*, *K* и μ, как напряжение σ, является паскаль (Па).

После возбуждения в теле или среде возникает смещение, постепенно переходящее в другие части среды за счет упругих связей между частицами. Так в объёме среды распространяются упругие волны.

Распространение упругих колебаний можно изучать на основе волновой теории, решая соответствующие системы волновых уравнений для модели участка среды. Используют также метод геометрической сейсмики.

В некоторых случаях распространение сейсмических волн можно описать законами оптики, то есть представить волны в виде сейсмических лучей, вдоль которых в среде переносится волновая энергия. На границах разделов сред с различными упругими свойствами, лучи отражаются и преломляются. Метод представления волн в виде лучей, называют геометрической сейсмикой. Он позволяет наглядно изобразить процесс распространения волн в различных средах.

Волну характеризует такое понятие как фронт волны, представляющий собой множество точек пространства, до которого только дошли колебания. Волна, распространяющаяся в однородной изотропной среде от точечного источника, называется сферической волной, поскольку фронтом такой волны является сфера. Плоская волна имеет фронт в виде плоскости, перпендикулярной к направлению распространения.

Принцип Гюйгенса утверждает, что каждую точку волнового поля рассматривают как точечный источник колебаний. Так, что положение фронта волны в следующий момент времени определяют, как огибающую всех сферических волн, создаваемых каждой точкой фронта в соответствии с рисунком 15.



Рисунок 15 – Принцип Гюйгенса

Линия, перпендикулярная волновому фронту, является сейсмическим лучом. В однородных изотропных средах сейсмические лучи прямолинейны. В средах с изменяющейся скоростью лучи имеют вид кривых линий.

Принцип Ферма состоит в том, что время пробега волны между двумя точками, лежащими на одном луче, является наименьшим по сравнению с временем пробега волны вдоль любого другого пути, соединяющего эти точки. Принцип полностью эквивалентен принципу Гюйгенса, только сформулирован для лучей.

Но стоит помнить, что метод геометрической сейсмики справедлив лишь в тех случаях, когда длинна волны много меньше протяженности ее волнового фронта.

Типы упругих волн. Волны деформации объёма, в которых частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны, называют продольными или *P*-волнами (от анг. pressure – давление). В волнах деформации формы частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной распространению, поэтому их называют поперечными или *S*-волнами (от анг. shear- сдвиг). Отличия волн показаны в соответствии с рисунком 16.



Рисунок 16 – Продольные и поперечные волны

При этом колебания в поперечных волнах могут происходить в вертикальной (SV-волны) или горизонтальной (SH-волны) плоскость вдоль направления движения.

Поскольку физические принципы формирования Р- и S-волн отличаются, то отличаются и скорости их распространения. Значения скоростей продольных и поперечных волн для однородной и изотропной среды определяются формулами

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}, \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$
(7)

где ρ − плотность среды. Так как μ ≥0, становится понятно, почему Р волна движется быстрее S волны. В среднем для большинства горных пород

$$\frac{V_P}{V_S} = 1,73\tag{8}$$

В однородной анизотропной среде скорость распространения упругих волн по разным направлениям различна. В однородных горизонтальнослоистых средах скорость остается постоянной лишь внутри слоев и скачком меняется на их границах. В вертикально-градиентных средах скорость распространения волн непрерывно изменяется (например, увеличивается) с глубиной. Реальные геологические среды очень часто устроены так, что их можно описать в виде однородных горизонтально-слоистых сред. В таких средах от источника возбуждения во все стороны распространяются упругие волны различного типа в соответствии с рисунком 17.



Рисунок 17 – Виды сейсмических волн: А – падающая (прямая), Б – отраженная, В – преломленная, Г – головная, Д – рефрагированная, Е – поверхностная

От источника вглубь слоя распространяются объемные падающие волны, идущие вдоль слоя, обычно называют прямыми. По мере своего распространения волны затухают, амплитуда колебаний в них уменьшается. Это происходит за счет:

– геометрического расхождения фронта волны, из-за которого амплитуда убывает как 1/r, а энергия волны как $1/r^2$ (поскольку 4 вся энергия объёмной волны распределяется по поверхности сферического волнового фронта и площадью S=4 π r^2);

– неупругого поглощения в среде (когда часть энергии переходит в другие виды энергии, например, тепловую или электрическую), характеризуемого коэффициентом затухания β, который определяется на опыте для конкретной геологической среды.

На границах раздела сред с различными свойствами падающие волны частично отражаются и, преломляясь, проходят в следующий слой. Возникают отраженные и преломленные волны. При этом SH-волны испытывают обычное преломление, а P-волны возбуждают дополнительно SV-волны и наоборот в соответствии с рисунком 18. Волны, изменившие свой тип на границе, называют обменными волнами.



Рисунок 18 – Отражение и преломление Р-волн на границе раздела сред

Величину углов падения, отражения и преломления волн связывает закон Снеллиуса:

$$\frac{V_{P_1}}{\sin\theta} = \frac{V_{P_2}}{\sin\gamma} = \frac{V_{S_1}}{\sin\theta'} = \frac{V_{S_2}}{\sin\gamma'}$$
(9)

из которого, следует, что угол падения волны равен углу ее отражения. Если волна падает на границу раздела под так называемым критическим углом θ=θ_{KP}, то угол преломления γ=90°. В этом случае вдоль границы раздела пойдет скользящая преломленная волна. Именно она, согласно принципу Гюгенса, создает новые волны, называемые головными волнами. Если скорость распространения упругой волны в среде возрастает с глубиной, то лучи проходящих волн искривляются и возвращаются на поверхность. Такие рефрагированными. Подобную волны называются форму лучей рефрагированных волн можно объяснить следующим образом. Если среду с непрерывно возрастающей с глубиной скоростью разбить на отдельные слои, то на границах между ними должны образоваться преломленные волны. Углы преломления будут возрастать по мере углубления до тех пор, пока не достигнут у=90° в точке поворота луча. Далее, волна также последовательно выйдет на поверхность наблюдений.

При распространениях сейсмических волн в средах сложного строения (дайки, уступы, сбросы и т.п.) в зоне тени для проходящих волн могут возникать дифрагированные волны. Вдоль границ раздела сред с различными свойствами распространяются поверхностные волны, например, волна Рэлея, образующая на свободной границе упругого полупространства. При прохождении волны частицы среды движутся в вертикальной плоскости по эллиптическим траекториям; – волна Лява, возникающая на свободной границе твердого слоя, лежащего на упругом полупространстве. В этой волне частицы среды движутся вдоль слоя и поперек направления распространения волны;

– волна Стоунли, движущаяся вдоль плоской границы двух твердых сред, модули упругости и плотности, которые не сильно различаются.

Скорость рэлеевской волны принимает значение $V_R = (0,87-0,96) V_S$ при изменении коэффициента Пуассона в диапазоне v =0-0,5. Для скорости волны Лява справедливо $V_L < V_S$.

В силу геометрического расхождения, амплитуды поверхностных волн уменьшаются, как 1/√г. Это объясняется тем, что их фронт можно считать цилиндрическим. Поверхностные волны быстро затухают с глубиной, их основная энергия переносится в небольшом приповерхностном слое толщиной порядка длины волны.

Методика сейсморазведки основана на изучении кинематики волн или пробега различных времени волн ОТ пункта ИХ возбуждения ДО сейсмоприемников, улавливающих скорости смещения почвы, и ИХ динамики или интенсивности волн. В специальных достаточно сложных установках (сейсмостанциях) электрические колебания, созданные В сейсмоприемниках очень слабыми колебаниями почвы, усиливаются и автоматически регистрируются на сейсмограммах и магнитограммах. В интерпретации можно определить глубины результате их залегания сейсмогеологических границ, их падение, простирание, скорости волн, а используя геологические данные, установить геологическую природу выявленных границ.

В сейсморазведке различают два основные метода: метод отраженных волн (МОВ) и метод преломленных волн (МПВ) [44]. Меньшее применение находят методы, использующие другие волны. Решение сложнейших задач, связанных с высокоточным определением геометрии геологического разреза (ошибки менее 1%), стало возможным благодаря применению трудоемких систем возбуждения и наблюдения, обеспечивающих одновременный, иногда многократный съем информации с больших площадей и ее цифровую обработку на компьютере. Это обеспечивает выделение полезных, чаще однократно отраженных или преломленных волн среди множества волнпомех.

По решаемым задачам различают глубинную, структурную, нефтегазовую, рудную, инженерную сейсморазведку. По месту проведения сейсморазведка подразделяется на наземную (полевую). Сейсморазведка очень важный и во многих случаях самый точный (трудоемкий) метод геофизической применяющийся решения разведки, для различных геологических задач с глубинностью от нескольких метров (изучение физико-механических свойств пород) до нескольких десятков и даже сотен километров (изучение земной коры и верхней мантии).

Факторы, определяющие скорости распространения сейсмических волн.

54

Скорости распространения сейсмических волн в горных породах зависят от соотношения и распределения различных слагающих их минералов, объемов и форм пор, степени их заполнения жидкой и газообразной фазами, явлений на поверхности раздела фаз, давления, температуры и других факторов (таблица 5).

Таблица 5 – Изме	ерение плотности, порист	ости и скоростей упругих
волн для осадочных гор	рных пород и сред	

Породы	Плотност	Пористость	Скорости упругих волн			Удельное
	ь <i>о</i> , г/см ³	n, %	$V_{p, \text{ KM/c}}$		V_s , KM/C	электрич.
			газонас.	водонас.		сопр. ₽, Ом*м
ОСАДОЧНЫЕ						
Скальные и						
полускальные						
известняк	2,6	2-25	2	6	3	100 - 10 ⁵
доломит	2,7	2-17	1	5,5	2,5	$100 - 10^4$
мергель	2,4	5-35	1,5	4,5	2	$10 - 10^3$
песчаники	2,5	2-35	1	4,5	1	100 - 10 ⁴
Песчано-						
обломочные						
(рыхлые)	3	2-20	0,8	2,5	0,5	$100 - 10^3$
гравийно-	1,3-2	2-40	0,5	2	0,2	10 - 10 ⁴
галечные пески						
Пластичные						
(глинистые)	1224	2 40	15	2.5	0.4	1 100
(глина,	1,2-2,4	2-40	1,5	2,5	0,4	1-100
аргиллит)						

Роль вещественного состава и характера их структурных связей естественно влияет на прохождения скоростей продольных и поперечных волн. Такими являются пористость, насыщение их флюидами, глинистостью. Немаловажную роль характеристики геологической среды важно узнать коэффициент поглощения плоской волны. Как указывают авторы работы [45] при одинаковых пористости и влажности в монтмориллонитовых глинах V_P больше, чем в гидрослюдистых и особенно каолинитовых.

Объяснение этого феномена следует, видимо, искать в том, что монтмориллонит способен связывать наибольшее количество воды, которая имеет ряд специфических свойств. До некоторой степени упругие свойства горных пород зависят от минерализации воды и льда, заполняющих поры и трещины. Отметим, что для всех типов горных пород характерно уменьшение скоростей по мере увеличения пустотности. Изучение зависимости скоростей от пористости для консолидированных и рыхлых пород подтверждает это положение в соответствии с рисунком 19.



Рисунок 19 – Влияние пористости пород на величину V_P. Зависимость V_P от: а-пористости для консолидированных пород, б – пористости для рыхлых пород. 1 – доломит, 2 – известняк, 3 – песчаник, 4 – песок, 5 – россыпь стеклянных шариков, 6 – каменная россыпь

Роль заполнителя пор и трещин. Для инженерной сейсмики большое значение имеет зависимость скоростей продольных и поперечных волн от степени и особенностей заполнителя пустот. В этом отношении наиболее интересна роль поровой влаги. При увеличении влажности ω скорости продольных волн меняются незначительно вплоть до момента полного водонасыщения, когда они резко возрастают. Эта закономерность наиболее четко прослеживается для крупнообломочных и песчанистых пород, в которых при полном их водонасыщении V_P в несколько раз (иногда в 5-8) выше, чем при воздушном заполнителе пор. Напротив, в консолидированных породах, в связи с их незначительной пористостью, даже полная замена находящегося в порах воздуха на воду не дает заметного увеличения скоростей.

В глинистых породах зависимость $V_P = f(\omega)$ носит сложный характер. При увеличении влажности V_P возрастает до определенного предела, различного для глин неодинакового состава, после чего начинает несколько снижаться [46].

Эксперименты показывают, что возрастание скорости наблюдается до достижения максимальной молекулярной влажности четко момента выделяемого состояния для глин определенного минералогического состава (оно характеризуется количеством связанной воды, содержащейся в грунте под действием поверхностных сил притяжения). Таким образом, заполнение порового пространства связанной водой оказывается далеко не тождественным увеличению содержания свободной воды. При полном заполнении пор V_P возрастает в глинах скачком с меньшей, однако, амплитудой, чем в крупнообломочных породах и песках. Специфическая зависимость скоростей продольных волн от влажности дает возможность использовать сейсмометрию в качестве надежного способа определения глубины залегания подземных вод в разнохарактерных рыхлых и отчасти глинистых породах.

В полном согласии с их физической природой поперечные волны не распространяются в жидкой среде, в результате чего изменение влажности не оказывает практически никакого влияния на V_S даже при переходе рыхлых пород в состояние полного водонасыщения. Таким образом, уровень грунтовых вод не является сейсмической границей для поперечных волн, что служит дополнительным критерием правильности индикации этого уровня в качестве преломляющей границы для волн V_P.

Коэффициент поглощения. Для характеристики геологической среды помимо скоростей распространения продольных и поперечных волн и их отношения важно знать коэффициент поглощения α, который так же, как и скорости, нужно рассматривать раздельно для волн V_P и V_S. При изучении некоторых явлений, связанных с нарушенностью горных пород, этот параметр оказывается даже более информативным, чем скорость.

Коэффициент поглощения плоской волны в однородной среде определяется из соотношения $A(X) = A(0)e^{\alpha x}$, где A(0) - амплитуда волны в некоторой фиксированной точке; A(X) - амплитуда волны на расстоянии X от этой точки; α - коэффициент поглощения, характеризующий степень отличия реальной среды от идеально упругой модели, подчиняющейся закону Гука.

Если волна не является плоской, то изменение с расстоянием ее амплитуды связано не только с не упругостью среды, но и с расхождением фронта волны. Для неоднородной среды изменение амплитуды может быть следствием рассеивания энергии на неоднородностях. Значения коэффициента поглощения, а также диапазон его изменения для различных групп пород приводятся в соответствии с рисунком 20.



Рисунок 20 – Диапазон изменения коэффициента поглощения α_S волн α_P для различных пород (при частоте от 50 до 100 Гц)

В силу технической сложности определения этого параметра и вытекающего отсюда сравнительно небольшого числа наблюдений приводимые данные носят приближенный характер. В отличие от скоростей распространения упругих колебаний, мало зависящих от их частоты, коэффициенты поглощения α_P и α_S теснейшим образом связаны с этой характеристикой.

Можно говорить о том, что горные породы действуют по существу, как низкочастотный фильтр, в результате чего а. почти линейно повышается с увеличением частоты, α_P и α_S в горных породах возрастают в следующей последовательности: скальные — глинистые — рыхлые. При этом величина α_S обычно в несколько раз превышает значение α_P . Так же, как и на скорость, на величину коэффициента поглощения влияют вещественный состав пород, характер структурных связей в них, свойства заполнителя пустот и давление. Поглощение упругих волн в мерзлых породах ниже, чем в талых. Так, на частоте 30-200 кГц при температурах от минус 1 до минус 2°С, оно составляет от 0,01-0,1 до 0,3 см-1, в то время как в талых образцах поглощение значительно больше [47].

В качестве примера применения сейсморазведки геосейсмические разрезы, совмещенные с физико-механические (ФМС) свойства грунтов приведены в соответствии с рисунком 21. Методики обработки данных МПВ и МОВ в рамках изучения ГТС используются стандартные, главное требование к ним – в результате должны быть получены интервальные или послойные скорости продольных (Р) и поперечных (S) волн [48]. На основе данных о скоростях Р и S волн вычисляют следующие ФМС грунтов: отношение скоростей распространения продольных и поперечных волн Vp/Vs; модуль упругости (Юнга) Е; модуль сдвига G; коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации) µ; модуль всестороннего сжатия К.





Методы обработки сейсмических данных постоянно совершенствуются [49, 50]. Для проведения сейсморазведочных работ могут быть использовано сейсморазведочное оборудование различных производителей, укомплектованные соответствующим программным обеспечением.

4 Опытно-методические полевые работы на плотине водохранилища К-25

Во время полевого периода были проведены топографические работы, включающие создание и закрепление сети геофизических наблюдений. Также выполнены профильные геофизические измерения на территории плотины водохранилища К-25. Работы были выполнены в 2 полевые сессии.

Во время первой сессии проводились работы в соответствии с рисунком 22 следующими методами:

-дипольное электрическое зондирование методом вызванной поляризации (ДЭЗ-ВП);

- вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ);

- метод естественного электрического поля (ЕП);

- георадарная съемка.



Рисунок 22 – Схема геофизических съемок (первая сессия)



 профили/пикеты (в метрах) геофизических съемок; 2 – точки вертикальных электрических зондирований; 3 – высотные отметки в нижнем (н), верхнем (в) бьефах и в зоне фильтрации (ф); 3 – высотная отметка гребня по пикету 100; 5 – эксплуатационный водовод; 6 – аварийный водовод; 7 – зона фильтрации визуально наблюдаемая

Вторая сессия была проведена в соответствии с рисунком 23 методами: - метод естественного электрического поля (ЕП) при различных уровнях воды в водохранилище;

- сейсморазведка корреляционным методом преломленных волн и методом рефрагированных волн (КМПВ-МРВ).



Рисунок 23 – Схема геофизических съемок (вторая сессия)



 1 – гребень (а) и контур насыпного тела плотины (б) в нижнем бьефе; 2 – водовыпуски: рабочий (а) с местом сброса воды (б) и аварийный (в); 3 – профили электроразведочных съёмок методами естественного
электрического поля ЕП (а) и сейсморазведки КМПВ-МРВ (б), в числителе – номер профиля, в знаменателе – начальные и конечные пикеты в метрах; 4 – изменение уровня воды в водохранилище в период проведения электроразведочных съёмок методом ЕП

4.1. Топогеодезическое обеспечение

Основной задачей топогеодезических работ стало создание и надежное закрепление на местности сети профилей геофизических наблюдений, ориентированных перпендикулярно простиранию главных тектонических структур.

Были выполнены следующие работы:

1) Разметка профилей с шагом 5 метров и координатно-высотная привязка наблюдаемых точек с шагом 5 метров по геофизическим линиям.

2) Ввиду отсутствия у владельца плотины на водохранилище К-25 актуальных геодезических данных по реперным точкам плотины, привязка профилей и наблюдаемых точек проводилась в координатной системе WGS-84 UTM относительно точки ПР0 ПК0, координаты которой были вычислены с использованием GPS-навигатора Garmin Etrex20.

4.2 Дипольные электрические зондирования

Дипольные электрические зондирования выполнялись с целью оценки неоднородностей электрического сопротивления И поляризуемости грунтового разреза тела плотины на глубинах от 5 до 40 метров. Особое внимание уделялось выявлению локальных изменений этих параметров. Физической основой исследований служили экспериментально подтвержденные зависимости: уменьшение электрического сопротивления и увеличение поляризуемости суглинистых грунтов при повышении их влажности [51].

Для проведения зондирований использовалась схема "диполь-диполь", где питающая и приемная линии ориентировались по профилю. Получение данных об изменении электрического сопротивления в заданной глубинной области обеспечивалось выполнением измерений в каждой точке по 8 срезам при изменении расстояния между центрами питающей и приемной линий в соответствии с рисунком 24.

Длина питающих и приемных диполей составляла 10 метров, а расстояние между их центрами варьировалось от 10 до 80 метров. Шаг наблюдений по профилю равнялся 10 метрам. Такая схема обеспечила достаточную детализацию исследований на глубине до 40 метров.



Рисунок 24 – Схема электроразведочной установки для наблюдений методом ДЭЗ

1 – точки заземления питающих (а) и приёмных (б) электродов; 2 – расстояние между центрами пар питающих и приёмных электродов

Использованное оборудование включало генератор ГЭР-65W-500V и измерительный прибор ВПФ-8к. Погрешность измерений не превышала 3–5%.

4.3 Электроразведка методом естественного электрического поля

Первая сессия. Измерения естественного электрического поля выполнялись способом потенциала по линии профиля W длиной 210 метров, проложенному по урезу воды в верхнем бьефе. В качестве измерительных электродов использованы медно-сульфатные неполяризующиеся электроды. Измеритель электроразведочный приёмник ВПФ-210. Измерения потенциала, согласно требованиям [52], выполнялись относительно магистральной точки, расположенной примерно в середине профиля. По окончании измерений на последней точке проводились контрольные измерения в объёме не менее 10%.

Вторая сессия. Работы по электроразведке методом ЕП проводились по системе из пяти субпараллельных профилей с одним секущим в соответствии с рисунком 24. Измерения выполнялись методом потенциала с шагом 5 метров относительно магистральных точек, расположенных близ середины каждого профиля. После завершения измерений проведены контрольные замеры.

Съемка проводилась в три этапа при разных уровнях воды в водохранилище. В период работ происходил постепенный сброс воды, что привело к снижению уровня на 2 метра. Каждое из последующих измерений проводилось при дополнительном снижении уровня воды на 1 метр по сравнению с предыдущими данными.

Учитывая значительную неоднородность верхней части разреза, влияющую на условия заземления электродов, контрольные замеры выполнены примерно в объеме 50% от общего числа измерений. Суммарный объем за три цикла достиг 5,28 погонных километров. Погрешность измерений составляла до 5%.

4.4 Вертикальные электрические зондирования

Цель зондирования заключалась В уточнении электрических характеристик разреза суглинистой плотины, включая их особенности, обусловленные влажностью. Полученные данные были также использованы лля привязки диэлектрических границ на основании георадарных исследований.

Зондирования проводились по методу симметричной четырехэлектродной установки Шлюмберже в отдельных точках профилей, отработанных методами диэлектрического зондирования и георадарной съемки. Чтобы точно выделить геоэлектрические горизонты в первых метрах верхней части разреза, изменения размеров питающей и приемной линий выполнялись согласно схеме, которая указана в технических требованиях [52]. Максимальные длины разнесений АВ/2 варьировались от 40 до 150 метров.

Для работы использовались генератор ГЭР-65W-500V и измеритель ВПФ-210м. Всего выполнено 22 зондирования, включая 2 крестовых и 2 контрольных.

Для расчётов кажущегося сопротивления (рк) использовалась формула:

$$\rho_{\rm K} = K \times \frac{\Delta U}{I} \tag{10}$$

где ΔU — измеренное значение падения напряжения на приемной линии (MN) в милливольтах; I — сила тока в питающей линии (AB) в миллиамперах; K — коэффициент установки, рассчитанный по инструкции по электроразведке [53]. Рассчитанные значения ρ_{κ} отображались в виде кривых ВЭЗ в билогарифмическом масштабе. Погрешность измерений находилась в пределах 5%.

4.5 Георадарное зондирование

Целью этой съёмки ставилась оценка неоднородности тела плотины в параметре диэлектрической проницаемости. В качестве диагностических признаков ее неоднородности использованы повышенное затухание отражённых электромагнитных волн, деформации рельефа отражающих границ и их локальное исчезновение. Тогда как в местах с малой водопроницаемостью в экране предполагалось наличие контрастной отражающей границы по его обводнённой кровле.

Для решения этих задач применён аппаратурный комплекс ЛОЗА-Н с рабочими частотами 15-50 мГц. Шаг наблюдений по профилю составлял 1 метр, длина записи – 1024 нС. Съёмка выполнялась на частотах 25 и 50 мГц, обеспечивающей максимально возможную разрешающую способность по вертикали и глубинность зондирований не менее 30-40 метров. Погрешность измерений составила в пределах 3-5%.

4.6 Сеймическая разведка КМПВ-МРВ

Для достижения глубины зондирования с использованием рефрагированных волн до порядка 40 метров, длина годографа составляла не менее 200 метров. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось с помощью вертикальных ударов для продольных волн и горизонтальных ударов для поперечных волн, при этом расстояние между точками возбуждения составляло 40 метров.

Приём упругих колебаний проводился с использованием сейсмоприёмников GS-32CT для продольных волн и JF20 DX для поперечных волн. Чтобы снизить остаточный фон продольных волн, возбуждение поперечных колебаний выполнялось двумя разнополярными воздействиями (±Y). Шаг наблюдений вдоль профилей составлял 5 метров, что обеспечивало надёжную корреляцию волн с минимальной скоростью.

Регистрация упругих колебаний проводилась раздельно для продольных и поперечных волн с шагом квантования сигнала 1 мс. Общий объём выполненных работ методом сейсморазведки КМПВ-МРВ составил 1,035 погонных километра. Погрешность измерений составила 4-5 %.

5. Обработка и интерпретация геофизических данных, построение профильных и площадных моделей

Основой для выполнения этих задач послужили данные, полученные как с использованием таких методов, дипольные электрические зондирования (ДЭЗ), естественное поле (ЕП) и георадарные исследования. Кроме применялись того, точечные вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), представленные в форме разрезов геоэлектрических параметров, графиков ЕП и колонок геоэлектрических характеристик.

5.1 Дипольные электрические зондирования

Обработка данных включала расчёт величин кажущегося электрического сопротивления (ρ_{κ}) и фазового параметра поляризуемости (ϕ_{BII}) для всех точек измерений. На их основе были построены разрезы изолиний, отображающие пространственное распределение электрического сопротивления и поляризуемости геологической среды, а также области с локальными изменениями данных характеристик. Как указано в источнике [54], электрическое сопротивление и поляризуемость грунтов в большей степени зависят от уровня минерализации воды. Для корректного учёта этого влияния в анализе поляризуемости был использован параметр относительной поляризуемости η^* .

В работе [55] показано, что для зернистых ионопроводящих пород справедливо соотношение $\eta^* \approx \eta/\rho$, где: η – поляризуемость, ρ – удельное электрическое сопротивление. В этой связи результативные данные по ДЭЗ-ВП представлены в виде разрезов в параметре относительной поляризуемости.

5.2. Электроразведка методом естественного электрического поля

В состав работ по обработке по данному методу в первую сессию входило построение графиков распределения U_{EП} по линиям профилей, оценка погрешностей съемок по профилям, а также предварительный анализ данных мониторинговых наблюдений.

В соответствии с рисунком 25 представлены результаты оценки точности измерений по линии профиля. Разность ΔU между рядовыми и повторными измерениями не более 2.2 мВ, что не превышает требований инструкции по электроразведке. Е0.

Как видно из приведенных данных, максимальные расхождения между рядовыми и повторными измерениями были зафиксированы по ПК 80 (-2.5 мВ) и 200 (+2 мВ). В целом по отработанной площади расхождения не

превысили значений ±5 мВ, определенных инструктивными требованиями [53].



Рисунок 25 – Оценка качества съемки ЕП по данным повторных измерений по профилю Е0



1 – точки рядовых (а) и повторных (б) измерений

В результате предварительного анализа данных съемок по плотине К-25, выполненных при двух уровнях воды в водохранилище, различающихся на 1 метр, установлены следующие основные особенности пространственновременного распределения потенциала естественного поля:

- Наличие зон с аномально повышенными (ПК80 и 200-240) и пониженными (ПК160) значениями потенциала в соответствии с рисунками 27 и 28). По данным измерений І этапа природа первых двух зон может быть связана как с неоднородностью вещественного состава тела плотины, так и фильтрационными процессами в ней. Отрицательная аномалия в районе ПК 160, судя по значительной интенсивности и полярности, однозначно обусловлена окислительно-восстановительными процессами в области, прилегающей к стальному трубопроводу аварийного сброса воды.

- Поле потенциала корректируется при изменении уровня воды в зависимости от местоположения линий наблюдений в нижнем бьефе. По линии профиля E2 в соответствии с рисунком 26 по данным измерений I и II этапов графики U_{EП} практически параллельны и на разностной кривой значимых отклонений горизонтальной линии не получено. OT Это обстоятельство однозначно позволяет интерпретировать аномальные эффекты по ПК80 и 200-240 по профилю Е2 как обусловленные изменением адсорбционно-диффузионного потенциала при изменении вещественного состава тела плотины. Значимых проявлений фильтрационных процессов, изменяющих конфигурацию поля при различной динамической нагрузке на плотину, по линии этого профиля не установлено.



Рисунок 26 – Профиль Е2. Оценка динамики поля U_{ЕП} по данным измерений I и II этапов при снижении уровня воды в водохранилище на 1 м



1 – графики потенциала $U_{E\Pi}$: а – измерения I этапа, б - II этапа, в – разностные значения между данными а и б, г – осредненные разностные значения

Несколько иная картина распределения потенциала естественного поля во времени приведена в соответствии с рисунком 27 по линии профиля E1.



Рисунок 27 – Профиль Е1. Оценка динамики поля U_{ЕП} по данным измерений I и II этапов при снижении уровня воды в водохранилище на 1 м



1 – графики потенциала $U_{E\Pi}$: измерения I (а) и II(б) этапов, в – разностные значения между данными а и б, г – осредненные разностные значения; 2 – области аномально повышенных расхождений $U_{E\Pi}$

Также как и по предыдущему профилю, аномальные зоны в районах пикетов 80 и 160 существенных изменений не претерпели, что

предварительно проинтерпретировано отсутствием проявлений фильтрационных процессов.

В то же время на восточном фланге профиля в интервале ПК 190-230 разность потенциалов составила величину 7-10 мВ относительно уровня ±1-3 мВ при неизменном вещественном составе тела плотины в этой части профиля. Этот эффект предварительно проинтерпретирован как вызванный изменением интенсивности фильтрационных потоков воды из водохранилища в указанном интервале. Подтверждением правомочности такого вывода можно считать наличие визуально наблюдаемых протечек в даме в этой части профиля.

В районе ПК125-155 (вблизи трубопровода) также установлена динамика U_{EП}. Разность потенциалов в этом месте не превышает 3-4 мВ. Этот интервал проинтерпретирован как предположительно связанный с фильтрационными процессами.

По естественному электрическому полю – увязка значений поля и оценку погрешности съёмки по всему планшету, построение карт изолиний потенциала и его дисперсии во времени с выделением локальных и (или) линейных аномальных зон с повышенными значениями этого параметра. Далее было проведена разбраковка и интерпретация этих зон на предмет связи их с фильтрационными процессами.

Кроме того, по линиям максимальных значений градиента потенциала определено направление преимущественного стока подземных вод в теле дамбы.

Для визуализации результатов по методам ДЭЗ, ЕП используется программа Surfer, позволяющая вычерчивать поверхности карт и разрезов в среде Microsoft Windows. Основное назначение данной программы – обработка и визуализация двухмерных данных. Программа состоит из нескольких блоков, таких как: построение цифровой поверхности, вспомогательные операции по работе с цифровыми поверхностями, визуализация этих поверхностей. Программа дает возможность создавать высококачественные карты, преобразуя данные в контур, поверхность, каркас, изображения и в другие виды удобные для чтения.

Работы второй сессии проводились по аналогичной методике. В целом по всем 7 профилям расхождения составили порядка ±0.9 мВ, что не превышает ±5.0 мВ, определенных инструктивными требованиями.

5.3 Вертикальные электрические зондирования

Обработка результатов ВЭЗ включала количественные расчёты геоэлектрических характеристик разрезов и их инженерно-геологическую интерпретацию. Для определения геоэлектрических характеристик разреза по данным ВЭЗ использовался метод подбора, реализованный в программе V-master.

Для произвольных полевых установок данная программа позволяет проводить расчеты теоретических кривых ВЭЗ над горизонтально-слоистым разрезом м построением геоэлектрической модели.

Подбор кривых, при достижении невязки между наблюденными и теоретическими кривыми не более 5%, заканчивался построением геоэлектрических колонок, характеризующих интервальное распределение электрического сопротивления разреза.

Программа V-master предназначена для интерпретации данных вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и метода вызванной поляризации (ВП).

5.4 Георадарное зондирование

Обработка данных включала трассирование отраженных волн от суглинистого экрана и выявление в них зон с повышенным затуханием, с ухудшением отражающих свойств этой границы связанных с использованием программного продукта Krot179Ns4, входящего в состав георадарного комплекса Лоза-Н [56]. В условиях высокого уровня промышленных помех, вызванных различными металлоконструкциями и ЛЭП, для повышения достоверности георадарных данных они преобразовывались в сейсмический формат с целью дальнейшей обработки программными средствами сейсморазведки Vista-65 и SeiSee для повышения соотношения сигнал-помеха.

5.5 Сейсмическая разведка КМПВ-МРВ

Предварительная обработка полевых данных включала монтаж сейсмограмм по пунктам возбуждения, а также процедуры по повышению соотношения сигнал/помеха исходных данных. Необходимость в такой процедуре была обусловлена высоким уровнем техногенных помех, связанных с движение транспорта по автомагистрали Каскелен-Чемолган расположенной недалеко от объекта работ. Пример эффективности применения полосовой фильтрации для ослабления транспортных помех приведен в соответствии с рисунком 28.

В поле поперечных волн из-за помех интервал профиля ПК130-160 практически выпадает из обработки в соответствии с рисунком 28-а. Экспериментально подобранная полосовая фильтрация (в соответствии с рисунком 28-б позволила решить не только этот вопрос, но и повысить достоверность корреляции первой поперечной волны по всей расстановке.



Рисунок 28 – Примеры волновых полей первых волн и их первичной обработки по профилю 0: а, в – наблюденные поля поперечных (а) и продольных (в) волн и результаты их фильтрации (б, г) для ослабления влияния поверхностных волн, возбуждаемых автотранспортом



1 – оси синфазности первых поперечных (а), продольных (б) волн и точки смены их кажущихся скоростей

Данные сейсморазведки первых вступлений обрабатывались по двум технологиям – для преломленных и рефрагированных волн. В первом случае выделялись интервалы годографов с преломлёнными волнами, критерием которых служила параллельность нагоняющих годографов. Далее рассчитывались граничная скорость и глубина преломляющих границ способом T0 по общеизвестной методике [46].

При анализе волновых полей как продольных, так и поперечных волн был установлен существенный вклад в их структуру рефрагированных волн. Пример годографов таких волн приведён в соответствии с рисунком 29.



Рисунок 29 – Профиль 0. Годографы первых вступлений продольных (Тр) и поперечных (Тs) волн в градиентной среде

Как видно из приведённого рисунка годограф продольной волны (Тр) характеризует исследуемый разрез как горизонтально слоистый с возрастанием скорости упругих волн от 300 до 1900 м/с. При этом наиболее резкое изменение скорости (в 3 раза) имеет место на расстоянии 25 метров (ПК175) от пункта возбуждения (ПК150). Таким образом, в районе ПК175 произошла смена волн – прямой, распространяющейся со скоростью 300 м/с, на преломлёно-рефрагированную с глубины порядка 5-7 метров. Далее, в интервале ПК175-200 происходит постепенное возрастание скорости с 900 до 1900 м/с, что свидетельствует о рефрагирующих свойствах среды.

Интервал годографа ПК200-260 представлен прямой линией С кажущейся скоростью 1900 м/с. Этот интервал постоянной вполне правомочно интерпретировать как обусловленный наличием преломляющей границы и, судя по точке выхода этой волны в первые вступления, эта граница находится на глубине порядка 18-20 метров. В таких случаях система наблюдений c расстоянием применённая между пунктами возбуждения 40 метров и пунктами приёма 5 метров позволила более точно определять как глубину залегания преломляющих границ, так и граничную скорость по ним способом ТО.

Для годографа поперечной волны (Ts) характерна явно выраженная криволинейная форма. Признаков смены волн, сопровождающейся резким увеличением кажущейся скорости, в нём практически нет. В результате разделения этого годографа на отрезки с постоянной кажущейся скоростью показано, что они представляют собой интервалы длиной не более 20-30 метров, что практически исключает возможность его интерпретации по методике для головных волн. В таких случаях основным источником о строении изучаемого разреза являлись данные сейсмической томографии, выполненной с помощью программного продукта X-Tomo [57], в виде скоростных разрезов в продольных и поперечных волнах.

Для повышения точности локализации скоростных границ рассчитывался вертикальный градиент скорости в каждой точке скоростного разреза. Пример реализации такого приёма показан в соответствии с рисунком 30.



Рисунок 30 – Профиль 0. Применение вертикального градиента скорости упругих волн для уточнения глубины скоростных границ



1 – каменная наброска с песчаным заполнителем; 2 – водопроницаемые суглинистые грунты; 3 – слабо проницаемые суглинистые грунты; 4 – уплотненные суглинки основания плотины; 5 – русловые гравийно-валунно-суглинистые отложения; 6 – изолинии скорости поперечных волн; 7 – графики вертикального градиента скорости поперечных волн (gradVs) (a) и линии средних значений gradVs (б) по пикетам 130 и 200; 8 - область значений gradVs , превышающих стандартное отклонение от среднего (а) и линия проекции максимального значения этого параметра (б) на литологическую колонку

На приведённом фрагменте скоростного разреза область повышенного градиента скорости, согласно распределению изолиний этого параметра, захватывает интервал разреза с высотными отметками 755-741 метр. При этом возрастание вертикального градиента скорости вполне логично увязывается с появлением в разрезе слабо проницаемых суглинистых грунтов. Ниже основания плотины очевидно, что прирост скорости становится незначительным, что и проявилось снижением значений этого параметра.
Положение максимума градиента скорости поперечных волн до 14 1/с однозначно указывает на отметку 747 метров, соответствующей глубине залегания уплотнённого основания плотины.

График значений вертикального градиента скорости по ПК200 с незначительными отклонениями этого параметра от средних значений свидетельствует об отсутствии существенных скоростных границ. Наиболее вероятно она расположена в прибортовой части плотины за пределами её суглинистого основания.

Обработка полученных волновых полей осуществлялась по стандартной методике для головных волн методом T₀ с построением преломляющих границ и графиков граничной скорости, также и по методике рефрагированных волн с построением скоростных разрезов с для использованием пакета программ для сейсмической томографии X- Тото. Х-Данное программное обеспечение Tomo предназначено для интерпретации данных сейсмической томографии в слоистой среде. В состав программы включены мощные средства визуализации, модели лучей, годографов и редактирование моделей. Особенностью программы являются средства анализа лучей для определения скорости волн и время прихода Программа позволяет косвенно сейсмических волн. наблюдать за распространением фронта волны по решетке, визуализация и их печать в заданном масштабе. Также она поддерживает многовариантную обработку с хранением промежуточных данных.

Программное обеспечение Vista, предназначенное для контроля качества и полной обработки 2D/3D сейсморазведочных данных полученных при наземной съемке, содержит проверенные на практике алгоритмы для оптимального полевого контроля качества, позволяющие завершить обработку данных в офисе. Преимуществами применения программы являются ее гибкость, надежность и простота в использовании, что повышает эффективность работы и максимально увеличивает надежность результатов.

Для просмотра на компьютере исходных сейсмических данных в стандартных файлах использовалась программа SeiSee. Она позволяет: отображать данные сейсморазведки в различных режимах; перевод цветовых палитр в текстовый файл в режиме «Export Import»; изменение масштабов атрибутивных данных; вывод данных на внешнее устройство; сохранение результатов в формате bmp; просмотр числовых значений трассы и т.д.

6 Моделирование и создание физико-геологических моделей

Физико-геологическая модель (ФГМ) объекта исследования – обобщенная и формализованное описание в пространстве и во времени структуры физических параметров геофизических и геологических полей, отображающей реальный объект с определенной степени вероятности. Следовательно, ФГМ является логическим звеном между геофизическими измерениями и геологией [58].

6.1 Дипольные электрические зондирования

Для построения 2D модели по данным ДЭЗ проведен расчёт значений кажущегося электрического сопротивления (ρ_{κ}) и фазового параметра поляризуемости. Также были построены разрезы изолиний этих параметров, отражающих пространственное изменение электрического сопротивления и поляризуемости геологической среды.

Разрезы в параметре электрического сопротивления. Согласно данным в соответствии с рисунком 31, геоэлектрический разрез тела плотины во всех трех сечениях характеризуется низкими значениями ρ_{κ} , которые не превышают 30 Ом^{*}м. При этом наблюдается общая тенденция роста данного параметра с увеличением глубины.

Одной из основных характеристик разрезов является их значительная латеральная неоднородность. Это проявляется в наличии контрастных электропроводящих участков различного размера.

На всех профилях, проложенных от гребня плотины (профиль 0) к ее склонам до нижнего бъефа (профили 1 и 2), участки с повышенной электропроводностью расположены преимущественно бортов ВДОЛЬ сооружения. Конкретные зоны таких аномалий отмечаются по соответствующим отметкам: для профиля 0 — ПК 60-95 и 160-195, для профиля 1 — ПК 47-90 и 150-175, для профиля 2 — ПК 35-62 и 100-133. Эти области прослеживаются практически по всей глубине зондирования (5-40 метров), включая зоны ниже основания плотины, расположенного на глубине около 25 метров от гребня. Особо примечательной является зона фильтрации в районе ПК110-125 на линии профиля 2.

Наличие металлических водоводов (рабочего и аварийного) также может оказывать влияние на распределение электрического сопротивления. Вблизи водоводов фиксируются локальные аномалии, связанные с усилением электропроводности, что может приводить к усложнению интерпретации данных зондирования в этих зонах. Однако влияния водоводов не удается полностью увязать с протяженностью участков повышенной проводимости. В разрезах по профилям 0 и 1 такие области существенно выходят за глубины расположения водоводов, а на профиле 2 их взаимосвязь практически отсутствует.



Рисунок 31 – Оценка неоднородности тела плотины в параметре электрического сопротивления: а-в – разрезы изоом по данным электроразведки методом ДЭЗ, г – график потенциала U_{EП} по урезу воды с вынесенными зонами пониженных значений этого параметра

4 1 $\begin{bmatrix} \bullet & \bullet \\ a & \bullet \end{bmatrix}$ 2 $\boxed{3}$ 3 $\begin{bmatrix} \bullet & \bullet \\ a & \bullet \end{bmatrix}$ 4

изолинии значений ρ_к: зоны пониженных (а) и повышенных (б) уровней сопротивления; 2 – проекции линий рабочего (а) и аварийного (б) водоводов на поверхность плотины; 3 – межблочные зоны пониженного сопротивления, интерпретируемые как потенциальные пути фильтрации; 4 – графики ЕП: зарегистрированные значения (а), трендовая линия (б) и аномально низкие зоны (в), которые могут быть обусловлены локальными зонами фильтрации

Таким образом, электропроводности высокой изменения с вероятностью отражают инженерно-геологические особенности плотины. В частности, они могут быть связаны с локальным увеличением влажности в суглинистом основании плотины или возникновением фильтрационных потоков. Наличие участков с повышенной влажностью может быть подтверждено данными электроразведки естественного поля (ЕП) на профиле W, где фиксируются две зоны аномально низкого потенциала (ПК55-85 и ПК125-143). Эти зоны характерны для нисходящей фильтрации

воды [56] и совпадают с участками повышенной проводимости на глубинах от основания плотины до ее верхних слоев.

Разрезы в параметре относительной поляризуемости. Данные относительной поляризуемости в соответствии с рисунком 32, демонстрируют фоновые либо сниженные значения параметра в центральных частях разрезов профилей 0 и 2. На флангах же прослеживаются наиболее выраженные области повышенной поляризуемости.



Рисунок 32 – Оценка неоднородности тела плотины в параметре относительной поляризуемости: а-в – распределение относительной поляризуемости по методу ДЭЗ, г – график потенциала (UEП) U_{ЕП} вдоль



1 – изолинии относительной поляризуемости (ηк): области пониженных (а) и повышенных (б) значений этого параметра; 2 – проекции на дневную поверхность по линиям профилей водоводов в теле плотины: рабочего (а) и аварийного (б); 3 – межблочные зоны повышенной поляризуемости, интерпретируемые как возможно связанные с локальной повышенной обводненностью суглинистого тела плотины: уверенно выделяемые, б - предполагаемые; 4 – графики естественного электрического поля по урезу воды: наблюденный (а), линия тренда (б) и области (в) аномально пониженных значений этого параметра, вероятно связанные с локальными зонами фильтрации в теле плотины

По профилю 1 более детальное представление особенностей распределения параметров электрического сопротивления и относительной вблизи дневной поверхности, области максимальной поляризуемости глубиной характеризуются малой залегания. Такая пространственная взаимосвязь между аномалиями поляризуемости и трубопроводами, которые предположительно находятся в условиях повышенной увлажненности в суглинистых позволяет предположить породах, окислительновосстановительную природу обнаруженных аномалий на данном профиле. поляризуемости приведено в соответствии с рисунком 33. Зоны с аномально высокой поляризуемостью имеют более компактный характер и в основном совпадают с участками повышенной электропроводности. Однако на интервалах профиля 1 (ПК140-155) и профиля 2 (ПК20-30) участки повышенной поляризуемости смещаются к западной периферии областей электропроводности. выявления причин подобного высокой Для расхождения рекомендуется проведение детализированных исследований на данных участках.



Рисунок 33 – Схема расположения зон потенциальных путей фильтрации, возможно связанных с локальной повышенной обводненностью в суглинистом теле плотины по данным электроразведки ДЭЗ-ВП



 профили/пикеты; 2 – профиль электроразведки ЕП по урезу воды водохранилища; 3 – точки ВЭЗ; 4 – точки определения высотных отметок воды в нижнем (НБ) и верхнем (ВБ) бьефах; 5 – эксплуатационный (а) и аварийный (б) водоводы; 6 – зона фильтрации визуально наблюдаемая; 7 – межблочные зоны пониженного электрического сопротивления, интерпретируемые как потенциальные пути фильтрации в теле плотины; 8 –

зоны повышенной поляризуемости, интерпретируемые как возможно связанные с локальной повышенной обводненностью суглинистого тела плотины

В профильных ДЭЗ целом приведенные результаты съемок свидетельствуют 0 высокой эффективности метода для изучения неоднородности тела плотины К-25 и выявления в ней участков, которые характеризоваться повышенной водопроницаемостью могут при И, благоприятных условиях, выступать в качестве путей сосредоточенной фильтрации воды из водохранилища.

При этом, как показали исследования, актуальным является уточнение природы геоэлектрических аномалий, наблюденных в зонах возможного влияния водоводов, которые имеют место во всех плотинах. Решение этой задачи требует привлечения методов, направленных на получение сведений по упруго-деформационным свойствам суглинистых грунтов, так как именно эти свойства в первую очередь изменяются при повышении их локальной водопроницаемости как потенциальные пути струйной фильтрации.

6.2 Метод естественного электрического поля

Наблюдённые поля при последовательном снижении уровня воды в водохранилище представлены в соответствии с рисунком 34. Общей закономерностью распределения ЕП по всем циклам измерения является повышение его значений в сторону нижнего бьефа. В принципе, такое повышение можно было бы интерпретировать, согласно [59], как имеющее фильтрационную природу. Однако, наиболее контрастные из таких зон (A1 и A2) проявились практически только по линии профиля 3, что при неувязанности потенциала может привести к ошибочной интерпретации полученных данных.

В отношении аномальной зоны АЗ следует отметить, что она установлена в области пересечения с действующим водосбросом и профилями ЕО, Е1 и Е2. Динамика этой аномальной зоны неоднозначная. Наиболее явные различия в ней проявились при снижении уровня воды в водохранилище на 2.0 метра в соответствии с рисунком 36-г – существенно уменьшились амплитуда и размеры области повышенных значений потенциала в целом отрицательном поле этого параметра. Кроме того, есть вероятность образования этой аномальной зоны за счёт стока воды по рельефу.



Рисунок 34 – Наблюдённое естественное электрическое поле с элементами интерпретации при изменении уровня воды в водохранилище с 757.5 до



1 – гребень (а) и контур насыпного тела плотины (б) в нижнем бьефе; 2 – водовыпуски: рабочий (а) и аварийный (б); 3 – профили электроразведочной съёмки методом ЕП; 4, 5 – зоны аномально повышенных (4) и пониженных (5) значений U_{ЕП}; 6 – предполагаемое направление фильтрации по рельефу дневной поверхности.

Mean – средние значения естественного электрического поля, наблюдённого в различные периоды времени;

Standard – стандартное отклонение от средних значений естественного электрического поля, наблюдённого в различные периоды времени

В определённой степени ситуация с аномалиями прояснилась после увязки потенциала. Для этого использованы данные измерений по секущему профилю E5, в соответствии с рисунком 35.



Рисунок 35 – Увязанное (б, в, г) естественное электрическое поле с элементами интерпретации при изменении уровня воды в водохранилище с 757.5 до 755.5 метров

 $\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4/0 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4/0 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\$

1 – гребень (а) и контур насыпного тела плотины (б) в нижнем бьефе; 2 – водовыпуски: рабочий (а) и аварийный (б); 3 – профили электроразведочной съёмки методом ЕП; 4-5 - области повышенных (4) и пониженных (5) значений ЕП; 6 – предполагаемые направления общего стока (а) и локальной фильтрации (б) воды через плотину

Основной закономерностью распределения исправленного поля потенциала в соответствии с рисунками 356, в, г является наличие

контрастных зон повышенных значений этого параметра в северо-восточной части исследованной площади A1 и A2 в области, прилегающей к рабочему трубопроводу, по которому осуществляется постоянный сброс воды. Кроме того, по данным съёмки выявлен ряд зон A3 с аномально пониженными значениями U_{EП}, в областях, прилегающих к основанию плотины.

Аномальная зона A1. Наиболее контрастно проявлена при максимальном уровне воды в водохранилище в соответствии с рисунком 35б. Принимая во внимание то, что от гребня в сторону этой зоны имеет место возрастание потенциала, вполне возможно, что этот эффект может быть вызван локальным потоком фильтрации. Косвенным подтверждением наличия такого потока можно считать уменьшение интенсивности аномалии A1 при снижении уровня воды на 1.5 метра в водохранилище в соответствии с рисунком 35-в.

Некоторым нарушением закономерности в изменениях этой аномальной зоны следует считать данные измерений, полученные при минимальном уровне воды в водохранилище. На этот период зафиксирована тенденция к возрастанию размеров этой зоны и изменению положения области с максимальными значениями U_{EП}. Принимая во внимание, что в период между вторым и третьим циклами измерений существенно изменился гидродинамический режим работы плотины за счёт снижения в несколько раз объёмов сброса воды, вполне возможно, что наблюдённый эффект связан с возросшей нагрузкой на тело плотины и, как следствие, усилением фильтрации.

Аномальная зона A2. Пространственно увязывается с действующим водовыпуском. Принимая во внимание, что наибольшие изменения в конфигурации и интенсивности этой аномалии получены в третьем цикле измерений в соответствии с рисунком 35-г, предположена вероятность её фильтрационной природы, связанной с восходящими потоками воды из мест её утечки из трубопровода.

С другой стороны, эпицентр этой аномалии расположен примерно в 15 метрах от трубы, которая в наблюдённом поле фиксировалась отчетливым минимумом, который был исключён из последующего анализа. В этой связи вполне возможно, что эта аномалия вызвана, главным образом, неоднородностью строения тела плотины с преобладанием в этой части песчаных грунтов, а её динамика – повышенной фильтрацией.

Группа аномальных зон A3. Максимальная интенсивность этих аномалий приурочена к створам действующего и аварийного водовыпусков, проложенных в этой части площади практически на дневной поверхности. Учитывая это обстоятельство, наиболее вероятна окислительновосстановительная природа этих зон. Однако одна из них, расположенная в створе аварийного водовыпуска, с учётом динамики её размеров, особенно между первым и вторым циклами измерений в соответствии с рисунками 37б, в, сходной с аномальной зоной A1, вполне может быть обусловлена эффектом от дренажа в основании плотины.

В целом, как видно из приведённых данных, интерпретация полей U_{EII} традиционным способом может считаться ЛИШЬ условной В силу неоднозначности диагностики наблюдённых аномальных эффектов В условиях изучаемого объекта.

Для повышения достоверности диагностики эффектов U_{EП}, связанных с фильтрационными процессами использованы элементы математической статистики, в частности дисперсионный анализ. Для каждой точки трёхкратных наблюдений рассчитывалась дисперсия σ^2 по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} \tag{11}$$

где: x_i – наблюденное значение, \overline{X} -выборочное среднее значение, n – размер выборки.

Перед расчётами этого параметра из наблюденного поля по каждому профилю исключалась региональная составляющая $U_{E\Pi}$ по его тренду. Пример такого расчёта параметра σ^2 приведён на рисунке 36, иллюстрирующем наличие четкой аномальной зоны в интервале пикетов 100-150, которую проблематично обнаружить в поле $U_{E\Pi}$.



Рисунок 36 – Результаты расчёта дисперсии $U_{E\Pi}$ по профилю 3 $U_{E\Pi}$ 1, $U_{E\Pi}$ 2, $U_{E\Pi}$ 3 – графики потенциала по профилю 3, полученные при первом, втором и третьем циклах измерений

Данные по распределению дисперсии $\sigma^2 U_{E\Pi}$ по всему планшету приведены в соответствии с рисунком 37-а, при этом сечение изолиний этого параметра принято равным величине стандартного отклонения от среднего – 1.3.

Анализ полученных данных свидетельствует о значительном увеличении дисперсии в зоне между водовыпусками. Наиболее интенсивная аномалия Д1-1 в северо-западной части плотины характеризуется максимальным повышением фильтрации.

В том же пространстве между трубопроводами находятся аномальные зоны Д1-2, Д1-3 и Д1-4, где максимальные значения дисперсии сосредоточены вдоль линии профиля -1, проложенного по верхнему бьефу. Учитывая конфигурацию изолиний увеличенных значений дисперсии, эти зоны объединены с зоной Д1-1, формируя единую область с повышенной фильтрационной активностью.



Рисунок 37 - Карта дисперсии ЕП (а) при изменении уровня воды в водохранилище с 757.5 до 755.0 метров и схема зон протечек в теле плотины (б) по этому параметру

 $\begin{bmatrix} \mathbf{6} \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} \mathbf{2} \begin{bmatrix} 4/10 \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{2} \begin{bmatrix} 4/10 \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{3} \begin{bmatrix} \mathbf{6} \\ \mathbf{6} \end{bmatrix} \mathbf{4} \begin{bmatrix} \mathbf{6} \\ \mathbf{6} \end{bmatrix} \mathbf{5} \begin{bmatrix} \mathbf{6} \\ \mathbf{6} \end{bmatrix} \mathbf{6} \begin{bmatrix} \mathbf{7} \\ \mathbf{7} \end{bmatrix} \mathbf{7}$

1 – гребень (а) и контур насыпного тела плотины (б) в нижнем бьефе; 2 – водовыпуски: рабочий (а) и аварийный (б); 3 – профили электроразведочной съёмки методом ЕП; 4 – области значений дисперсии ЕП: а – фоновых (не превышающих стандартного отклонения σ), б – повышенных (до 2σ), в – аномально повышенных (>2σ); 5 – зоны протечек: а - наиболее проявленные, б – предполагаемые; 6 – предполагаемые области повышенной фильтрации (по контурам значений дисперсии выше средних); 7 – предполагаемые направления фильтрации воды в плотине; Д1-Д4 – зоны аномально повышенных значений дисперсии U_{ЕП}

Локальная аномальная зона Д2 расположена за пределами плотины на расстоянии примерно 15–20 метров.

Характерной особенностью рельефа дневной поверхности в этом месте является наличие провальных явлений. Предположено, что изменение естественного электрического поля в них, а следовательно, и фильтрационная обстановка, формируются под воздействием эпизодически выпадающих атмосферных осадков.

На восточном стороне плотины ближе к её гребню была обнаружена аномальная зона ДЗ. Наличие этой зоны практически подтверждает фильтрационное происхождение аномалии А1 в поле потенциала и уточняет плановое положение и направление локальной фильтрации в прибортовой части плотины.

Схема зон просачивания, основанная на параметре U_{ЕП} позволяет охарактеризовать фильтрационные процессы в теле плотины в соответствии с рисунком 37-б. Наиболее активное развитие фильтрационных процессов отмечается в северо-западной прибортовой части плотины. Учитывая, что

этот борт находится в пониженной части рельефа дневной поверхности, то следует ожидать здесь и дополнительное деструктивное действие атмосферных осадков. Вопрос о совместном диффузионно-адсорбционном и фильтрационном происхождении аномалии Д1-1 вполне однозначно может быть решён по данным сейсморазведки.

Зона фильтрации ДЗ отличается меньшими значениями параметра дисперсии. Вместе с тем, направление зоны ДЗ, ориентированное вниз по рельефу и практически пересекающее борт плотины, может создавать условия для потенциальной потери устойчивости сооружения.

В данным электроразведки ЕΠ получена общая целом ПО характеристика фильтрационной обстановки в плотине К-25. По аномальным эффектам в параметре дисперсии потенциала естественного поля выявлены зоны, предположительно связанные с фильтрационными процессами, требующие уточнения природы и определения фильтрационных ИХ характеристик. Составлена схема расположения локальных участков повышенной фильтрации воды в плотине. Определены области плотины для первоочередного детального изучения.

6.3 Вертикальные электрические зондирования

Зондирования по профилю 0 ПК50 и 130 показаны в соответствии с рисунком 38. Согласно полученным данным разрез тела плотины по гребню существенно дифференцирован, что проявилось в широком диапазоне изменения электрического сопротивления от 3 до 796 Ом*м. При этом максимальные значения этого параметра (796-96 Ом*м) характерны для самой верхней части разреза мощностью 0.5-1.4 метра, представленной зоной аэрации в каменной наброске. Далее, вниз по разрезу электрическое сопротивление резко падает до значений порядка 16-37 Ом*м при переходе в суглинистое тело, и еще более снижается до 3-17 Ом*м в водонасыщенных его частях в интервале глубин 1-3 метра. Ниже этого интервала, вплоть до глубины порядка 14 метров по ПК50 и 25.7 метра по ПК130 разрез характеризуется электрическим сопротивлением порядка 16-37 Ом*м и проинтерпретирован водопроницаемыми суглинистыми грунтами.

Важной особенностью полученных геоэлектрических данных по этому профилю является наличие жесткой геоэлектрической границы по П130 на глубине 25.7 метра, где электрическое сопротивление резко возрастает с 40 до 140 Ом*м и отсутствие таковой на пикете 50. Принимая во внимание, что высота плотины составляет порядка 25 метров, очевидно, что на ПК130 резким повышением электрического сопротивления проявилось ее уплотненное основание, сложенное водоупорными суглинками, а данные ВЭЗ по ПК50 характеризуют на этой глубине разрез бортовой части гидротехнического сооружения.



Рисунок 38 – Оценка неоднородности тела плотины по данным ВЭЗ по линии профиля 0: наблюденные и подобранные кривые ВЭЗ с графиками псевдоэлектрического каротажа (а), геоэлектрические колонки (б) и геоэлектрические модели (в)

2 2 3 2 3 2 4 2 5 5 5 6 6 a 6 8 7
1 – каменная наброска с песчаным заполнителем; 2 – водопроницаемые суглинистые грунты; 3 – водонасыщенные суглинистые грунты; 4 – слабо проницаемые суглинистые грунты; 5 – водоупорные глинистые образования; 6 – кривая псевдоэлектрического каротажа по данным ВЭЗ; 7 –кривые ВЭЗ: наблюденная (а), подобранная для реальной установки (б) и интервалы полного совпадения этих кривых (в)

Зондирования по профилям 1 ПК120 и 2 ПК80 изображены в рисунком По соответствии 39. двум точкам структура с этим геоэлектрических разрезов весьма сходна с данными по профилю 0 ПК130, но есть и существенные отличия. В соответствии с абсолютными отметками высот в этих точках зондирования относительно высокоомное основание плотины в точке ПР1 ПК120 зафиксировано на глубине 16.5 метра, а верхний водонасыщенный горизонт, сложенный проницаемыми суглинистыми грунтами, имеет повышенную мощность 4.2 метра, что практически в 2 раза больше, чем по ПР0 ПК130. По профилю 2 ПК80 основание плотины проявилось также высокоомной границей на глубине 12.7 метра.



Рисунок 39 – Оценка неоднородности тела плотины по данным ВЭЗ по линиям профилей 1 и 2: наблюденные и подобранные кривые ВЭЗ с графиками псевдоэлектрического каротажа (а), геоэлектрические колонки (б) и геоэлектрические модели (в)

В целом, по данным ВЭЗ представилось возможным получить детальную геоэлектрическую характеристику плотины в обследованных точках. При этом показана ее существенная неоднородность по электрическому сопротивлению, что предполагает и неоднородность по водопроницаемости.

Кроме того, наличие в графиках псевдоэлектрического каротажа интервалами различным границ раздела между с электрическим сопротивлением, характеризующим различную степень обводненности тела определяет плотины возможность получения ОТ них отраженных электромагнитных волн, используемых при георадарных съемках. Применительно к составу задач, решаемых геофизическими методами в рамках настоящего проекта, данные ВЭЗ представляют ценность как для предварительной оценки водопроницаемости суглинистого тела плотины, так и для уточнения природы и глубины залегания диэлектрических границ,

получаемых георадарной съёмкой, а также природы аномалий ЕП, на предмет их возможной связи с фильтрационными процессами.

6.4 Георадарное зондирование

Профиль 0. В соответствии с рисунком 40-а приведена исходная этому профилю. Волновое изобилует радарограмма ПО поле высокоскоростными волнами-помехами, вызванными отражениями от ЛЭП, проложенной по гребню плотины. Из полезных сигналов, на фоне регулярных помех (отражений от ЛЭП) и флуктуационного шума, слабо заметны только субгоризонтальные оси синфазности в интервале глубин 26.5-32 метра и дифрагированные волны Д1 и Д2 от локальных объектов на временах 663 и 805 нС. Наличие таких волн позволило определить штатным программным обеспечением Krot179Ns4, прилагаемым к аппаратурному комплексу Лоза-Н, среднюю скорость отраженных волн, необходимую для построения отражающих границ.

После обработки этими же средствами, в соответствии с рисунком 40-6 существенно прояснилась ситуация с отражениями. В результате такой обработки представилось возможным уверенно выделить отраженные волны 2 и 2а в указанном интервале глубин. Волна 2 соответствует положению основания плотины, вторая (2а) подтверждена данными ВЭЗ только по ПК50.

В верхней части разреза на глубине 12-14 метров от геоэлектрических границ, полученных по данным ВЭЗ фрагментарно протрассирована волна 1, а также установлено наличие зоны повышенной влажности между ПК55-145 в интервале глубин порядка 4-13 метров. Диагностическим признаком этой зоны, в соответствии с рисунком 35-в, явилось изменение фазы георадарного сигнала на 180° в этом интервале глубин.

В то же время, остался не выясненным вопрос о фрагментарности отражающих границ как на глубине 12-14 метров, так 27-30 метров. Решение этой задачи получено путем преобразования радарограммы интенсивности сигнала в волновую форму в соответствии с рисунком 40-г, применения оптимизированной полосовой фильтрации В полосе 2-10 мГц И автоматической регулировки усиления со временем срабатывания 200 нС. В такой обработки результате данных представилось возможным протрассировать отражающую границу на глубине 12-14 метров практически по всему профилю, а также подтвердить отсутствие отражений с глубины 27 метров, вызванное выклиниванием отражающей границы, соответствующей согласно данным ВЭЗ положению основания плотины.



Рисунок 40 – Радарограммы по профилю 0 на частоте 50 мГц совместно с данными ВЭЗ: а – наблюденная, б – после обработки штатными средствами (Krot179Ns4) совместно с данными ВЭЗ, в – трассы радарограммы в точках ВЭЗ, после обработки пакетом сейсмических программ Vista-65 и SeiSee с отражающими границами

1 – регулярные помехи от ЛЭП; 2 – проявленность фрагмента отражающей диэлектрической границы в интенсивности сигнала на фоне помех на полевой радарограмме; фазы осей синфазности гиперболичной формы дифрагированной волны от локального объекта на глубине порядка 33 метра; 4 – положение по профилю точки вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и ее номер; 5 – геоэлектрическая колонка по данным ВЭЗ; 6 – фрагмент диэлектрической отражающей границы (а) в точке ВЭЗ (б) после ослабления регулярных и не регулярных помех штатными средствами обработки георадарных данных (программа Krot179Ns4); 7 – фрагмент трассы радарограммы в точке ВЭЗ: наблюденный (а) и отфильтрованный НЧ (б) сигналы и проявленность отраженной волны (в) от границы 2; 8 – зона инверсии амплитуды огибающей георадарного сигнала; 9 – отраженные волны при визуализации способом отклонений после подавления регулярных помех группированием на базе 10 метров, полосовой фильтрации и АРУ; отражающие диэлектрические границы: а – от подошвы электропроводящего горизонта 1 на глубине 13-14 метров в точке ВЭЗ-2, б – от кровли высокоомного горизонта 2 на глубине порядка 25-27 метров, в – предположительно от диэлектрической границы 2-а на глубине 32-34 метра

Информационные возможности георадарных съемок при снижении частоты излучаемого сигнала до 25 мГц представлены в соответствии с рисунком 41. В соответствии с рисунком 41-а, уровень флуктуационного шума несколько снизился и регулярных помех в исходной радарограмме. После фильтрационных процедур средствами Krot179Ns4 волновое поле очистилось не только от помех, но и исчезли отражения с глубины 12-14 метров и зона инверсии фазы георадарного сигнала при параметрах обработке идентичных радарограмм, полученной на частоте излучения 50 мГц. В соответствии с рисунками 41 -в-г, на трассах нет даже незначительных признаков указанных особенностей наблюденного волнового поля.



Рисунок 41 – Плотина водохранилища К-25. Радарограммы по профилю 0 на частоте 25 мГц: а – наблюденная, б – после обработки штатными средствами (Krot179Ns4), в, г – трассы радарограммы с проявленностью отражающих границ в пикетах 50 и 130

Очевидно, что описанные эффекты являются следствием снижения разрешающей способности метода при уменьшении частоты излучения вдвое. Такой же результат был получен и при сопоставлении данных разночастотных зондирований по остальным профилям.

Профиль 1. Особенностью этого профиля является то, что его начало и конец, как показано в верхней части в соответствии с рисунком 42-а, расположены в бортовых частях плотины. После обработки штатными средствами по этому профилю выявлены две зоны повышенной влажности, а также фрагменты отражающих границ на глубине порядка 5 и 17 метров, где по данным ВЭЗ установлены основные геоэлектрические границы, соответствующие изменению увлажненности суглинистого тела плотины и ее основанию, залегающему на глубине 16 метров.



Рисунок 42 – Плотина водохранилища К-25. Радарограммы по профилю 1 на частоте 50 мГц совместно с данными ВЭЗ: а – после обработки штатными средствами (Krot179Ns4), б – трассы радарограммы в точке ВЭЗ и ПК170, в – после обработки пакетом сейсмических программ Vista-65 и SeiSee с отражающими границами

Кроме того, по данным углубленной обработки установлено, также как и по профилю 0, наличие отраженной волны 2a, природа которой не подтверждена данными ВЭЗ.

Профиль 2. Этот профиль также проложен с выходом на борта плотины. В исходной радарограмме в соответствии с рисунком 43-а практически не видно отраженных волн на фоне помех. Отражения просматриваются лишь на визуализированных трассах в соответствии с рисунком 43-б.

После преобразования радарограммы в волновую форму в соответствии с рисунком 38-в в полосе частот 15-30 мГц выделена лишь одна отраженная волна, которая согласно данным ВЭЗ, соответствует глубине залегания основания плотины (порядка 13-14 метров). Вышележащая толща суглинистого тела плотины оказалась недоступной для изучения ввиду высокого уровня остаточных помех, представляющих собой неразрешимый цуг колебаний с общей длительностью порядка 150 нС.



Рисунок 43 – Плотина водохранилища К-25. Радарограммы по профилю 2 на частоте 50 мГц совместно с данными ВЭЗ: а – после обработки штатными средствами (Krot179Ns4, ,б – трассы радарограммы в точке ВЭЗ (ПК120) и ПК170, в – после обработки пакетом сейсмических программ Vista-65 и SeiSee с отражающими границами

По радарограммам, после углубленной их обработки построены, с учетом данных ВЭЗ и ДЭЗ-ВП, разрезы, характеризующие наличие и особенности распределения диэлектрических границ по отработанным профилям в соответствии с рисунком 44.

В соответствии с приведенными данными основными геоэлектрическми горизонтами, которых получены OT отражения электромагнитных волн, являются интервалы разреза с резким изменением увлажнения суглинистых грунтов. За исключением самой верхней части разреза в интервале глубин 0 – 4-5 метров, по всем профилям, как следует из данных ВЭЗ, имеет место последовательное снижение увлажненности по мере приближения к основанию плотины. В зависимости величины электрического сопротивления (как показателя увлажненности) В выделенных горизонтах им дана инженерно-геологическая интерпретация.

Выявленные по георадарным данным зоны повышенной увлажненности по профилям 0 и 1, расположенные главным образом электропроводящей части разреза в интервале глубин 2-16 метров после уточнения их геоэлектрических характеристик можно рассматривать как потенциальные пути фильтрации при повышении уровня заполнения водохранилища. Характерной особенностью таких зон, установленных по профилю 1 является их простирание в борта плотины. Эти эффекты также требуют изучения и уточнения.



Рисунок 44 – Инженерно-геологические разрезы по комплексу геофизических данных

 $[\stackrel{\circ}{\cdot} \stackrel{\circ}{\cdot} \stackrel{\circ}{$

проницаемые суглинистые грунты; 5 – водоупорные глинистые образования; 6 – кривая псевдоэлектрического каротажа по данным ВЭЗ; 7 – шкала значений удельного электрического сопротивления в Ом*м; 8 – диэлектрические отражающие границы в тоще суглинистого тела (а), от поверхности основания плотины (б) и неустановленной природы (в); 9 – зоны повышенной увлажненности по георадарным данным; 10 – предполагаемое положение бортов плотины по данным электроразведки ДЭЗ-ВП

В целом приведенные разрезы можно рассматривать как стартовые модели для мониторинга водопроницаемости изученной плотины.

В результате анализа георадарных данных по всем профилям в заданных физико-геологических условиях показана эффективность метода для изучения тела плотины в условиях проявления интенсивных регулярных помех. При этом для получения достоверных данных о наличии и глубинной привязке структурно-вещественных неоднородностей на глубину обязательными условиями являются обязательная препроцессинговая обработка для повышения соотношения сигнал-помеха, а также определение скорости электромагнитных волн в исследуемой толще и комплексирование георадарных данных с вертикальными электрическими зондированиями.

6.5 Сейсмическая разведка КМПВ-МРВ

Результаты интерпретации сейсмических данных по профилям 0, 1 и 2 представлены на следующих моделях.

Профиль 0, в соответствии с рисунком 45-б, в разрез по линии этого в пределах тела плотины, представляет собой профиля структуру «проседания» с повышенной мощностью (до 5-6 метров) низкоскоростных С учётом инженерно-геологических данных и результатов грунтов. электроразведки ВЭЗ эти грунты проинтерпретированы водопроницаемыми По кровле подстилающих образований получена суглинками. ИХ преломляющая граница 1 как в продольных, так и поперечных волнах, по ней же данными ВЭЗ отмечено и повышение электрического сопротивления. По совокупности полученных данных эта граница объяснена кровлей слабопроницаемых суглинков.

В пределах плотины следующая вниз по разрезу жесткая преломляющая граница в продольных волнах в соответствии с рисунком 476 получена на глубине порядка 18 метров. Совпадающая с геоэлектрической границей, с учётом паспортных данных по плотине, она проинтерпретирована как обусловленная уплотнёнными суглинками её основания. С западного и восточного флангов плотины к основанию плотины, установленному по сейсмическим данным, практически примыкают преломляющие границы 2. Они, наиболее вероятно, связаны с фациальным изменением природных суглинистых грунтов.

В поперечных волнах основание плотины диагностировано по максимальным значениям вертикального градиента скорости. Кроме того, в обоих типах волн установлено наличие скоростных границ при смене суглинистых грунтов основания на материнские подстилающие грунты с максимальными значениями электрического сопротивления, проинтерпретированные русловыми гравийно-валунно-суглинистыми отложениями.

Выделяющейся чертой данного разреза является его значительная латеральная неоднородность. Это проявляется в изменении скорости продольных волн на глубине основания плотины и в скоростных профилях обоих типов волн в соответствии с рисунком 45а. Особое внимание заслуживает наличие зон с аномально низкой скоростью упругих волн. В пределах тела плотины такие зоны установлены в прибортовых частях плотины: в интервалах ПК 80-110 и ПК190-210, а также в начале профиля за пределами плотины - ПК-50-(-20).

93



Рисунок 45 – Особенности строения тела плотины по данным сейсморазведки в сечении профиля 0

° • • • • • • 0 1	$\begin{bmatrix} $	$\sim \cdot \sim$ $\sim \cdot$	$3 \begin{bmatrix} \overline{-} & \overline{-} & \overline{-} \\ \overline{-} & \overline{-} & \overline{-} \end{bmatrix} 4$	Q~.Q5	6
7	а б8	<u></u> а а б	9 0 10	а 🗛 в 11	а,бв , 0 0 12

каменная наброска с песчаным заполнителем; 2 – разуплотненные суглинистые грунты; 3 – водопроницаемые суглинистые грунты; 4 – слабопроницаемые суглинистые грунты; 5 – русловые гравийно-валунно-суглинистые отложения; 6 - график граничной скорости; 7 – изолинии скорости; 8 – преломляющая (а) и скоростная (б) границы по кровле уплотненного основания плотины; 9 – преломляющие (а) и скоростные (б) границы, связанные с неоднородностью разреза по вертикали; 10 – зоны с пониженной скоростью упругих волн: а – уверенно выделенные, б – предполагаемые; 11 – кривая псевдоэлектрического каротажа по данным ВЭЗ (а) и зоны повышенных значений дисперсии потенциала по данным
электроразведки ЕП (б); 12 – предполагаемое положение бортов плотины по геофизическим данным (а), действующий (б) и аварийный (в) водовыпуски

Практический интерес представляют первые две зоны, наиболее контрастно проявленные в скоростном разрезе в поперечных волнах. Судя по

глубине этих зон, которая значительно превышает глубину основания плотины в случае поперечных волн, вероятно, они связаны с природными тектоническими нарушениями. Эти зоны часто демонстрируют наиболее выраженные деформации геологических слоёв, что ведет к снижению их прочностных характеристик и повышению водопроницаемости.

Косвенным подтверждением повышения водопроницаемости в таких зонах следует считать данные по дисперсии потенциала естественного электрического поля в соответствии с рисунком 45г. Области аномально повышенных значений этого параметра, предположительно интерпретируемые динамикой фильтрационной обстановки, однозначно коррелируются с положением в плане с зонами с пониженной скоростью упругих волн.

Профиль 1. Расположен в средней части нижнего бьефа плотины.

Разрез по линии этого профиля по данным сейсморазведки в соответствии с рисунком 46 по строению весьма сходен с профилем 0. Также четко просматривается в изолиниях скорости в целом понижение значений этого параметра в центральной части профиля (ПК80-160), что особенно проявлено в скорости поперечных волн в соответствии с рисунком 11в, и наличие локальных зон с пониженной скоростью упругих волн на флангах профиля за пределами плотины (ПК-1-20 и 210-230). Особенностью сейсмических данных по этому профилю является проявленность в поперечных волнах только нижнего основания плотины, залегающего на природных гравийно-валунно-суглинистых русловых отложениях, кровля которых в сечении этого профиля оказалась наиболее контрастной скоростной границей.

При этом весь интервал профиля в пределах тела плотины (ПК100-150) характеризуется пониженной скоростью обоих типов волн. В поперечных волнах минимум значений скорости приходится на её центральную часть (ПК90-140). В продольных волнах, как это следует из графика граничной скорости, – на интервал ПК90-105 ближе к прибортовой зоне, где имеет место максимальное понижение скорости упругих волн.

Такое понижение скорости обоих типов волн, наиболее вероятно, связано с разуплотнённостью и нарушением структуры грунтов тела плотины и её основания, способствующих формированию в них процессов фильтрации.

Подтверждением этого предположения можно считать данные по дисперсии потенциала естественного электрического поля по этому профилю в соответствии с рисунком 46г, максимальные значения этого параметра однозначно увязываются с интервалом профиля 1 ПК80-105.

Кроме того, области пониженных значений скорости продольных и поперечных волн установлены и на обоих флангах профиля – ПК-20-20 и 195-225. Наличие этих зон проинтерпретировано неоднородностью песчано-глинистого разреза, прилегающего к плотине.



Рисунок 46 – Особенности строения тела плотины по данным

ссисморазведки в сечении профиля т						
° • • • • • • • • 1	$\begin{bmatrix} \div \cdot & \div \\ \cdot & \div \end{bmatrix} 2$	$\sim \cdot \sim \sim \cdot$ 3	$\begin{bmatrix} \tilde{} & \tilde{} & \tilde{} \\ \tilde{} & \tilde{} & \tilde{} \end{bmatrix} 4$	0~.05	;	3
7	a 6 8	 a _ · _ 6 9	5 10	а 🗛 в 17	а∕бв ↓ ● ◯ 12	2

каменная наброска с песчаным заполнителем; 2 – разуплотненные суглинистые грунты; 3 – водопроницаемые суглинистые грунты; 4 – слабопроницаемые суглинистые грунты; 5 – русловые гравийно-валунно-суглинистые отложения; 6 - график граничной скорости; 7 – изолинии скорости; 8 – преломляющая (а) и скоростная (б) границы по кровле уплотненного основания плотины; 9 – преломляющие (а) и скоростные (б) границы, связанные с неоднородностью разреза по вертикали; 10 – зоны с пониженной скоростью упругих волн: а – уверенно выделенные, б – предполагаемые; 11 – кривая псевдоэлектрического каротажа по данным ВЭЗ (а) и зоны повышенных значений дисперсии потенциала по данным
электроразведки ЕП (б); 12 – предполагаемое положение бортов плотины по геофизическим данным (а), действующий (б) и аварийный (в) водовыпуски

Профиль 2. Расположен вблизи подножья насыпного тела плотины. Разрез по этому профилю в соответствии с рисунками 476, г имеет также блоковую структуру. Однако, в отличие от предыдущих разрезов, под

основанием плотины в этом сечении находится блок с повышенной скоростью упругих волн, структура «проседания» просматривается, но не так явно, как по профилю1.

В отношении сейсмических границ, связанных с основанием плотины, следует отметить, что в силу незначительной (первые метры) его глубины уверенно диагностируемую преломленную волну удалось выделить только от нижнего основания (кровли русловых гравийно-валунно-суглинистых отложений). При этом верхнее основание в обоих типах волн протрассировано по изменению вертикального градиента скорости.



Рисунок 47 – Особенности строения тела плотины по данным сейсморазведки в сечении профиля 2



 каменная наброска с песчаным заполнителем; 2 – разуплотненные суглинистые грунты; 3 – водопроницаемые суглинистые грунты; 4 – слабопроницаемые суглинистые грунты; 5 – русловые гравийно-валунносуглинистые отложения; 6 – график граничной скорости; 7 – изолинии скорости; 8 – преломляющая (а) и скоростная (б) границы по кровле уплотненного основания плотины; 9 – преломляющие (а) и скоростные (б) границы, связанные с неоднородностью разреза по вертикали; 10 – зоны с пониженной скоростью упругих волн: а – уверенно выделенные, б –
предполагаемые; 11 – кривая псевдоэлектрического каротажа по данным ВЭЗ (а) и зоны повышенных значений дисперсии потенциала по данным
электроразведки ЕП (б); 12 – предполагаемое положение бортов плотины по геофизическим данным (а), действующий (б) и аварийный, находящийся на дневной поверхности, (в) водовыпуски

Характер изменения граничной скорости по нижнему основанию свидетельствует о существенной его неоднородности как в продольных (в соответствии с рисунком 47а), так и в поперечных волнах (в соответствии с рисунком 47в). При этом вполне закономерным является приуроченность зон с пониженной скоростью к межблочному пространству. Из них наиболее контрастной представляется зона в интервале ПК20-40, проявленная в обоих типах волн.

данным сейсморазведки интервал ПК20-40 Таким образом, по основания плотины может быть определён как предрасположенный к разуплотнению и деформационным процессам. А учитывая, что этот интервал И аномально повышенной дисперсией входит В зону С естественного электрического увязываемой повышенной поля, с фильтрацией воды, то и в данном случае понижение скорости упругих волн можно считать фактором, способствующим формированию в нём процессов фильтрации.

6.6 Комплексная интерпретация геофизических данных

Данные по распределению зон с повышенной электропроводностью и поляризуемостью и аномальных эффектов, полученных электроразведкой ЕП и сейсморазведкой КМПВ-МРВ приведены в соответствии с рисунком 48. Как видно из этого рисунка, наибольшая плотность аномальных зон имеет место в пространстве, прилегающем к западному борту плотины.



Рисунок 48 – Схема распределения зон аномальных эффектов в геофизических параметрах (дисперсии естественного электрического поля, скорости упругих волн, электрического сопротивления и вызванной поляризации)

1 2 1 6 3 4 6 3 6 6 6 6 6 6 6 6 6 7 6 6 6 6 7 6 6 6 8 8 1 – проекция контура тела плотины на дневную поверхность; 2 – гребень плотины; 3 – водовыпуски: рабочий (а) и аварийный (б); 4 – визуально наблюдаемые локальные зоны фильтрации воды в теле плотины; 5 – номера профилей сейсморазведки КМПВ-МРВ (а) и пикеты в метрах (б) регистрации волнового поля; 6 – интервалы профилей с пониженной скоростью упругих волн более (а) и менее (б) 15% и зоны с пониженной скоростью упругих волн: уверенно выделяемые (в) и предполагаемые (г); 7 – зоны с аномально повышенной (более стандартного отклонения от среднего) дисперсией естественного электрического поля (а) и повышенных (более средних значений) этого параметра (б); 8 – зоны с пониженным электрическим сопротивлением (а) и повышенной поляризуемостью по данным электроразведки ДЭЗ-ВП в первую сессию

Характерной особенностью распределения зон, выделенных по всем параметрам, является их вполне удовлетворительная сходимость в области гребня плотины (ПК75-110) по профилю 0 и в различной степени их расхождение по остальным профилям. По профилю 1 в контуры аномалий электрического сопротивления и поляризуемости попала только западная область аномалии дисперсии естественного электрического поля, тогда как наиболее интенсивная её часть и зона понижения скорости упругих волн оказались его пределами. По профилю 2 в аномальные за зоны электрического сопротивления и поляризуемости вошла только западная половина зоны с пониженной скоростью упругих волн. Ещё большие расхождения в местоположении рассматриваемых аномальных зон получены в восточной прибортовой части плотины. Лишь только по профилю 2 повышенные электропроводность и поляризуемость коррелируются с зоной пониженной скорости упругих волн.

В восточной прибортовой части плотины лишь по профилю 2, в районе визуально наблюдаемой зоны фильтрации, повышенные электропроводность

и поляризуемость коррелируются с зоной пониженной скорости, а по профилю 1 со слабо проявленной аномалий дисперсии естественного электрического поля. По этому профилю наблюдается также вытянутость зоны с аномально повышенной поляризуемостью в сторону аварийного водовыпуска.

Принимая во внимание существенную неоднородность тела плотины, которая выразилась в её блоковой структуре и в изменении по латерали скорости упругих волн, наиболее проявленной в прибортовых частях, полагается, что именно эти факторы являются наиболее вероятной причиной приведённых расхождений аномальных эффектов. Также не следует исключать и влияние металлических конструкций (водовыпусков) на эффекты в электропроводности и поляризуемости, особенно в увлажнённой искажения, вызываемые пересечённым рельефом среде и лневной поверхности. Пониженные участки рельефа создают положительные аномалии сопротивления, повышенные – отрицательные.

6.7 Моделирование процессов фильтрации и прогноза возможных направлений просачивания на плотине водохранилища К-25

Принимая во внимание приведённые выше данные, при построении схемы фильтрации за основу были взяты данные по дисперсии естественного электрического поля и скорости упругих волн. При этом первый параметр использовался в качестве индикатора динамики фильтрационных процессов, второй позволял увязывать их с ослабленными зонами разреза. Схема расположения зон с повышенной фильтрацией в теле плотины представлена в соответствии с рисунком 49. Границы таких зон были определены по усредненным контурам двух параметров, а основное направление водного стока установлено по максимумам дисперсии ЕП.

Согласно этим принципам, наиболее четко выделяемой и надежно диагностируемой зоной фильтрации является зона Ф1, которая располагается в западной прибортовой части плотины. Начиная с профиля 1 ПК77 и далее по направлению к северо-востоку, эта зона продолжает распространяться за пределы насыпи плотины. Основное направление стока здесь проходит практически через центр выделенной зоны.

Фильтрационные зоны Ф2 и Ф3 также предполагаются в структуре плотины. Их наличие подтверждается визуальными наблюдениями выходов фильтрующейся воды на дневную поверхность в районе профиля 2 ПК105–115 и профиля Е4 ПК210 на северо-восточной границе исследуемой области. При этом объем воды, выходящей в зоне Ф3, значительно превышает дебит зоны Ф2. Важно отметить, что источник фильтрации по зоне Ф2, вероятно, находится в прибортовой части плотины и может быть относительно легко идентифицирован. В то же время для более общирной зоны Ф3, которая



Рисунок 49 – Схема расположения зон повышенной фильтрации по геофизическим данным



1 – проекция контура тела плотины на дневную поверхность; 2 – гребень плотины; 3 – водовыпуски: рабочий (а) и аварийный (б); 4 – визуально наблюдаемые локальные зоны фильтрации воды в теле плотины; 5 – наиболее вероятная зона фильтрации Ф1 по комплексу данных электроразведки ЕП и сейсморазведки КМПВ-МРВ: а – контуры зоны, б – положение в плане направления основного стока; 6 – предполагаемые зоны фильтрации Ф2 и Ф3

расположена за пределами дамбы, возможными источниками являются как водохранилище, так и дома расположенного поблизости населенного пункта.

7 Рекомендации по дальнейшему изучению гидротехнических сооружений геофизическими методами

7.1 Оценка информативности результатов примененных геофизических методов при изучении состояния гидротехнического сооружения

Электроразведочные методы. В рамках настоящей работы для выявления в теле плотины струйных водоносных зон и картирования их в геоэлектрические параметры, плане использовались включающие сопротивление, поляризуемость, диэлектрическую электрическое проницаемость и в опытном порядке – естественное электрическое поле. Основным источником аномальных эффектов в этих параметрах в суглинистых грунтах выступает изменение их обводненности, то есть каждый из них имеет физические предпосылки для успешного решения поставленной задачи. Главный вопрос состоит в том, что все эти параметры реагируют и на различного рода осложняющие факторы.

Для электрического сопротивления в суглинистых грунтах такими факторами выступают изменение минерализации фильтрующихся вод и наличие электропроводящих объектов на глубине. При этом учесть влияние изменения минерализации воды, в принципе, представляется возможным, но требует дополнительных лабораторных измерений и моделирования аномальных эффектов в электрическом сопротивлении и установления корреляционной связи между этими параметрами.

Наличие влияния металлических конструкций, в частности водоводов, на регистрируемые значения электрического сопротивления представляется целесообразным на основе проведения профильных наблюдений естественного электрического поля. Над такими объектами, расположенными в увлажненной среде, будут наблюдаться локальные аномалии окислительновосстановительного происхождения, тем самым будет дано обоснование для исключения из анализа данных по электрическому сопротивлению в зонах расположения окислительно-восстановительных аномалий.

Поляризуемость. Этот параметр функционально связан с электрическим сопротивлением. Влияние электрического сопротивления в суглинистых грунтах наиболее эффективно обеспечивается привлечением параметра относительной поляризуемости, представляющей собой отношение наблюденной поляризуемости к кажущемуся сопротивлению. В таких грунтах наблюдается устойчивое повышение значений относительной поляризуемости по мере возрастания их увлажненности.

Естественное электрическое поле. Информативным параметром выступают поля фильтрационного происхождения, которых зоны нисходящей фильтрации проявляются отрицательными аномалиями U_{EП}, а всходящей - положительными. Главный вопрос связан с выявлением таких аномалий. Наиболее эффективно он решается на основе данных режимных

наблюдений при различных динамических нагрузках на плотину. При этом эффекты в естественном электрическом поле окислительновосстановительного и диффузионно-адсобционного происхождения будут оставаться постоянными, а связанные с фильтрационными процессами – изменяться пропорционально изменению фильтрационных потоков при их наличии.

Диэлектрическая проницаемость. Этот параметр, используемый в георадарных исследованиях, определяющим образом зависит от влажности грунтов. Наиболее перспективным способом повышения информативности георадарных данных по обводненности является пересчет разрезов в параметр диэлектрической проницаемости. С этой целью может использоваться поле обратного рассеяния электромагнитных волн.

Приведенные сведения по информативности примененных геоэлектрических параметров показывают принципиальную возможность повышения достоверности данных по обводненности суглинистых грунтов в теле плотин.

Преломленные волны. Регистрация преломленных волн и их последующий анализ помогают установить геолого-сейсмические свойства составляющих гидротехническое сооружение. Такой пород, подход позволяет эффективно выявлять границы слоев и их скорости, особенно при существенной разнице в скорости преломления относительно верхних слоев. Это объясняется тем, что волны, преломляясь на этих границах, быстрее достигают приемников, чем те, которые распространяются в поверхностных слоях. Анализ времени поступления преломленных волн дает возможность определить глубину залегания слоев и скорости распространения в них. При этом корреляция зарегистрированных волн обеспечивает более точное определение границ между слоями, особенно если эти границы расположены на малой глубине.

Использованные в работе методы показали хорошую информативность, в тоже время представляется целесообразным проведение углубленных исследований для повышения точности получения результатов с помощью этих методов.

7.2 Рекомендации по поэтапному изучению состояния земляных плотин геофизическими методами

По результатам проведенных исследований рекомендуется для первичной оценки состояния плотины использовать метод ДЭЗ-ВП, который обладает высокой оперативностью и эффективностью. Электроразведка методом ЕП, а также сейсморазведка КМПВ-МРВ с использованием как продольных, так и поперечных волн предлагается выполнить следующим этапом для более углубленного анализа структуры ГТС. Предложенный набор геофизических методов формирует рациональную основу для мониторинга состояния различных инженерных сооружений, включая земляные плотины, дамбы, хвостохранилища и другие подобные конструкции.

Для обеспечения более детального понимания состояния плотин и прогнозирования их возможного поведения рекомендуется привлекать трехмерное моделирование, организовывать режимные наблюдения и использовать возможности искусственного интеллекта.

Необходимо также продолжить развитие законодательной базы управления эксплуатацией ГТС для построения надежной постоянной системы мониторинга состояния ГТС с использованием геофизических методов. Это позволить своевременно обнаруживать изменения в теле плотин и заблаговременно принимать меры превентивного характера для недопущения их разрушения.

Результаты диссертационного исследования, посвященного анализу структурно-вещественных характеристик внутреннего строения тела плотины водохранилища К-25, продемонстрировало высокую эффективность методического подхода с применением рационального комплекса геофизических Построением геолого-геофизические метолов. моделей определены участки с повышенной водонасыщенностью в теле ГТС и сделан прогноз возможных путей фильтрации воды через его тело, которые могут при определенном стечении различных факторов быть причиной потери устойчивости ГТС.

Так метод ДЭЗ-ВП хорошо показал себя при выявлении зон с повышенной водопроницаемостью. В ходе работы была проведена оценка информативности электрических параметров, таких как кажущееся электрическое сопротивление и относительная поляризуемость, которые применяются для диагностики зон инфильтраций в теле плотины и их пространственного распределения. При этом рассмотрены осложняющие факторы, влияющие на использование указанных параметров в качестве диагностических признаков.

Данные ВЭЗ предоставили детальную информацию о распределении значений кажущегося сопротивления по структуре плотины на глубину более 40 метров, что подтвердило ее внутреннюю неоднородность. На основе совместного анализа результатов ДЭЗ, ВЭЗ и георадарных исследований составлены инженерно-геологические разрезы, которые могут использоваться в качестве исходных моделей для мониторинга целостности ГТС.

Площадная электроразведка методом ЕП продемонстрировала высокую результативность при проведении режимных наблюдений. Для повышения достоверности диагностики аномальных эффектов, связанных с процессами фильтрации, был применен параметр дисперсии электрического потенциала.

Сейсморазведка корреляционным методом преломленных волн – методом рефрагированных волн оказалась особенно продуктивной при изучении структуры плотины и выявлении ослабленных зон, где наиболее вероятны фильтрационные процессы.

Установлена корреляция между зонами, выделенными сейсморазведкой как ослабленные участки, и областями с аномально высокой дисперсией электрического потенциала, что значительно увеличило достоверность геофизических данных при оценке фильтрационной ситуации в структуре плотины.

Использованный в исследовании комплекс геофизических методов информацию геологическом предоставил детальную строении 0 И грунтовой основы, характеристиках возведена на которой плотина. Применение геофизических методов способствовало выявлению структурных дефектов и анализу распределения различных типов грунтов

105

внутри тела плотины, что позволило определить потенциальные ослабленные участки. Кроме того, данные методы обеспечили возможность определения глубинного залегания разных типов грунтов.

В работе в Казахстане проведены исследования, предоставившие результативные данные о внутренней структуре плотины земляного типа, возможных путях фильтрации воды через ее тело с применением разработанного геофизического комплекса с использованием современного программного обеспечения (V-master, Vista-65, SeiSee, X-Tomo и Surfer).

Практическая ценность работы заключается в возможности использования eë хозяевами ГТС результатов И структурам, контролирующим их безопасность, эффективно организовать системный мониторинг изменений внутреннего состояния земляных плотин С использованием современных технологий И исследовательского оборудования, что позволит заранее предпринимать меры для минимизации экологических, социальных и экономических рисков, связанных с их потенциальным разрушением.

На основании проведенных исследований рекомендовано использование метода ДЭЗ-ВП для первичной оценки состояния плотины ввиду его высокой оперативности. Для детального анализа структуры следует задействовать электроразведку методом ЕП и сейсморазведку, включающую использование как продольных, так и поперечных волн.

Предложенный комплекс геофизических методов представляет собой рациональную основу для мониторинга состояния различных инженерных сооружений, таких как земляные плотины, дамбы, хвостохранилища и другие конструкции.

Для получения более содержательной информации о состоянии плотин и их возможного поведения рекомендовано применение трехмерного моделирования, организации режимных наблюдений и использование возможностей искусственного интеллекта.

Перечень терминов. Перечень сокращений

ВБ	Верхний бьеф
ВЭЗ	Метод вертикального электрического зондирования
ГТС	Гидротехническое сооружение
ГЭС	Гидроэлектростанция
ДА	Диффузионно-абсорбционный процесс
ДЭЗ	Метод диполь-электрического зондирования
ДЭЗ-ВП	Метод вызванной поляризации
ЕП	Метод естественного электрического поля
КМПВ-МРВ	Корреляционный метод преломленных волн - метод
	рефрагированных волн
MOB	Метод отраженной волны
МΠВ	Метод преломленных волн
НБ	Нижний бьеф
OB	Окислительно-восстановительный процесс
УЭС	Удельное электрическое сопротивление
ΦΓΜ	Физико-геологическая модель
ФМС	Физико-механические свойства
ЭМ	Электромагнитное профилирование
ЭП	Метод электропрофилирования

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Карасайский район Алматинской области Республики Казахстан. 04.04.2025,

https://www.wikiwand.com/ru/articles/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B0%D 1%81%D0%B0%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0 %B0%D0%B9%D0%BE%D0%BD

2Инженерная геология СССР, т. 6. Казахстан / под редакцией В.И. Дмитровского изд., Москва: издательство Московского Университета, 1977. -296 с.

ЗВодохозяйственный паспорт водохранилища К-25 (Кизовское) на р. Казачка Алматинской области. - Институт «Казгипроводхоз» Минводхоза Казахской СССР. - Алма-Ата, 1979 – 17 с.

4Техно-рабочий проект. Реконструкция Кизовской плотины (К-25) на реке Казачка Каскеленского района Алматинской области. - Институт «Казгипроводхоз» Минводхоза Казахской СССР. - Алма-Ата, 1975 - 8 с.

5Zhang L. M., Xu Y., Jia J. S. Analysis of earth dam failures - A database approach // ISGSR2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, Tongji University, China, - 2007.

6Vogel A. Bibliography of the history of dam failures (CD Rom) // Risk Assessment International. - Vienna, Austria, -1980.

7Singh V.P. Dam breach modelling technology // Water Science and Technology Library. - Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996, - Vol. 17.

8Biswas A.K. and Chatterjee S. Dam disasters – An Assessment // Engineering Journal, 1971, - 54(3). - p.3–8.

9Johnson F.A. and Illes P. A classification of dam failures // Water Power and Dam Construction, 1976. - 28(12). - p. 43 - 45.

10 National inventory of reservoir dam failures // The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (MWR), Beijing, 1993 (in Chinese).

11 Bradlow D.D., Palmieri A. and Salman M. A. Regulatory Frameworks for Dam Safety: A Comparative Study // World Bank, 2002. – 187 p.

12 Пригара А.М., Царев Р.И., Коноплев А.В., Пенский О.Г., Осовецкий Б.М. Инженерно-геологическая оценка гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля // Фундаментальные исследования, 2014. – № 11-2. – С. 348-352.

13 Пригара А.М., Татаркин А.В., Пенский А.В., Осовецкий Б.М., Коноплев А.В. Определение физико-механических свойств грунтов при оценке состояния гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2012. – № 84 (10).

14 Колесников В.П., Татаркин А.В., Пригара А.М., Коноплев А.В. Диагностика состояния земляных плотин методами неразрушающего контроля // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы
региональной научно-практической конференции, Пермь: Пермский университет, 2009. – С. 257–262.

15 Колесников В.П., Коноплев А.В., Пригара А.М., Татаркин А.В. Технология комплексных инженерно-геофизических изысканий для диагностики состояния гидротехнических сооружений // Современные проблемы науки и образования, 2012. – № 6.

16 Джурик В.И., Ескин А.Ю., Серебренников С.П., Брыжак Е.В. Динамика физического состояния ослабленных зон насыпной плотины Иркутской ГЭС за период 2002–2012 гг. // Известия Иркутского государственного университета: Серия «науки о Земле», 2014. – № 8. – С. 35– 41.

17 Zumr D., David V., Krasa J., Nedved J. Geophysical evaluation of the inner structure of a historical earth-filled dam // Proceedings, 2018. – V. 2. – 664.

18 Sentenac P., Benes V., Keenan H. Reservoir assessment using non invasive geophysical techniques // Environmental Earth Sciences, 2018 №77(293) – P.1-14.

19 Fatoba J.O., Eluwole A.B., Ademilua O.L, Sanuade O.A. Evaluation of subsurface conditions by geophysical methods at Ureje Earth Dam Embankment, Ado-Ekiti, Southwestern Nigeria – a case study // Indian Journal of Geosciences. – 2018. – V. 72(4). – P. 275–282.

20 Nwokebuihe S.C., Alotaibi A.M., Elkrry A., Torgashov E.V., Anderson N.L Dam seepage investigation of an Earthfill Dam in Warren County, Missouri using geophysical methods // AIMS Geosciences, 2017. - V. 3 (1). - P. 1-13.

21 Camarero P.L., Moreira C.A. Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique // REM – International Engineering Journal. – $2017. - V. 70. - N_{\odot} 1$.

22 Olasunkanmi N.K., Aina A., Olatunji S., Bawalla M. Seepage investigation on an existing dam using integrated geophysical methods // Journal of Environment and Earth Science, $2018. - V. 8. - N_{\odot} 5$.

23 Ибраев Т.Т., Ли М.А. Безопасность гидротехнических сооружений Республики Казахстан. http://icwc-aral.uz/20years/files/ibraev-li.pdf

24 Абетов А., Жылкыбаева Г., Истеков К. Геодинамика и глубинное строение литосферы на примере некоторых областей Центральной Азии и Казахстана. - LAP LAMBERT Academic Publishing ist ein Imprint der - Саарбрюкен, Германия, 2015. - 48 с.

25 Abetov A.E., Dr.Grib N.N., Uzbekov A.N., Melnikov, A.E., Malinin, Y.A. Spatial variability of physical and mechanical properties of rock mass in Central Kazakhstan | Variabilidade espacial de propriedades físicas e mecânicas de massa rochosa no Cazaquistão Central // Periodico Tche Quimica, 2020, 17(34), p. 718-726.

26 Абетов А.Е, Ахметов Е.М., Жылкыбаева Г. А., Абетова С.А. Геологическое строение и геодинамика консолидированной коры зоны сочленения Южного Тянь-Шаня и Туранской плиты // Вестник КазНТУ, 2015.

27 Бибосынов А., Шигаев Д.Т., Кирсанов А.В. Неразрушающий метод исследовании Капчагайского гидротехнического сооружения // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан: Серия физико-математическая, 2015. – Т. 6 (421). – С. 5–11.

28 Шайторов В.Н., Ахметов Е.М., Алдабергенова Г.И. Опыт применения геофизических методов при изучении тектонического строения разреза в створе деривационного туннеля Мойнакской ГЭС // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан: серия геологии и технических наук, 2017. – Т. 1 (421). – С. 87–95.

29 Zhantayev Z., Kurmanov B., Breusov N., Shigayev D., Kirsanov A. Ground Penetrating Radar Survey of Dam Structures of Kazakhstan on example of Aktobe and Karatomar Water Storage Basins // Open Journal of Geology, 2013.-V.3(2B). - p.25-27. http://dx.doi.org/10.4236/ojg.2013.32B006.

30 Ахметов Е.М., Асемов К.М., Жуматаева М.О. Исследование аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля их безопасности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2020. - Т.331(4). - С.70–82.

31 Абетов А.Е., Умирова Г.К., Джукебаев М.И. Англо-русскоказахский терминологический словарь методов разведочной геофизики -Алматы: Издательство КазНИТУ, 2023.- 398 с.

32 Владов М.Л., Старовойтов А.В. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач/. Москва: ГДС Продакшен, 1998. - 66 с.

33 Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под редакцией проф. В.К. Хмелевского, доц. И.Н. Модина, доц. А.Г. Яковлева. – Москва: МГУ, 2005. - 311 с.

34 Хмелевской В.К. Электроразведка, / Хмелевской В.К. –2-е изд., Москва: издательство Московского Университета,1984. - 422 с.

35 Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие. / Никольский В.В. – Москва: Издательство «Наука», 1978. - 544 стр.

36 Лавров В.М. Теория электромагнитного поля и основы распространения радиоволн // Москва, Издательство «Связь», 1964. - 368 с.

37 Гурвич И.И., Боганик П.Н. Сейсмическая разведка. – 3-е изд.– Москва: Недра, 1980. – 324 с.

38 Справочник геофизика. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. – Москва: Недра, 1984. - 455 с.

39 Пригара А.М., Татаркин А.В., Пенский О.Г., Осовецкий Б.М., Коноплев А.В. Определение физико-механических свойств грунтов при оценке гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля // Научный журнал КубГАУ, – 2012. – № 84(10). – с.168-180.

40 Кузнецов О.Л., Каляшин С.В. Введение в геофизику. – Москва: Издание Российской академии естественных наук, 2011. - 273 с.

41 Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие /А.В. Старовойтов. /ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет»/ – Москва: Изд-во МГУ, 2000. -192 с.

42 Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии // Под ред. М.И. Финкельштейна. – Москва: Недра, 1986. – 128 с.

43 Абетов А.Е., Акжигитова А., Тургазинов И., Артуров Г. Направления и перспективы развития георадилокационных исследований в Казахстане. Труды Сатпаевских Чтений. Инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК., 2019 - № 1. - с.546-550.

44 Сейсморазведка. Справочник геофизика /Под ред. И.И.Гурвича, В.П.Номоконова. – М.: «Недра», 1981. – 464 с.

45 Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности /Под ред. Проф. В.А. Шевнина и И.Н. Модина. – Москва: Изд-во МГУ, 1999. - 511 с.

46 Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. – Москва.: Недра, 1979. – 143 с.

47 Якубовский Ю.В. Электроразведка. – Москва: Недра, 1980. – 300 с.

48 Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмики. – Москва, Изд-во МГУ, 1981. – с.176.

49 Катренов Ж.С., Абетов А.Е., Менг Ж., Джанг Т. Инновационные методы получения и обработки сейсмических данных // Proceedings of the International Satbayev Conference 2023 «Science and technology: From idea to implementation», Алматы, 2023, - с.168-175.

50 Z. Katrenov, A.Abetov, Z. Meng, T. Jiang. Modern seismic acquisition methods based on compressive sensing, simultaneous source recording and compressive reconstruction // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 4 (454), 2022, p. 122-135.

51 Шарапанов, Н.Н. Методика геофизических исследований при гидрогеологических съёмках с целью мелиорации земель. / Шарапанов Н.Н., Черняк Г.Я., Барон В.А. // Недра, 1974. – 176 с.

52 Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Электроразведка. / Госстрой РСФСР (РСН 64-87).

53 Инструкция по электроразведке. – Ленинград: Недра. 1984 г.

54 Комаров, В.А. О природе электрических полей вызванной поляризации и возможностях их использования при поисках рудных месторождений // Вестник Ленинградского гос. ун-та. Сер. геол и геогр., 1957. - №16 - С.37-46.

55 Рекомендации по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении / ПНИИИС. — Москва: Стройиздат, 1984. — 156 с.

56 Беркут А.И., Копейкин В.В., Морозов П.А., Козляков А.Н. Подповерхностное зондирование с помощью геофизического комплекса «ЛОЗА», «ЛОЗА-М» (Методические рекомендации) // Институт механизированного инструмента (ВНИИСМИ). – Москва, 2002 г.

57 XTomo-LM 3 Система двумерной сейсмической томографии. http://www.xgeo.ru/index.php/ru/produkty/xtomo-lm.html

58 Вахрамеева Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. - Москва: Недра, 1987. - 192 с.

59 Семёнов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Недра, 1980. – 446 с.

60 Стандарт организации. Система менеджмента качества «Работы учебные. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию текстового и графического материала» // СТ КазНИТУ – 09 – 2023, - Алматы: КазНИТУ, 2023.