



# РАЗВЕДКА И ОХРАНА НЕДР

12 ♦ декабрь ♦ 2005

Основан в июле 1931 года

Ежемесячный  
научно-технический  
журнал

Учредители:  
Министерство природных  
ресурсов РФ,  
Российское геологическое  
общество

Главный редактор В.Н. Бавлов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

*В.А. Алискеров,  
А.П. Дорогутин (зам. гл. редактора),  
В.А. Ерхов, С.Л. Зубайраев,  
А.А. Кременецкий, В.С. Круподеров,  
Г.А. Машковцев, Н.В. Межеловский,  
Н.В. Милетенко, О.С. Монастырных,  
А.Ф. Морозов, Р.Р. Мурзин,  
П.В. Садовник, А.К. Соколовский,  
Е.Г. Фаррахов, А.Д. Федин,  
С.И. Федоров*

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

*В.Б. Мазур (председатель),  
Е.М. Аксенов, И.Ф. Глузов,  
С.В. Гошовский, Л.Г. Грабчак,  
С.Ж. Даукеев, В.В. Караганов,  
В.В. Карпук, А.К. Климов  
Э.А. Кравчук, О.Л. Кузнецов,  
М.И. Логвинов, И.Ф. Мигачев,  
О.В. Петров, Ю.А. Подтуркин,  
В.А. Рябков, Б.Н. Хахаев,  
Т.К. Янбухтин*

## СОДЕРЖАНИЕ

Хмелевской В.К., Золотая Л.А., Бобачев А.А., Модин И.Н. Основные задачи и подходы в отечественной инженерной геофизике	2
Бучарский Б.В., Бессонов А. Д., Янкевич Д.И., Горячев В.В., Соловьев Д.О. Современный комплекс малоглубинных геофизических исследований для решения задач, связанных с интервалом ВЧР	5
Юфряков Б.А., Линников О.Н. Интерактивная обработка данных радиолокаторов при обнаружении цилиндрических объектов	10
Владов М.Л., Старовойтов А.В., Калашников А.Ю. Некоторые вопросы интерпретации георадиолокационных данных при изучении железнодорожных насыпей	15
Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. Расширение спектра георадарных задач как следствие совершенствования аппаратной базы	18
Изюмов С.В., Дручинин С.В. Применение георадаров серии «ТР-ГЕО» в инженерной геофизике и строительстве	22
Кафиатуллин М.А., Соколов С.В. Результаты применения георадара в ОАО «Институт «Казгражданпроект»	24
Капустин В.В. Дополнительные возможности компьютерной обработки георадарных и сейсмических данных	26
Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И., Прийма Г.Ю., Чугаев А.В. Применение малоглубинной сейсморазведки отраженными волнами для оценки состояния околоствольного массива	31
Мясоедов Н.К., Кушнеров Н.Н., Попов А.Ю., Яковлев А.П. Повышение эффективности подавления дифрагированных кратных отражений с применением технологии SRME	33
Владов М.Л., Калинин В.В., Старовойтов А.В., Шалаева Н.В. Опыт сейсмоакустического обследования грунтоцементных свай	34
Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Юдина Л.И. Сейсморазведочная оценка причин деформации конструкций повышенной ответственности	38
Вознесенский Е.А., Владов М.Л., Кушнарева Е.С., Коваленко В.Г. Использование данных сейсмоакустических исследований для оценки динамической устойчивости грунтов в массиве	41
Монахов В. В., Овчинников В.И., Урусова А.В., Савин А.Н., Большаков Д.К. Опыт применения геофизических исследований на деформирующихся участках земляного полотна железных дорог	46
Зверев Е.О., Клепикова С.М., Монахов В.В., Большаков Д.К., Модин И.Н. Картирование торфяных залежей методом георадиолокации	49
Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение	52
Большаков Д.К., Иванова С.В., Марченко М.Н., Модин И.Н. Электрические зондирования для изучения мерзлотных условий вдоль трассы проектируемого трубопровода в Заполярье	54
Мельцев С.И., Примак П.Н., Рогачев М.В. Применение геофизических методов на подводных переходах магистральных нефтепроводов при горизонтально-направленном бурении	60
Вознесенский Е.А., Фуникова В.В., Кушнарева Е.С., Коваленко В.Г. Сейсмическое разжижение грунтов: механизм, последствия и инженерная оценка для целей сейсмического микрорайонирования территории	61
Быков А.П., Кулеш В.П., Москалик Л.М. Лазерный гетеродинный интерференционный гравиметр	65
Щеголькова Н.М. Некоторые закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях среднего течения р. Москвы	68
Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Тихомирова Г.И., Соловьева Л.В., Шапошникова Е.Ю. Литолого-формационная модель рифей-вендских отложений Иркинеево-Чалобецкой рифтовой зоны	71
Приходько А.Ю. Аэроэлектроразведка: возможности, состояние и перспективы	73
ХРОНИКА	
Ляшенко Е.А. К 175-летию первой находки изумруда в России	79
Список статей, опубликованных в журнале в 2005 г.	81



МОСКВА "НЕДРА"

Журнал "Разведка и охрана недр", 2005  
Изготовлено в ОАО "Издательство "Недра"

Хмелевской В.К., Золотая Л.А., Бобачев А.А., Модин И.Н. (МГУ)

## ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПОДХОДЫ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

**Объект, предмет и цели исследований, задачи и классификация инженерной геофизики.**

*Инженерная* (инженерно-гидрогеологическая) геофизика объединяет физические методы, *объектами исследований* которых являются:

почвы, грунты (глубины изучения — метры),  
верхняя часть разреза — ВЧР (десятки метров),  
геолого-геофизическая среда (сотни метров).

*Предметом исследований* являются малоглубинные физические поля естественного и искусственного происхождения с целью «косвенного» решения большого круга задач: гидрогеологических и почвенно-мелиоративных, инженерно-геологических и горных, мерзлотных и экологических, технических и археологических. В таблице приведены основные задачи инженерной геофизики и классификация геофизических методов для их решения.

*Особенностями исследований* инженерной геофизики являются:

небольшие глубины и резкая неоднородность изучаемой геологической (или геолого-геофизической) среды;  
влияние природных экзогенных и антропогенно-техногенных процессов;

наличие обширного класса решаемых задач в рамках геологических и технических дисциплин (гидрогеологии, почвоведения, инженерной геологии, горного дела, мерзлотоведения, гляциологии, технических средств изучения погруженных объектов, археологии и др.) с хорошо разработанными прямыми методами исследований.

Конкурировать с геолого-техническими дисциплинами по точности геофизика не может. Однако комплексирование более 2–3 геофизических методов с учетом априорной геолого-гидрогеологической информации позволяет успешно решать эти задачи, при этом существенно сокращая время и средства. Наилучший результат достигается только при условии совместной работы специалистов геологического и геофизического профилей.

*Особенностью методов исследований* инженерной геофизики является использование полей и методов небольшой, но разной глубинности:

геофизические методы «близкого действия» (ядерные, скважинные);

аэрокосмические методы видимого, инфракрасного, радиотеплового и более высоких диапазонов частот (тепловые, радиометрические);

малоглубинные методы (радиоволновые, сейсмоакустические);

микросъемка глубинных полей (гравитационного, геомагнитного, сейсмического, постоянного электрического) на небольших участках.

Существует большое число различных геофизических методов исследования, которые отражены в таблице, составленной Хмелевским В.К. В этой же таблице дана попытка классификации основных задач, решаемых инженерной геофизикой. Кроме того, для каждого типа задач

автор выделяет основные и вспомогательные геофизические методы, применяемые в настоящее время.

Особенностью геофизических методов является принципиальная возможность обеспечения высокого уровня помехозащищенности. Использование неразрушающих геофизических методов открывает путь для организации мониторинга различных процессов.

**О состоянии инженерной геофизики в начале XXI в.**

Возникнув в СССР свыше 70 лет назад, инженерная геофизика отличается непрерывным развитием даже в годы последнего безденежного 15-летия. Много лет неформальным общественным координатором инженерной геофизики в России являлся Научный Совет по инженерно-гидрогеологической и экологической геофизике Научного Совета по проблемам физики Земли РАН РФ. В нем на общественных началах в разные годы работали 20–22 человека — представители учебных, научных и производственных организаций Москвы, Ленинграда, Воронежа, Свердловска, Перми. В 1993–2002 гг. Совет работал совместно с Ассоциацией инженерной геофизики. В пяти отделениях названных городов было объединено свыше 1000 человек.

Научный Совет под председательством Хмелевского В.К. объединял специалистов, многие из которых были руководителями подразделений и лидерами отдельных направлений инженерной геофизики, сосредоточив в 1990–2005 гг. свои усилия на пяти видах деятельности: инженерно-гидрогеологическом, мерзлотно-гляциологическом, геоэкологическом, учебном, международных связях. Формами деятельности являлись: ежегодные заседания Совета с информацией на них руководителей направлений и обсуждением наиболее актуальных проблем года; поддержка издания методических рекомендаций, учебников, других публикаций; проведение регулярных семинаров (Общемосковского, Свердловского, Пермского); участие в организации 6 международных и всесоюзных конференций, 20 разного рода совещаний, 15 школ-семинаров по проблемам, содержащим инженерно-геофизическую тематику.

**Направления и результаты работ, выполненных под руководством участников Научного Совета в последние годы.**

1) «Гидропроект» и его филиалом ЦСГНЭО (руководитель Савич А.И.) применяются различные модификации наземных и подземных сейсмоакустических методов: сейсмический и ультразвуковой каротаж, акустико-эмиссионные исследования, микрогравиметрия, микромагниторазведка, георадиолокация и другие методы электроразведки. При выполнении работ используется ряд собственных базовых разработок сейсмоакустической аппаратуры: переносные сейсмостанции (СП 001, КИСН), регистраторы акустической эмиссии, ультразвуковая аппаратура (УК-98) и др.

Большой объем работ был проведен на стройках Москвы и десятках ГЭС России и стран дальнего зарубежья. Систематически проводились: инженерно-геологическое и гидрогеологическое картирование, микросейсмораионирование, регистрация микросейсмического фона, землетресений, взрывов, изучение оползней, карста, прочностного состояния массива, физико-механических показателей пород, для оценки устойчивости сооружений к сейсмическому воздействию и контролю качества строительства наземных и подземных объектов и др.

2) В институте ВСЕГИНГЕО (рук. Горяинов Н.Н.) были разработаны методические руководства по инженерно-

Основные задачи и методы инженерной геофизики (Составил В.К. Хмелевской)

№№ задач	Виды и методы геофизики	Гравиметрия	Магнитные			Электромагнитные										Сейсмические			Термические			Ядерные																				
			АМС	МС	МкМС	ЕП	ЭП	ВП	ВЭЗ	ВЭЗ-ВП	НЧМ	А-РВМ	А-МТЗ	ЧЗ	ЗСБ	РЛЗ	РВП	ЭЭ	СЭ	МПВ	МОВ	САП	ИКС	РТС	ШТС	ДТ	ГС	ЭС	ГГМ	НГМ												
1	Гидрогеологическая																																									
2																																										
3																																										
4	Почвенно-мелиоративная																																									
5																																										
6	Инженерно-геологическая																																									
7																																										
8																																										
9																																										
10	Мерзлотно-гляциологическая																																									
11																																										
12	Техническая																																									
13	Археологическая																																									

**Примечание.** Основные (■) и вспомогательные (▨) для выбора 3–5 из следующих методов: АМС, МС, МкМС, ИКС, РТС, ГС, ЭС — съемки (аэромагнитные, магнитные, микромагнитные, инфракрасные, радиотепловые, гамма, emanационные); ЕП, ЭП, ВП, НЧМ, РВМ — электромагнитные профилирования (естественного поля, сопротивлений, вызванной поляризации, низкочастотные, радиоволновые); ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, А-МТЗ, ЧЗ, ЗСБ, РЛЗ, РВП — электромагнитные зондирования (вертикальные электрические, вызванной поляризации, магнитотеллурические, частотные, становлением поля, в ближней зоне, радиолокационные (георадар), радиоволновые просвечивания); ЭЭ, ЭС — естественной эмиссии (электромагнитной и сейсмоакустической); МПВ, МОВ, САП — сейсмоакустические (преломленных и отраженных волн, сейсмоакустических просвечиваний); ШТС и ДТ — термические (в шпурах, скважинах и в донных осадках); ГГМ и НГМ — ядерно-физические (гамма и нейтронные гамма методы).

гидрогеологической геофизике, мониторингу экзогенных геологических процессов и подземных вод, при изучении техногенных грунтов и инженерно-геологического картирования арктического шельфа, в которых обобщен громадный опыт отечественно инженерно-гидрогеологической геофизики по системному подходу и стадийности к комплексным гидрогеологическим, инженерно-геологическим и геоэкологическим съемкам, а также специальным работам, при изучении: участков строительства АЭС, оползневых процессов, экологических аспектов аэрации, внедрении новых специальных геофизических технологий (микромагнитной съемки для изучения напряженного состояния массивов, высокочувствительных гравиметрических съемок активных разрывных нарушений, высокочастотного электропрофилеирования для изучения почв, грунтов, многоволновой сейсморазведки для малоглубинных инженерно-геокриологических исследований).

3) В институте ПНИИС (рук. Зыков Ю.Д.) с привлечением ряда организаций подготовлены нормативные документы: «Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства (Часть VI. Правила производства геофизических исследований)», который является обязательным дополнением к «Своду правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. (Часть I. Общие положения)».

Разработанные нормативные документы утверждены ГОССТРОЕм и положили начало обязательному применению геофизических методов в ходе изысканий под строительство.

4) В Институте Физики Земли РАН (рук. Д.С. Аleshин) наряду с теоретическими и аппаратными разработками проводились опытно-производственные работы по изуче-

нию сейсмической опасности на Сахалине, в г. Северске, Красноярском крае, Калининградской обл., на ряде объектов Москвы. Под руководством А.Г. Гамбурцева продолжают изучаться временные вариации разных геофизических и биологических процессов, материалы которых лежат в основе биологической геофизики (геофизическая биология).

5) Во ВНИИ Геофизике (рук. Ерхов В.А.) проведено обобщение результатов применения многоволновой сейсморазведки для исследования малых глубин (от 5 до 100 м) на территории г. Москва и Московской обл. для решения различных геоэкологических задач.

6) В «Росстройизысканиях» (рук. Баулин Ю.И.) в соответствии с федеральной целевой программой проводятся работы по изучению «Сейсmobезопасности территории РФ» путем создания крупномасштабных карт сейсмического микрорайонирования. Объединение «Росстройизыскания» является разработчиком новых (и единственных) в РФ Республиканских строительных норм по сейсмическому микрорайонированию.

7) В МГУ, РГГУ, Ин-те Географии РАН (рук. Зыков Ю.Д., Фролов А.Д., Мачерет Ю.Я.) продолжают развиваться мерзлотные и гляциологические геофизические исследования. Хотя объемы экспериментальных работ уменьшились, но благодаря применению новых методов (георадар, радиоволновые методы профилирования, разные варианты сейсмоакустики) и комплексированию со стандартными методами малоглубинной геофизики повысилась надежность получаемой информации и расширился круг решаемых задач. Эти проблемы обсуждаются на ежегодных международных конференциях гляциологов и мерзлото-ведов. Кроме того, регулярно издаются тематические труды, где геофизика занимает значительное место.

8) *В организации «Аэрогеофизика» (рук. Контарович Р.С.)* проводятся аэрогеофизические исследования мирового уровня комплексом магнитного, гамма-спектрометрического, электроразведочного и гравиметрического методов. Используются новые высокоточные отечественные и зарубежные приборы с компьютерной обработкой информации. Основная задача исследований — картирование и мониторинг ВЧР.

9) *На отделении геофизики геологического факультета МГУ* ведутся разнообразные инженерно-геофизические исследования. Под руководством *Модина И.Н.* развивается техническая и археологическая геофизика, предназначенная для выявления и изучения древних и современных искусственных сооружений, создаются технические и методические основы для интерпретации данных инженерной геофизики, с опробованием на множестве объектов в России и за рубежом. Под руководством *Золотой Л.А.* развивается почвенная геофизика. Для планового почвенного картирования, построения почвенных профилей, их классификаций и мониторинга на ряде полигонов опробовались микромагниторазведка, каппаметрия, георадар. *Петрухиным Б.П.* разрабатывается электродинамическая теория метода фазовой и амплитудной георадиолокации. Под руководством *Владова М.Л.* развиваются сейсмоакустический и георадиолокационный методы для решения инженерно-технических задач. Сотрудники отделения геофизики стали инициаторами серии международных конференций по георадару, геоакустике и инженерной геофизике.

#### **«Инженерная геофизика 2005»**

Последняя тематическая конференция по инженерной геофизике после длительного перерыва с участием отделения геофизики МГУ состоялась весной 2005 г. В работе конференции приняли участие 126 специалистов из 85 организаций России, Украины, Латвии, Киргизии и Казахстана. Были представлены государственные и коммерческие фирмы, научные и учебные заведения, изыскательские и производственные организации инженерно-геологического профиля.

В представленных на пленарном заседании докладах по комплексированию методов в инженерной геофизике были рассмотрены задачи: изучение и диагностика состояния железнодорожного полотна, мониторинг грунтов под автомобильными дорогами, инженерно-геофизические изыскания в городских условиях, диагностика и оценка состояния строительных конструкций, археологические исследования и др.

Сессия «Теория и практика сейсмоакустических исследований» была посвящена геофизическим работам ряда организаций на акваториях, шельфе, прибрежных территориях при изысканиях под строительство линейных объектов (нефтегазопроводы, кабели связи и силовые кабели), по мониторингу состояния дна и опасных геологических процессов (ГНПП «Севморгео», ООО «Моринжгеология», ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», Институт Океанологии РАН, МГУ, ЗАО «Гео-Хазар», ООО «Севзапгидропроект», ЗАО «Пирс» и др.).

На сессии «Электроразведка в инженерной геофизике» обсуждались возможности и проблемы использования электроразведочных методов при инженерно-геологических изысканиях, описаны примеры зимних работ в Заполярье на трассе нефтепровода (МГУ), комплексирование методов становления поля и метода сопотивлений при исследовании толщ многолетнемерзлых пород (ООО «НПО Геотехнология»), применение метода ДИП (Сверд-

ловская железная дорога), поиск трещинно-карстовых вод методом МПП (ООО «Радиоэкологическая лаборатория МГРТ»). Были продемонстрированы георадары (ООО «ЛОГИС», ООО «Геологоразведка»), сейсмостанция «Лакколит» (ООО «ЛОГИС»), комплексы для метода сопотивлений (ООО «Северо-Запад»).

В рамках сессии «Практика применения геофизики при инженерных изысканиях» большинство докладов было посвящено актуальной теме применения геофизических методов для неразрушающего контроля состояния инженерно-технических сооружений и оценке их деформационных и прочностных свойств (Институт Горного дела УроРАН, ПНИИИС, МГУ, ЗАО «САНиК», Институт геофизики СО РАН).

На сессии «Применение георадиолокации в инженерной геофизике» тематика докладов охватила широкий спектр вопросов от конструктивных особенностей георадаров и путей их развития (ООО «ЛОГИС», ФГУП СКБ ИРЭ РАН) до методики и практики применения разнотипных георадаров при решении инженерно-геологических и технических задач (ООО «Геологоразведка», ЗАО «Триада-Холдинг», МГУ, ООО «Инжстройизыскания»).

Отдельной сессией была выделена тематика «Теория и практика малоглубинной сейсморазведки». Были заслушаны доклады по высокоразрешающей сейсморазведке на поперечных волнах, вопросам изучения склоновых процессов (Институт криосферы Земли СО РАН), картирования доледниковой долины (Inteseis, Латвия), прогноза строения горного массива (УкрНИИМИ НАН Украины), поиска месторождений полезных ископаемых (ОАО «Краснодарнефтегеофизика» и ООО НПФ «Георазведка»), контроля состояния насыпных плотин и дамб (Горный институт КНЦ РАН). Методические аспекты малоглубинной сейсморазведки прозвучали в выступлениях докладчиков от ведущих институтов (ФГУП ВНИИГЕОФИЗИКА и Горный институт Уро РАН), а также компаний ООО КГЭ «Астра» и ЗАО «Теллур СПб».

На сессии «Новые технологии в инженерной геофизике» были заслушаны доклады о новых технологиях, применяемых в электроразведке (ООО «Ветеран Ltd»), в инфракрасной радиометрии (НИИОСП им. Н.М. Герсванова), при инженерных изысканиях в условиях предельного мелководья (ГНЦ «Южморгеология») и при картировании почв (МГУ).

#### **Ближайшие перспективы развития инженерной геофизики.**

Несмотря на резкое сокращение в стране бюджетных ассигнований на науку и геологию, в последние 15 лет инженерная геофизика активно развивается в области теории, интерпретации и создании новой техники. Растет количество геофизических организаций, расширяется круг решаемых задач по инженерной и экологической геофизике. Иногда это происходит в ущерб качеству из-за недостатка высококвалифицированных специалистов.

Актуальность развития инженерной геофизики объясняется важностью для человечества обеспечения не только природными ресурсами, но и подземной водой, информацией об условиях строительства и эксплуатации сооружений, особенно крупных и аварийно опасных (атомных и других электростанций, крупных нефтехимических заводов, трубопроводов и др.), организации автоматизированного мониторинга за их деятельностью. Невысокая стоимость проведения малоглубинных инженерно-геофизических работ и проверочного бурения дает возможность установить корреляционные связи между геолого-гидро-

геологическими свойствами горных пород и геофизическими характеристиками. Это позволяет точечные геологические данные в скважинах и шурфах экстраполировать на площади геофизических съемок. Такой подход сокращает время и стоимость изысканий. К сожалению, рыночная экономика, особенно дикая, с неконтролируемым потреблением природных ресурсов не заинтересована в привлечении геофизических методов к инженерно-геологическим изысканиям. Поэтому нужен государственный контроль за недропользованием. Для этого необходимо разработать нормативные документы, обязывающие недропользователей выделять средства на охрану природы, изыскания и организацию мониторинга с обязательным применением геофизики. Нам кажется, что инженерная и экологическая геофизика выдвигаются в число научно-прикладных дисциплин государственного уровня значимости.

Основными направлениями создания перспективных инновационных технологий в инженерной геофизике, можно считать следующие.

*В области теории:*

совершенствование теории электромагнитных и сейсмоакустических полей в неоднородных флюидосодержащих средах;

разработка теории нелинейной геофизики, основанной на явлениях аномальных дисперсий отдельных полей, перекрестных эффектах как чисто физических (сейсмoeлектрических, ядерно-магнитной прецессии, термоакустических и др.), так и физико-химических (геоэлектрoхимические, радиационно-химические и др.).

*В области новой техники и технологий:*

создание современных геофизических приборов и систем наблюдения;

внедрение градиентных способов измерений физических полей;

компьютеризация всех процессов съемки и обработки.

*В области математического моделирования и компьютерной интерпретации:*

окончательный переход на двух- и трехмерное решение прямых и обратных задач геофизики;

создание эффективных алгоритмов и программ для геолого-геофизической интерпретации,

*В области комплексных геолого-геофизических исследований при решении задач инженерной и экологической геофизики:*

создание баз данных по инженерно-экологическим условиям и эффективности геофизических методов при решении типовых задач в различных регионах России;

дальнейшее развитие комплексного геолого-геофизического картирования (картографирования) на базе геоинформационных систем (ГИС);

создание разномасштабных специализированных карт: инженерно-геологических (микросейсмического районирования, динамических модулей упругости, трещиноватости и др.), гидрогеологических и гидромелиоративных (вводно-физических свойств, водоносных и водоупорных пород и др.), мерзлотно-гляциологических (распространение талых, мерзлых пород и льдов и др.), экологических (геодинамической опасности, сейсмичности, вещественного загрязнения, интенсивности природных и техногенных полей и др.);

использование геофизических карт для организации мониторинга недр и земной поверхности и создания кадастров национального землепользования, минеральных, водных, почвенных ресурсов, экологической устойчивости территорий и т.п.

Инженерная и экологическая геофизика — научно-прикладная дисциплина государственного уровня значимости. Для успешного развития инженерной геофизики необходима разработка современных нормативных документов, обеспечивающих рациональное использование, охрану и мониторинг окружающей среды и инженерных объектов. Для повышения конкурентной способности отечественной геофизики особое внимание следует уделить развитию наукоемких инновационных геофизических технологий и подготовке квалифицированных специалистов.

© Коллектив авторов, 2005

Бучарский Б.В., Бессонов А.Д., Янкевич Д.И.(НВ НИИГГ), Горячев В.В., Соловьев Д.О.(ООО НПО «Геотехнология»)

### **СОВРЕМЕННЫЙ КОМПЛЕКС МАЛОГЛУБИНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, СВЯЗАННЫХ С ИНТЕРВАЛОМ ВЧР**

Современное состояние и темпы развития теоретической и аппаратурной базы, а также новых методических разработок для электромагнитных и сейсмических методов исследования верхних интервалов геологических разрезов (ВЧР) обеспечивают решение широкого спектра структурных, поисковых, инженерно-геологических и прикладных задач, связанных с пока еще слабо изученной, сложно построенной частью геологических разрезов регионов.

Для решения задач, связанных с интервалом ВЧР, в НВ НИИГГ используются современные методики и технологии малоуглубинной импульсной электроразведки (ЗСМП, ВРЭ-ВП, МЗСБ-ВПИ), электроразведки на постоянных токах (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП) и сейсмических методов (МПВ, мини-ОГТ).

Аппаратурная база строится на новейших отечественных разработках электроразведочной и сейсмической аппаратуры (ТЭС-24, AGE-XXL, Импульс-СЛ, Цикл-6, Карьер-М, Эхо-3, Диоген, Лакколит).

Решаемые задачи в верхнем интервале разреза:

**Мониторинг геологической среды на участках развития оползневых процессов.**

Комплексом геофизических методов (МПВ, МОГТ, МЗСБ) решаются задачи:

оконалирования тела современного и древнего оползней; определения глубины развития зеркала скольжения; выделения зон разуплотнения, водонасыщенности оползневых толщ;

последующего мониторинга за динамикой развития оползневых процессов.

В комплексе с инженерно-геологическими обследованиями комплекс геофизических методов применялся при изучении оползневых процессов в Смирновском ущелье г. Саратова с целью:

оконалирования тела современного оползня; определения глубины развития зеркала скольжения; выделения зон разуплотнения, водонасыщенности оползневой толщи;

последующего мониторинга за динамикой развития оползневых процессов.

Полевые геофизические работы выполнены комплексом геофизических методов:

**Электроразведка** методом зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне (**МЗСБ**) — профильно-площадные наблюдения на участке площадью 4 га (200 × 200 м) с шагом по профилям не более 10–20 м.

Задачи исследований:

- литологическое расчленение толщи ВЧР (верхней части разреза) до глубины 20 м;
- выделение границ оползневой блока;
- выделение зон обводнения;
- картирование поверхности водоупора (зеркала скольжения).

**Сейсморазведка** методом преломленных волн (**МПВ**) — зондирования по сети опорных профилей.

Задачи исследований:

- уточнение данных, полученных электроразведкой МЗСБ в сложных гидрогеологических условиях;
- выделение зон разуплотнения, динамически напряженных зон;
- определение уровня грунтовых вод (рис. 1, 2);
- мониторинг развития оползневых процессов.

*Картирование реперных слоев в разрезе.*

Комплексом геофизических методов (МПВ, МОГТ, МЗСБ) решаются задачи:

- региональные геофизические работы;
- картирование первой жесткой границы;
- прогноз статических поправок.

Комплексированием геофизических методов по трем профилям на Чернавском участке детально изучены скоростные и геоэлектрические характеристики ВЧР в интервале глубин от 5 до 300 м. Выполнены результативные построения согласованных геофизических моделей ВЧР по изученным профилям. В разрезе ВЧР по профилям выделены геоэлектрические границы, отождествляемые с подошвой зоны малых скоростей (ЗМС) и первой жесткой границей.

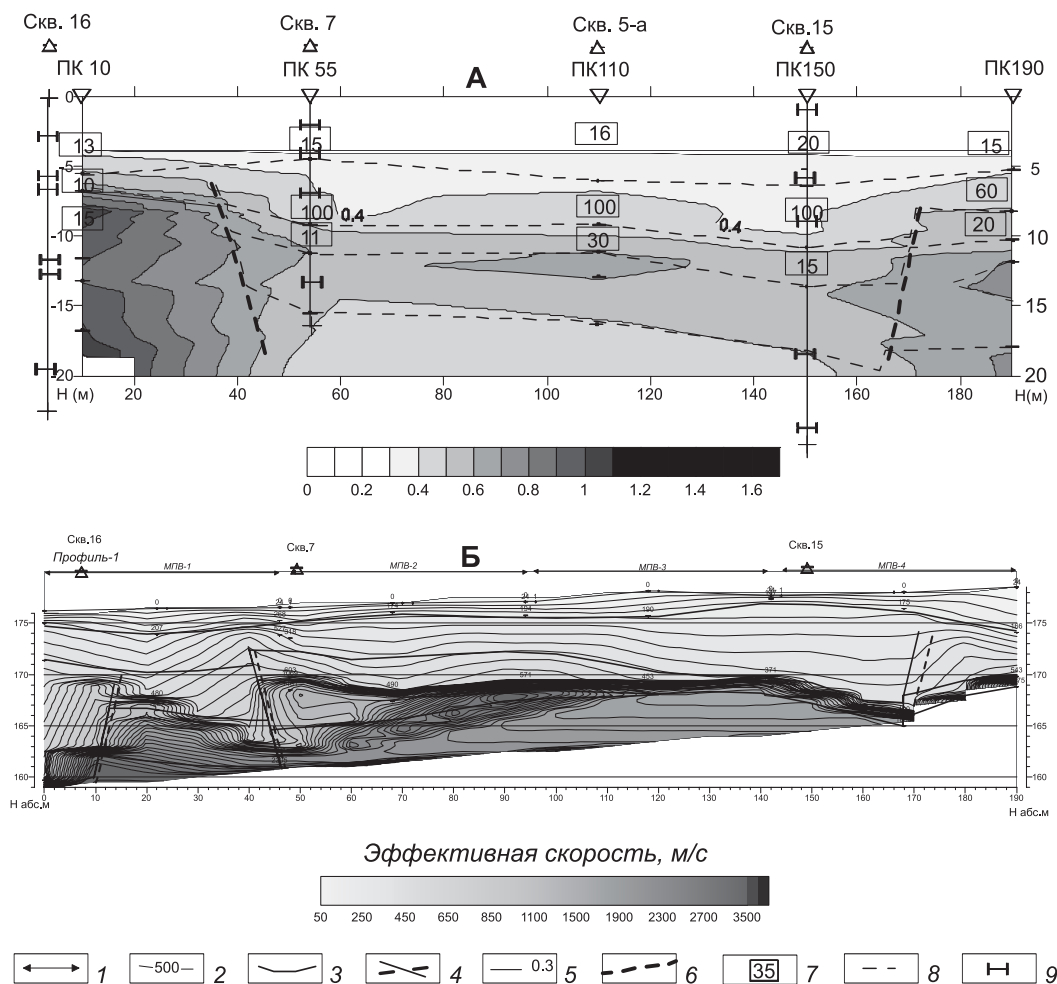
По результатам комплексного корреляционно-регрессионного анализа материалов профильных работ установлены множественные высокоточные корреляционные связи геоэлектрических и скоростных характеристик в интервале ВЧР, дан прогноз статических поправок по геоэлектрическим характеристикам разреза. Достигнутая среднеквадратичная погрешность прогнозирования статических поправок составила около 5 мс (рис. 3).

*Геофизические исследования в зонах развития пльвунов.*

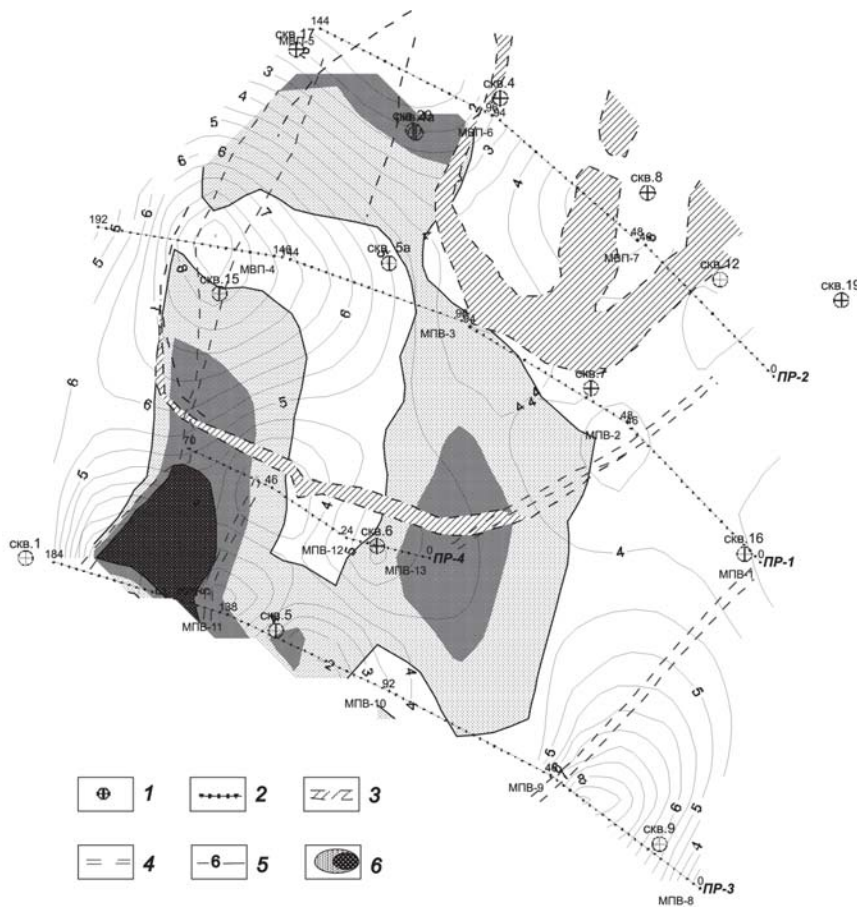
По результатам комплексных геофизических исследований (МПВ + МЗСБ) на участке проходки канализационного коллектора (г. Саратов) детально изучены геоэлектрическая и скоростная модели верхней части разреза в интервале глубин от 1 до 15 м. Геоэлектрические и скоростные аномалии, выделенные по параметру граничных значений интервального электрического сопротивления и продольной скорости, отражают наличие в исследованных интервалах разреза разуплотненных и обводненных грунтов. Локализована зона разгрузки грунтовых и техногенных вод, приуроченная к разуплотненным интервалам разреза и погруженному участку поверхности регионального водоупора (рис. 4, 5).

*Геофизические исследования в районах развития многолетнемерзлых пород.*

Комплексом электромагнитных методов ВРЭ-ВП, ЗСМП, ВЭЗ-МЗСБ решаются задачи структурной, инженерной геологии при обследовании разрезов



**Рис. 1** Геофизические разрезы по профилю I в Смирновском ущелье. А — геоэлектрический разрез по данным электроразведки МЗСБ; Б — скоростной разрез по данным сейсморазведки МПВ; 1 — расстановки МПВ; 2 — изолинии скорости продольных волн; 3 — скоростные границы; 4 — зоны скоростной неоднородности; 5 — изолинии продольной электропроводности; 6 — основные геоэлектрические границы; 7 — средние значения продольного электрического сопротивления геоэлектрических слоев; 8 — зоны геоэлектрической неоднородности; 9 — основные литологические границы по данным бурения



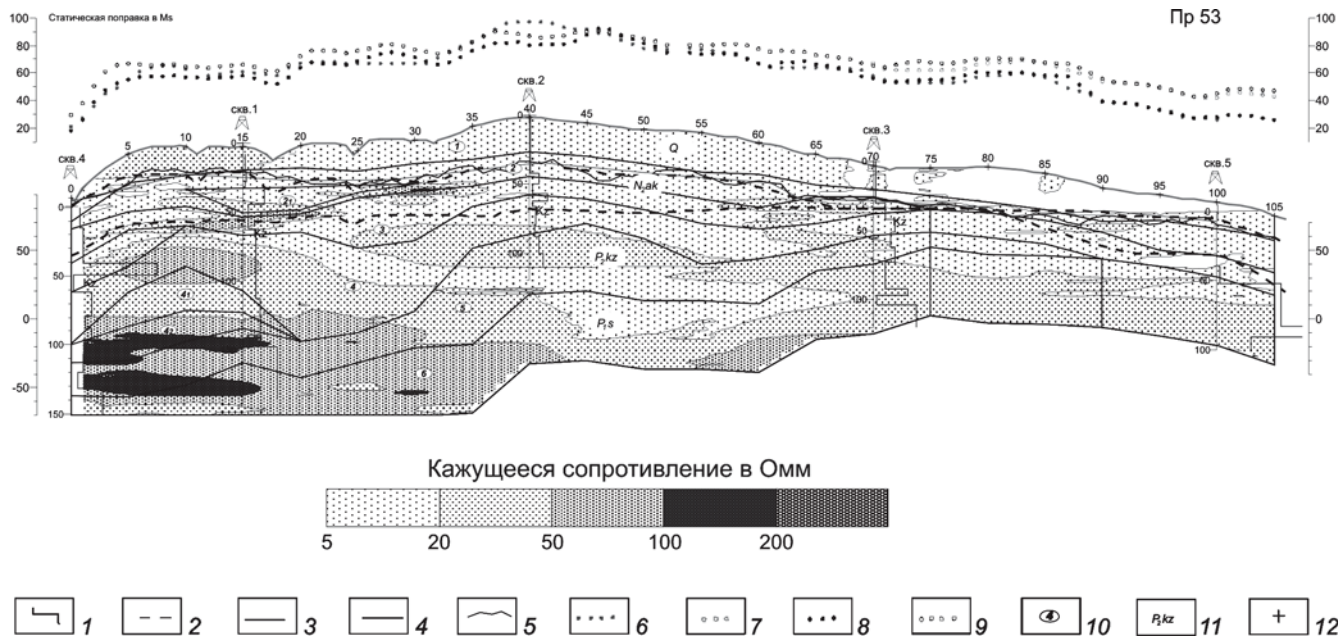
**Рис. 2.** Карта толщин от первой до второй преломляющей границы (объект: противооползневые сооружения в Смирновском ущелье для защиты областной клинической больницы, масштаб 1 : 1000); 1 — инженерно-геологические скважины; 2 — сейсморазведочные профили методом МПВ; 3 — трещины и провалы на дневной поверхности; 4 — зоны скоростной неоднородности по данным МПВ; 5 — изолинии толщин картируемого оползневой блока; 6 — зона разуплотнения картируемой толщи

площадок промзон, кустовых скважин, ревизии состояния отсыпки площадок, автодорог на действующих и незавершенных строительстве нефтегазовых месторождений в районах Крайнего Севера (п-ов Ямал, Ямбург). Детально изучается геоэлектрический разрез, прогнозируется геокриогенная обстановка в интервале развития толщи многолетнемерзлых пород (ММП).

*Зоны экологического загрязнения ВЧР.*

Профильными исследованиями МЗСБ-ВПИ в зонах действующих нефтеперерабатывающих заводов, магистральных нефтегазопроводов (НПЗ «Крекинг», г. Саратов) подземных хранилищ газа (Северо-Ставропольское ПХГ) определяется направление потоков (разгрузки) грунтовых вод, загрязненных нефтепродуктами, прослеживается уровень грунтовых вод (УГВ), поверхность водоупора, выделяются участки скопления (линзы) нефтепродуктов, газовых шапок, пути миграции водорастворенных газов.

На Северо-Ставропольском ПХГ изучены комплексные геоэлектрические характеристики верхней части разреза (ВЧР) до глубины 300 м. Уточнено геологическое и структурно-тектоническое строение ВЧР. По линиям отработанных профилей построены исходные геоэлектрические модели разрезов по корреляции данных электрокаротажа (КС) скважин. Построены геоэлектрические разрезы в параметрах первично-регистрируемого сигнала (E(H)) и его трансформаций:



**Рис. 3.** Геолого-геофизический разрез и прогнозные графики статпоправок по профилю 00701-53 (Чернавский участок): 1 — диаграмма стандартного электрокаротажа (КС); 2 — скоростные границы по МПВ; 3 — геоэлектрические границы по МЗСБ; 4 — подошва ЗМС по зондированиям МПВ; 5 — подошва геоэлектрического комплекса приуроченного к подошве ЗМС; 6 — статпоправка по данным МПВ (для л. п. 70 м); 7 — статпоправка по данным МПВ (для л. п. 40 м); 8 — прогнозная статпоправка по МЗСБ (для л. п. 70 м); 9 — прогнозная статпоправка по МЗСБ (для л. п. 40 м); 10 — номер геоэлектрического комплекса; 11 — стратиграфический комплекс; 12 — абс. отм. устья скважин

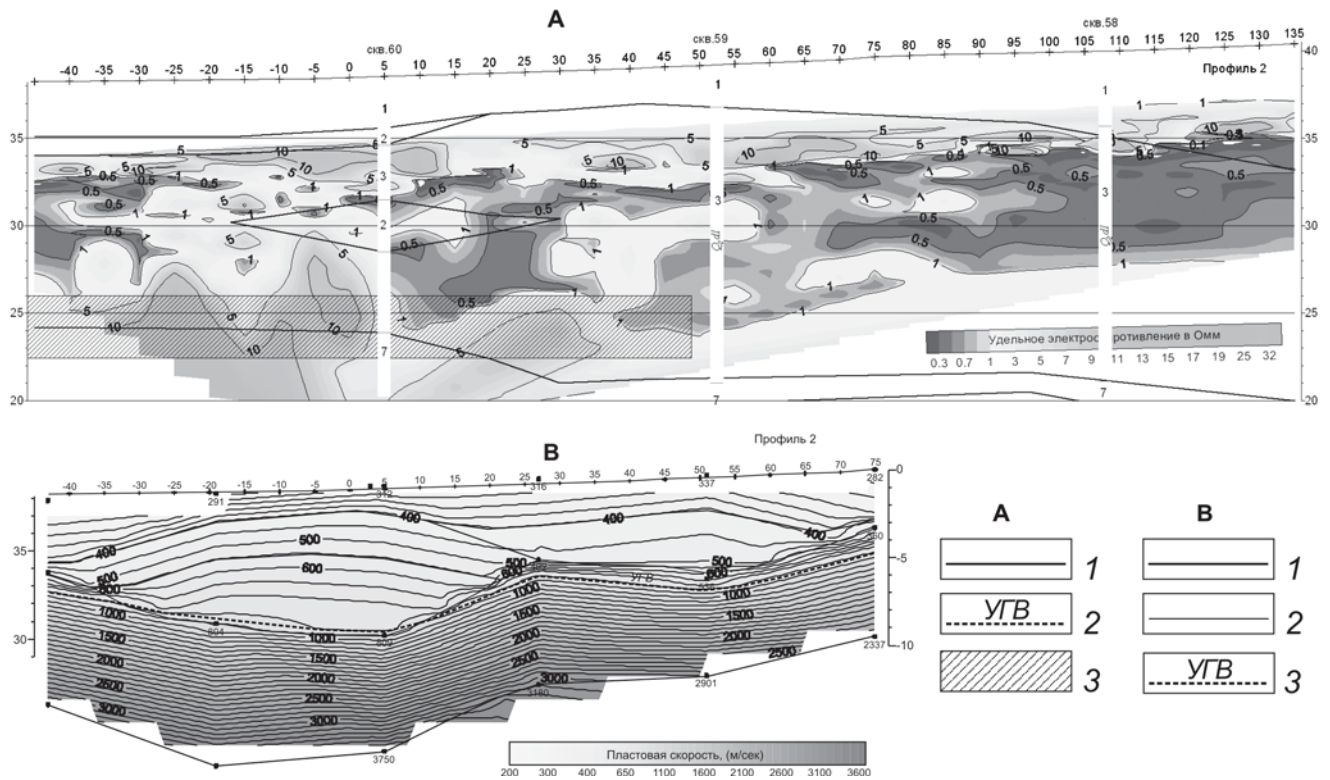


Рис. 4. Геофизические разрезы по профилю проходки канализационного коллектора: А — геоэлектрический разрез по данным МЗБ; 1 — преломляющие границы; 2 — уровень грунтовых вод по МПВ; 3 — канализационный коллектор; В — скоростной разрез по данным МПВ; 1 — изолинии пластовых скоростей; 2 — основные скоростные границы; 3 — граница УГВ

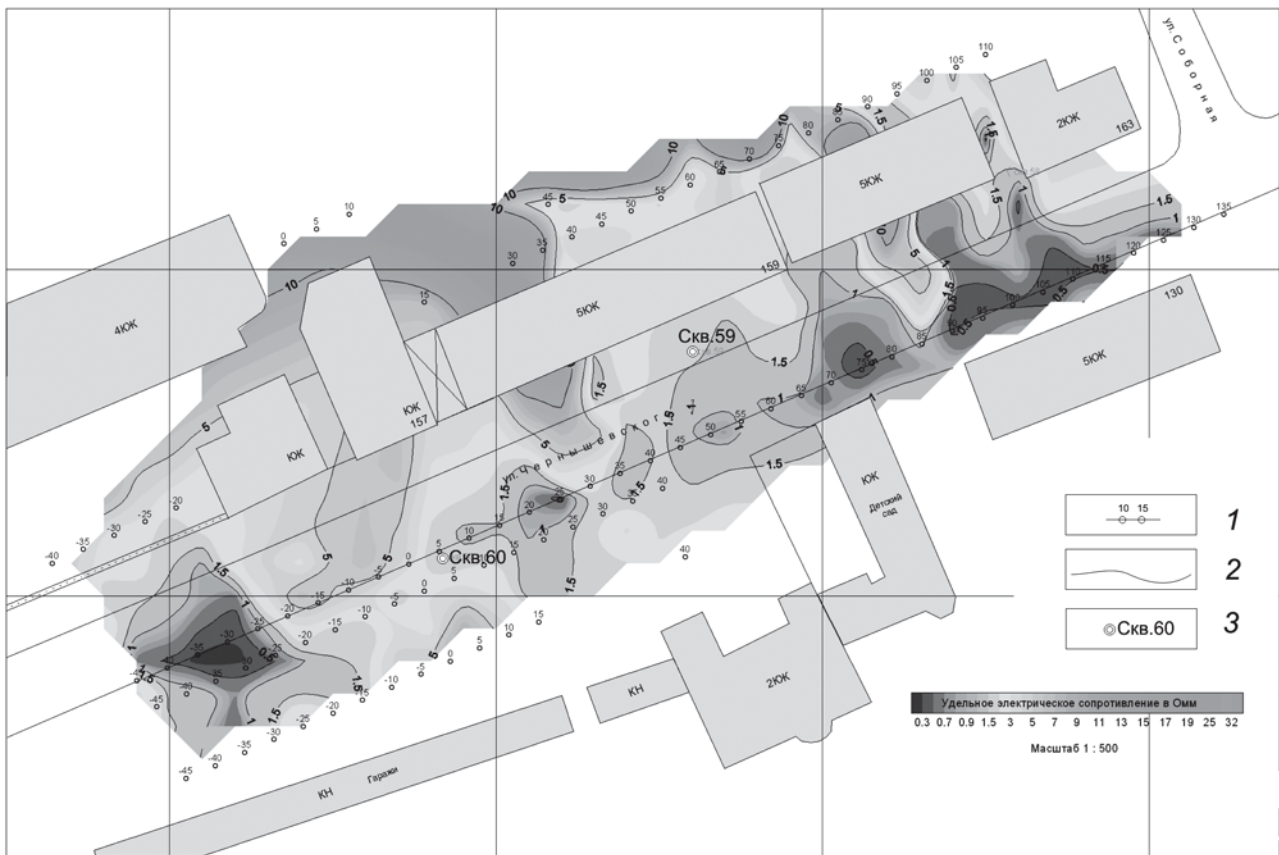
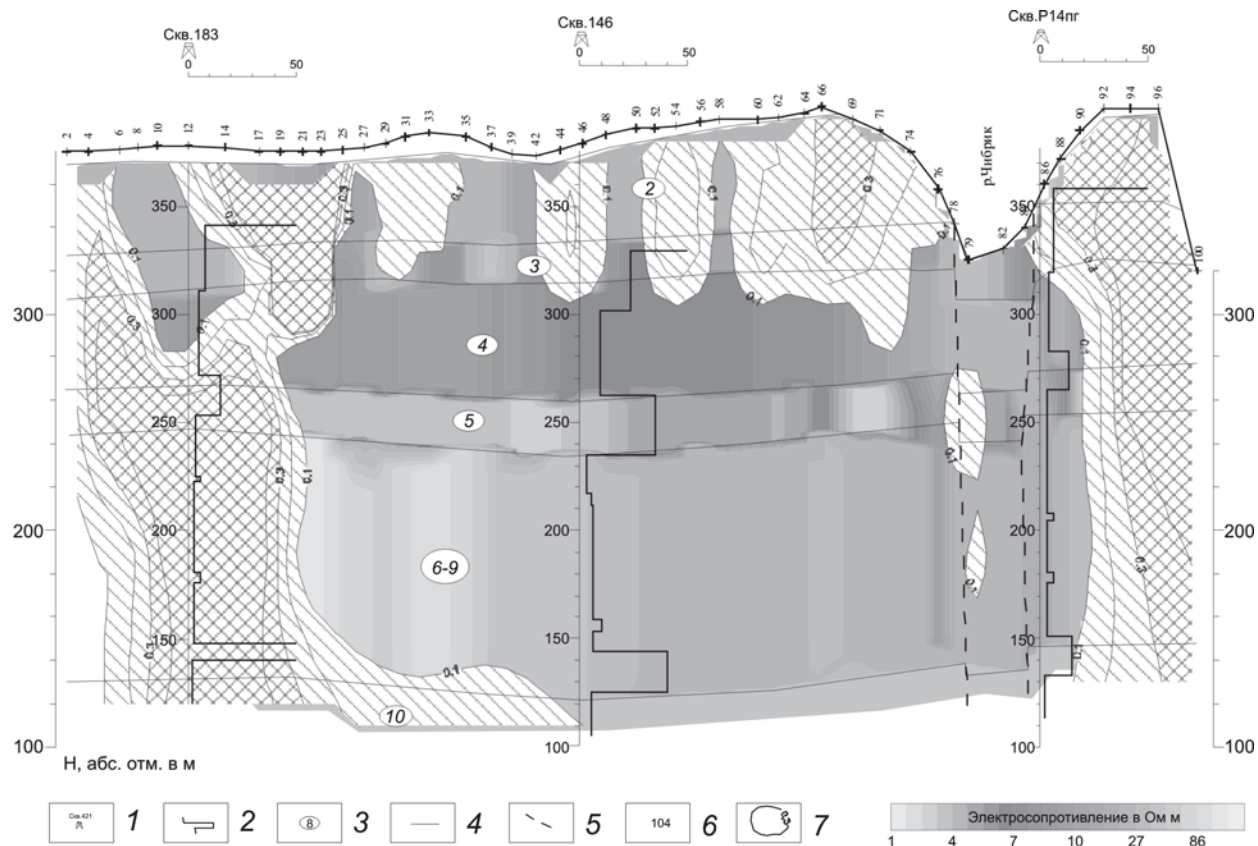
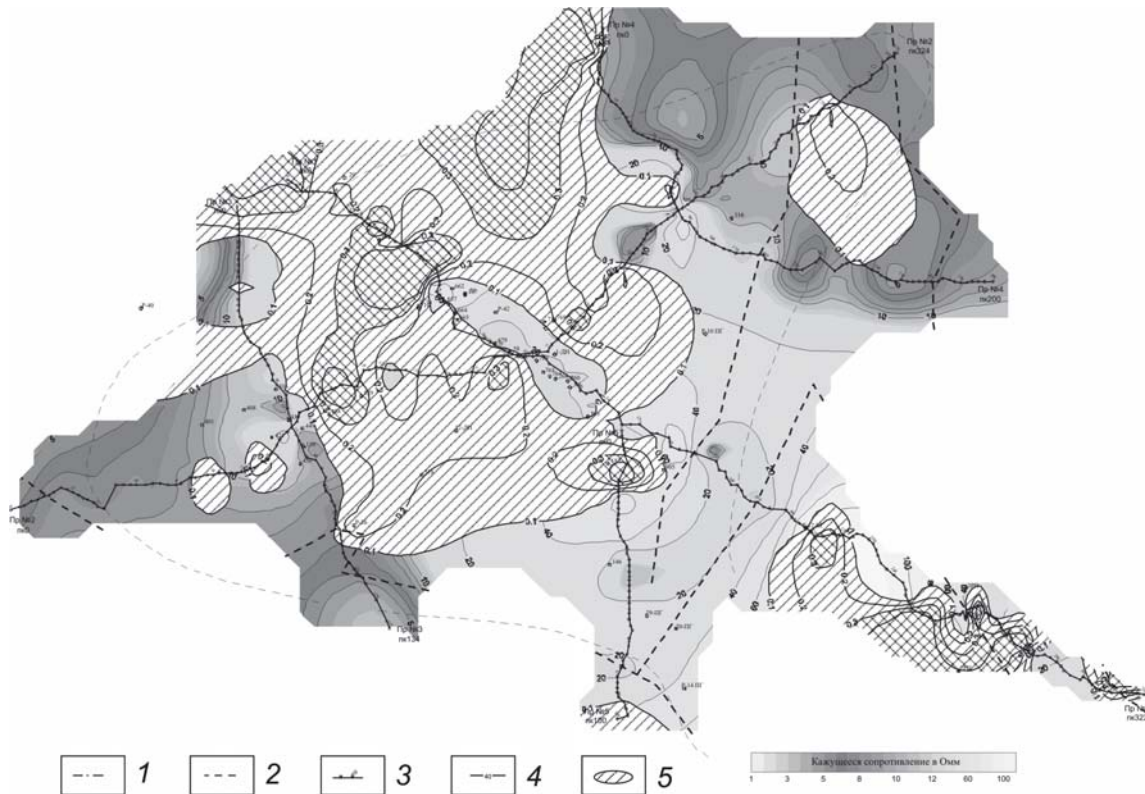


Рис. 5. Схема-срез интервальных электрических сопротивлений разреза (абс. отм. 28–30, интервал глубин 8–11 м, участок проходки канализационного коллектора): 1 — пикеты зондирования МЗБ; 2 — изолинии интервального электрического сопротивления; 3 — инженерно-геологические скважины





**Рис. 6.** Геоэлектрический разрез по профилю Северо-Ставропольского ПХГ: 1 — скважины глубокого бурения (Северо-Ставропольское ПХГ); 2 — диаграммы кажущегося электрического сопротивления по электрокаротажу КС; 3 — номер геоэлектрического слоя; 4 — геоэлектрические границы; 5 — контактные зоны блоков; 6 — номер пикета зондирования МЗСБ-ВПИ; 7 — изолинии коэффициента индукционной вызванной поляризации (ВПИ)



**Рис. 7.** Схема распределения водогазонасыщенных зон в интервале ВЧР Северо-Ставропольского ПХГ по данным электроразведки МЗСБ-ВПИ: 1 — контур Северо-Ставропольского ПХГ; 2 — линии разделения тектонических зон; 3 — пикеты и линии профилей МЗСБ-ВПИ; 4 — изоомы; 5 — зоны повышенных значений индукционной вызванной поляризации

изолиний суммарной продольной электропроводимости  $\Sigma\sigma(H)$ , удельной электропроводности в трассовом изображении  $\sigma(H)$ , функции границ раздела (ФГР) в трассовом изображении. На основе комплексного анализа первичного сигнала и математического моделирования проведено разделение полей электропроводимости и индукционной вызванной поляризации. Созданы комплексные интерпретационные модели разрезов в изолиниях интервального (послойного) электрического сопротивления  $\rho_{инт}$  и коэффициента индукционной вызванной поляризации  $K_{\eta\text{ впи}}$ . Выделены аномальные зоны в распределении этих параметров по разрезу и по профилям. Построены глубинные разрезы для выделенных геоэлектрических горизонтов, выделены элементы блоковой тектоники и оползневых процессов.

По профильной сети наблюдений построены карты — схемы поверхностей и мощностей основных опорных геоэлектрических горизонтов с выделенными элементами блоковой и оползневой тектоники. На основе построенных разрезов по профилям МЗСБ-ВПИ и карт-схем комплексных геоэлектрических параметров для различных геоэлектрических горизонтов ВЧР даны оценки их водо- и газонасыщенности.

Выделенные геоэлектрические аномалии в разрезе и по латерали обусловлены изменением геоэлектрических характеристик и эффектами индукционной вызванной поляризации на контактах полифазных сред (водо- и газонасыщенные зоны, интервалы) за счет вертикальной и латеральной миграции. Миграция водорастворенных газов происходит в основном в зонах контактов тектонических и оползневых блоков, а также по затрубному пространству в зонах расположения кустов технологических скважин ПХГ.

В интервале глубин распространения слоев с улучшенными коллекторскими свойствами (геоэлектрические горизонты 2, 5, 7.1, 8.1, 9), выделены зоны латеральных аномалий комплексных геоэлектрических параметров, подпитаемые зонами вертикальных («сквозных») аномалий.

Рекогносцировочный характер электроразведочных работ с редкой профильной сетью зондирований МЗСБ-ВПИ на территории площадью более 600 км<sup>2</sup> позволил выявить в разрезе (ВЧР) по линиям профилей геоэлектрические аномалии как участки возможных каналов вертикальной и латеральной миграции водорастворенных газов без достоверной их конфигурации в плане. По критериям аномальных типов кривых МЗСБ и определяемых значений комплексных геоэлектрических параметров в изученном интервале ВЧР выделены зоны водонасыщения и газонасыщения (рис. 6, 7).

Комплекс малоглубинных методик и технологий геофизических исследований успешно внедряется и используется при производственных работах в различных регионах.

© Юфряков Б.А., Линников О.Н., 2005

Юфряков Б.А., Линников О.Н. (НТЦСМ)

#### ИНТЕРАКТИВНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В работах [1] и [2] изложен фронтальный метод интерпретации данных радиолокатора подповерхностного зондирования (РЛПЗ), который основан на выделении передних фронтов зарегистрированных сигналов в виде фронтальных

годографов и отображении их в форме отражающих поверхностей объектов с использованием алгоритма поточечного миграционного преобразования. Приведены свойства миграционных преобразований для плоских и криволинейных поверхностей. При этом предполагается, что известна скорость распространения сигналов в среде, и существует алгоритм выделения фронтальных годографов из данных результатов зондирования.

Для устранения неопределенности скорости распространения сигналов наибольший интерес представляют криволинейные отражающие поверхности с фиксированной кривизной, поскольку в этом случае возможно одновременное измерение скорости и определение параметров отражающих поверхностей. При подповерхностном зондировании среди объектов такого класса чаще всего встречаются цилиндрические поверхности (арматура, трубы, кабели и т.п.). Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться именно такие поверхности.

В работах [3] и [4] предложен метод оценки радиусов цилиндрических объектов по результатам аппроксимации выделенных фронтов отраженных сигналов РЛПЗ гиперболами при известной скорости распространения сигналов. В данной работе рассматриваются интерактивные методы обработки данных, которые позволяют одновременно оценить скорость распространения сигналов в среде и параметры цилиндрических объектов (ориентацию, радиус и глубину залегания).

Предполагается, что зона сканирования является прямоугольной областью в плоскости XY, а глубинная ось Z направлена в зондируемую среду. При регистрации результатов зондирования в каждой точке сканирования фиксируются значения принятых сигналов в дискретные моменты времени на оси T. Массив данных результатов зондирования будем называть пространством сигналов. В пространстве сигналов с помощью программных средств можно выделить поверхности «первых вступлений фронтов волн» зарегистрированных сигналов, отраженных от объектов. Эти выделяемые поверхности будем называть фронтальными годографами. В данной работе предполагается, что фронтальные годографы формирует оператор в интерактивном режиме по результатам аппроксимации наблюдаемых фронтов для двух выбранных ортогональных сечений в пределах зоны наблюдения сигналов для определенного цилиндрического объекта. С точки зрения видов фронтальных годографов цилиндрические объекты можно разделить на два класса: горизонтальные цилиндры, у которых ось параллельна оси сканирования, и наклонные цилиндры, у которых ось имеет некоторый угол наклона по отношению к плоскости сканирования.

Вначале рассмотрим методы измерения параметров горизонтальных цилиндров. Пусть ось цилиндра, радиус которого равен  $r$ , удалена от плоскости сканирования на расстояние  $h$ , а ее проекция на эту плоскость проходит через некоторую точку с координатами  $(X_0, Y_0)$  и отклонена от оси X на угол  $\theta$ . Тогда расстояние  $R(X, Y)$  от точки сканирования с координатами  $(X, Y)$  до оси цилиндра равно

$$R(X, Y) = \sqrt{h^2 + [(X - X_0) \sin \theta + (Y - Y_0) \cos \theta]^2},$$

а уравнение фронтального годографа будет иметь вид:

$$\left(\frac{VT}{2} + r\right)^2 = h^2 + [(X - X_0) \sin \theta + (Y - Y_0) \cos \theta]^2.$$

Эта поверхность является гиперболическим цилиндром, верхняя образующая которого соответствует образующей исходного цилиндра с наименьшим удалением от оси сканирования.

Для измерения скорости распространения сигналов и параметров цилиндра можно поступить следующим образом. Сначала по горизонтальному сечению фронтального годографа, близкому к его вершине, измерить угол  $\theta$ , а затем, выбрав сечение фронтального годографа вдоль оси X, зафиксировать временную задержку  $T_0$  вершины наблюдаемой гиперболы с координатой  $(X_0, Y_0)$ , а также временные задержки  $T_1$  и  $T_2$  для произвольно выбранных координат  $X_1$  и  $X_2$  на оси X. Введем обозначения  $R_1 = X_1 - X_0$  и  $R_2 = X_2 - X_0$ . Тогда временные интервалы  $T_0$ ,  $T_1$  и  $T_2$  и измеренные величины  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\theta$  связаны с неизвестными величинами  $V$ ,  $h$  и  $r$  уравнениями:

$$\frac{VT_0}{2} = h - r, \quad \frac{VT_1}{2} = \sqrt{h^2 + R_1^2 \sin^2 \theta} - r,$$

$$\frac{VT_2}{2} = \sqrt{h^2 + R_2^2 \sin^2 \theta} - r.$$

Решение этой системы уравнений имеет вид:

$$V = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{T_2 - T_1}} \sqrt{\frac{R_2^2}{T_2 - T_0} - \frac{R_1^2}{T_1 - T_0}},$$

$$h = \frac{\sin \theta}{2\sqrt{T_2 - T_1}} \frac{R_1^2 (T_2 - T_0)^2 - R_2^2 (T_1 - T_0)^2}{\sqrt{R_2^2 (T_1 - T_0)^2 (T_2 - T_0) - R_1^2 (T_2 - T_0)^2 (T_1 - T_0)}},$$

$$r = h - \frac{VT_0}{2}.$$

Следует отметить что величины  $V$  и  $h$  не зависят от временного интервала  $T_0$ , а зависят от разностей  $(T_1 - T_0)$  и  $(T_2 - T_0)$ . Это означает, что скорость распространения сигналов и глубина оси цилиндра однозначно определяются по форме гиперболы независимо от положения этой гиперболы на временной оси.

Особый интерес представляет случай ортогонального расположения цилиндра к линии сканирования, когда  $\sin \theta = 1$ , поскольку, во-первых, в этом случае обеспечивается наилучшая точность измерения параметров, а во-вторых, в интерактивном режиме программными средствами всегда можно обеспечить наблюдение сечения фронтального годографа, ортогонального оси цилиндра. При этом методика измерений будет одинаковой для любой ориентации цилиндра. Соответствующие расчетные формулы будут иметь вид

$$V = \frac{2}{\sqrt{T_2 - T_1}} \sqrt{\frac{R_2^2}{T_2 - T_0} - \frac{R_1^2}{T_1 - T_0}}, \quad (1)$$

$$h = \frac{1}{2\sqrt{T_2 - T_1}} \frac{R_1^2 (T_2 - T_0)^2 - R_2^2 (T_1 - T_0)^2}{\sqrt{R_2^2 (T_1 - T_0)^2 (T_2 - T_0) - R_1^2 (T_2 - T_0)^2 (T_1 - T_0)}}. \quad (2)$$

Поскольку до настоящего времени нет программных средств, обеспечивающих автоматическое формирование фронтального годографа с достаточно высокой точностью аппроксимации наблюдаемых данных, целесообразно в интерактивном режиме совместить процедуру формирования фронтального годографа с измерительной процедурой определения параметров цилиндра. Для этого доста-

точно в пространстве сигналов выбрать вертикальное сечение, ортогональное оси цилиндра, и на этом сечении графическими средствами подобрать гиперболу фронтального годографа с наилучшей аппроксимацией наблюдаемых данных. Аналогичная процедура давно используется в РЛПЗ для измерения скорости распространения сигналов по отражениям от малоразмерных объектов. Выбор вида аппроксимирующей гиперболы можно организовать программными средствами путем подбора искомого параметров  $V$ ,  $h$  и  $r$ . Пример реализации такой методики измерений на базе программного обеспечения РЛПЗ «Дефектоскоп» приведен на рис. 1.

На рис. 1 а показаны исходные данные полученных при регистрации отражений от трех горизонтальных цилиндров разного диаметра, оси которых параллельны и повернуты на  $60^\circ$  относительно оси X, а на рис. 1 б — результаты обработки этих данных. На каждом из рисунков представлены управляющая панель диалогового окна и четыре информационных фрагмента, три из которых имеют серый фон и отображают ортогональные сечения пространства сигналов. Нижний левый фрагмент представляет горизонтальный разрез, уровень которого показан на верхних фрагментах нижней горизонтальной чертой. На горизонтальном разрезе показано положение вертикальных сечений, причем черной линией показано положение разреза, отображенного на левом верхнем фрагменте, а белой линией — положение разреза, отображенного на правом верхнем фрагменте. На рис. 1 б на правом разрезе черной гиперболой представлены результаты подбора фронтального годографа, по которому выполнено оценивание параметров выделенного цилиндра. На левом разрезе рис. 1 б проведено оценивание длины цилиндра с учетом выделенных границ отражений и угла ориентации цилиндра. Результаты оценивания приведены внизу в строке состояния. Четвертый правый нижний фрагмент, имеющий черный фон, показывает результаты проецирования данных всего пространства сигналов, превысивших установленный оператором порог. Этот фрагмент позволяет ориентироваться в расположении всех объектов, обнаруженных в пространстве зондирования, и выполнять выбор объектов для оценивания его параметров. На рис. 1 б определение параметров проводилось для левого крайнего цилиндра.

Теперь рассмотрим методику измерения параметров наклонных цилиндров. На рис. 2 показан цилиндр с радиусом  $r$ , ось которого имеет угол наклона по отношению к плоскости сканирования XY, равный  $\varphi$ . Проекция оси цилиндра на плоскость сканирования повернута относительно оси X на угол  $\theta$ . Для упрощения дальнейшего анализа выполним параллельный перенос осей X и Y, поместив начало координат в произвольную точку  $0$ , принадлежащую проекции оси цилиндра на плоскость сканирования. На рис. 2 такой перенос уже выполнен. Продолжение оси цилиндра пересекается с плоскостью сканирования в точке, координаты которой обозначим  $(CX, CY)$ .

Выбранная точка  $0$  удалена от оси цилиндра на некоторое расстояние  $h_0$ , которое равно длине перпендикуляра, опущенного из этой точки на ось цилиндра. Будем считать этот перпендикуляр вектором  $h = \{X_0, Y_0, Z_0\}$ , где  $(X_0, Y_0, Z_0)$  — декартовы координаты основания перпендикуляра, которые равны:

$$X_0 = -h_0 \sin \varphi \cos \theta, \quad Y_0 = -h_0 \sin \varphi \sin \theta, \quad Z_0 = h_0 \sin \varphi \cos \theta.$$

Введем единичный вектор  $\vec{e}_c = \{l_0, m_0, n_0\}$ , направленный из основания рассматриваемого перпендикуляра по оси цилиндра в сторону увеличения глубины. Координаты этого вектора равны:

$$l_0 = \cos \varphi \cos \theta, m_0 = \cos \varphi \sin \theta, n_0 = \sin \varphi.$$

Тогда расстояние  $p(X, Y)$  от произвольной точки  $(X, Y)$  плоскости сканирования до оси цилиндра равно:

$$p(X, Y) = \frac{\left| \left[ \vec{q} - \vec{h}, \vec{e}_c \right] \right|}{\left| \vec{e}_c \right|},$$

где  $\vec{q} = \{X, Y, 0\}$  — радиус-вектор точки  $(X, Y)$ ;  $[\vec{q} - \vec{h}, \vec{e}_c]$  — векторное произведение векторов  $\vec{q} - \vec{h} = \{X - X_0, Y - Y_0, -Z_0\}$  и  $\vec{e}_c$ ; а знак модуля обозначает длину соответствующих векторов, т.е.  $|\vec{h}| = h_0$ .

Отсюда

$$p^2(X, Y) = [(Y - Y_0)n_0 + m_0z_0]^2 + [(X - X_0)n_0 + l_0z_0]^2 + [(X - X_0)m_0 - (Y - Y_0)l_0]^2.$$

Подставив соответствующие координаты и проведя упрощения, получим

$$p^2(X, Y) = (X \sin \varphi + h_0 \cos \theta)^2 + (Y \sin \varphi + h_0 \sin \theta)^2 + \cos^2 \varphi (X \sin \theta - Y \cos \theta)^2.$$

Предположим, что диаметр цилиндра меньше разрешающей способности РЛПЗ. Такие цилиндры мы будем называть «тонкими», поскольку расстояния до их отражающей поверхности можно считать равными расстоянию до их осей. Из полученного равенства следует, что наблюдаемые оператором в пространстве сигналов фронты отражений от «тонкого» цилиндра в сечении, параллельном плоскости сканирования и соответствующем определенной временной задержке при двойном прохождении расстояния, равного величине  $H$ , удовлетворяют уравнению

$$H^2 = (X \sin \varphi + h_0 \cos \theta)^2 + (Y \sin \varphi + h_0 \sin \theta)^2 + \cos^2 \varphi (X \sin \theta - Y \cos \theta)^2.$$

Это уравнение описывает кривую второго порядка на плоскости  $XY$ . Вид кривой в общем случае определяется значениями инвариантов (Корн Г., Корн Т., 1978). Вычислив инварианты для нашей квадратичной формы, получим:

$$I = 1 + \sin^2 \varphi, D = \sin^2 \varphi, A = -H \sin^2 \varphi.$$

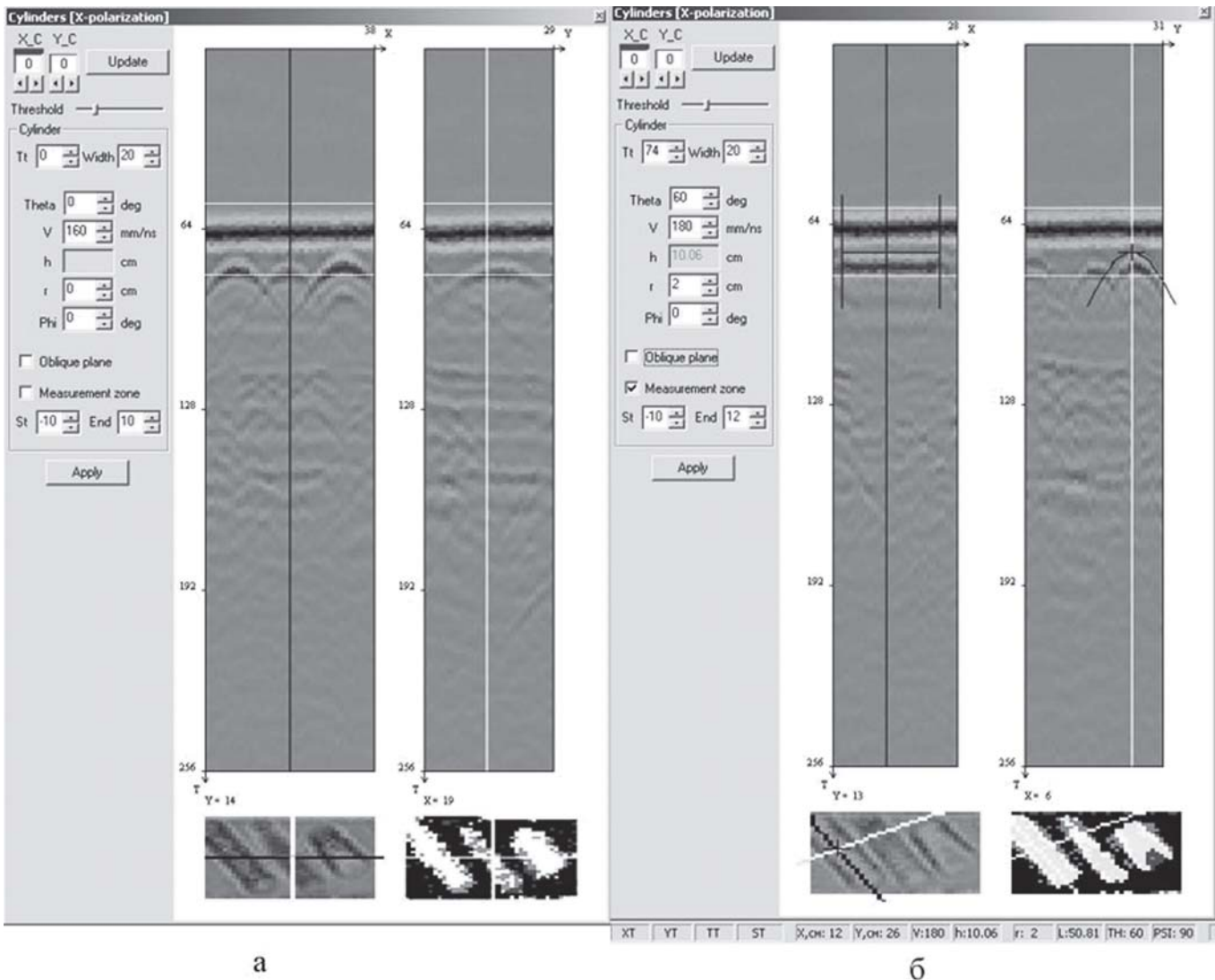


Рис. 1. Использование ортогональных сечений пространства сигналов для измерения скорости распространения сигналов и параметров горизонтальных цилиндров: а — исходные данные, б — результаты обработки

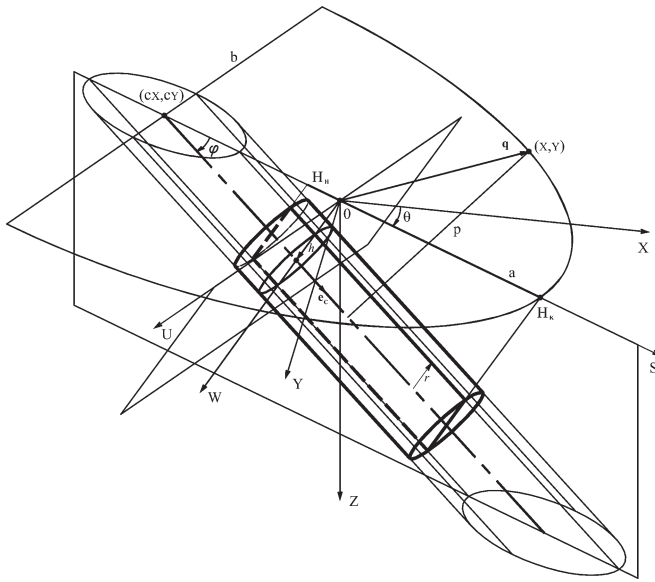


Рис. 2. Геометрия пространства объектов при наблюдении отраженных сигналов наклонного цилиндра в процессе сканирования на плоскости XOY

Отсюда следует, что горизонтальные сечения фронтального годографа сигналов, отраженных от рассматриваемого цилиндра, представляют собой участки эллипсов, параметры которых можно определить из рассматриваемой квадратичной формы. Координаты центров эллипсов во всех сечениях одинаковы (CX, CY) и равны:

$$CX = -h_0 \cos \theta / \sin \varphi, \quad CY = -h_0 \sin \theta / \sin \varphi.$$

Большая и малая полуоси эллипса равны:  $a = H / \sin \varphi$ ,  $b = H$ , а угол отклонения большой оси эллипса от направления оси X равен  $\theta$ .

Отметим интересные особенности полученных результатов. Горизонтальное сечение фронтального годографа сигналов, отраженных от «тонкого» длинного цилиндра настолько информативно, что по одному такому сечению можно дать исчерпывающую информацию о геометрическом положении цилиндра, не зная даже скорости распространения сигналов в окружающей среде. Направление большой оси характеризует угол  $\theta$  ориентации вертикальной плоскости, в которой расположен цилиндр. Малая полуось  $b$  равна расстоянию от точек горизонтального сечения фронтального годографа до оси цилиндра. Большая полуось характеризует угол  $\varphi$  отклонения оси цилиндра от горизонтальной плоскости, поскольку  $\sin \varphi = b/a$ . А координаты центра эллипса указывают на точку возможного выхода наблюдаемого цилиндра на плоскость сканирования при его достаточной протяженности в этом направлении. Наконец, сам фронтальный годограф представляет собой часть эллиптического конуса, доступную для наблюдения.

Приведенные свойства легко понять из простых геометрических представлений. Геометрическим местом точек, равноудаленных от прямой, является круговой цилиндр, а сечение такого цилиндра плоскостью, по отношению к которой ось цилиндра наклонена под углом  $\varphi$ , является эллипс, обладающий описанными свойствами, если радиус такого цилиндра равен  $H$ . Анализируемый на рис. 2 эллипс является сечением именно такого виртуального цилиндра.

Теперь вернемся к ситуации, когда цилиндр нельзя считать «тонким», т.е. радиус его поперечного сечения  $r$  больше, чем разрешающая способность РЛПЗ. Из геометрии процедуры регистрации данных (см. рис.2) очевидно, что фронтальные годографы «тонкого» цилиндра и цилиндра произвольного радиуса  $r$  имеют одинаковую форму, но отличаются на постоянную временную задержку, равную распространению сигналов на расстояние двойного радиуса цилиндра. Если произвести нормировку пространства сигналов, как это выполнено в [1], по формуле  $W = VT/2$ , где  $T$  — временные задержки в пространстве сигналов,  $V$  — скорость распространения сигналов в среде,  $W$  — глубинные измерения в нормированном пространстве сигналов, то отображаемые на глубине  $W_{RH} = H - r$  горизонтальные сечения фронтальных годографов будут иметь форму эллипсов, полуоси которых определяются прежними равенствами  $a = H / \sin \varphi$  и  $b = H$ , где  $H$  — расстояние от точек сечения фронтального годографа до оси цилиндра.

На практике удается наблюдать только часть анализируемого эллипса, поскольку ограниченная ширина диаграммы направленности антенн РЛПЗ и конечная длина цилиндров сужают область возможного выделения фронтального годографа. Однако если область сканирования расположена над некоторым участком наклонного цилиндра, то участок окончания большой полуоси эллипса всегда можно видеть в зоне наблюдаемых отражений, поскольку они соответствуют положениям антенн над осью цилиндра.

Следует отметить, что сечения фронтальных годографов горизонтального и наклонного цилиндров при перемещении антенны ортогонально оси цилиндра одинаковы по форме (все те же гиперболы). Поэтому неизвестные параметры могут быть рассчитаны по формулам (1)-(2). Отличие состоит только в том, что для горизонтального цилиндра величина  $h$  в равенстве (2) постоянна и равна глубине расположения оси цилиндра, а для наклонного цилиндра эта величина равна удалению от оси цилиндра прямой, ортогональной оси цилиндра и увеличивается при удалении этой прямой от точки (CX, CY).

На основе проведенного анализа предлагается следующая интерактивная методика измерения скорости и параметров наклонных цилиндров.

Сначала в пространстве сигналов строятся измерительные оси: ось OS, являющаяся проекцией оси цилиндра на плоскость сканирования и направленная в сторону увеличения глубины цилиндра, ось OU, расположенная в плоскости сканирования перпендикулярно оси OS, и ось OW, являющаяся продолжением перпендикуляра, опущенного из точки O на ось цилиндра. В пространстве сигналов ось OW отображается в ось OT, т.к. в ее направлении измеряются временные задержки первых отражений от поверхности цилиндра. По отклонению оси OS от оси OX измеряется угол  $\theta$ .

Затем в сечении UOW по методике, описанной для горизонтальных цилиндров, методом подбора аппроксимирующей гиперболы определяются скорость  $V$  и параметры цилиндра  $r$  и  $h$ .

На последнем этапе в сечении пространства сигналов SOT строится отрезок прямой, аппроксимирующий фронтальный годограф по наблюдаемому данным. Наклон этого отрезка характеризует величину угла  $\varphi$ . Если обозначить временные задержки в точках начала  $H_n$  и конца  $H_k$  аппроксимирующего отрезка через  $T_n$  и  $T_k$  соответственно,

а расстояние между этими точками через  $D$ , то величина угла  $\varphi$  определяется по формуле:

При этом длина самого цилиндра  $L$  равна  $L = D \cos \varphi$ . Пример реализации представленных алгоритмов на базе программного обеспечения РЛПЗ «Дефектоскоп» приведен на рис. 3. На рис. 3 а показаны исходные данные, полученные при регистрации отражений от трех наклонных цилиндров разного диаметра, оси которых повернуты на  $60^\circ$  относительно оси  $X$  и имеют наклон  $30^\circ$  относительно плоскости сканирования, а на рис. 3 б — результаты обработки этих данных. Назначение фрагментов рисунков такое же, как и на рис. 1. Следует обратить внимание, что на горизонтальном разрезе рис. 3 а видны характерные фрагменты эллипсов, свойства которых были рассмотрены ранее.

Рис. 3 б отображает результаты выбора оператором параметров аппроксимации фронтального годографа, установленных в управляющих окнах. Для обеспечения большей точности подбора параметров цилиндра левый нижний фрагмент рис. 3 б показывает теперь не гори-

зонтальный разрез, а разрез пространства сигналов вдоль наклонной прямой, отрезок которой выбирается при построении фронтального годографа в расположенном выше фрагменте. Это позволяет более четко зафиксировать верхнюю образующую поверхности цилиндра.

Результаты оценивания приведены внизу в строке состояния. Параметры  $X$  и  $Y$  показывают координаты точки пересечения измерительных сечений с плоскостью сканирования, а параметр «PSI» — направление перпендикуляра к оси цилиндра, т.е.  $PSI = \pi/2 - \varphi$ .

Существует еще одно применение предложенной методики. Полученные результаты могут использоваться для определения диэлектрической проницаемости цилиндров. Дело в том, что в зондируемых средах встречаются цилиндрические пустоты, пластиковые трубы, заполненные водой, цилиндрические пластмассовые элементы и т.п. В этих случаях кроме отражений от верхней части цилиндра наблюдаются сигналы, отраженные от нижней его части. По верхним отражениям с использованием предложенной методики можно определить скорость распространения, а значит и диэлектрическую проницаемость среды, а по нижним отражениям — отношение диэлектрической проницаемости цилиндра к проницаемости среды.

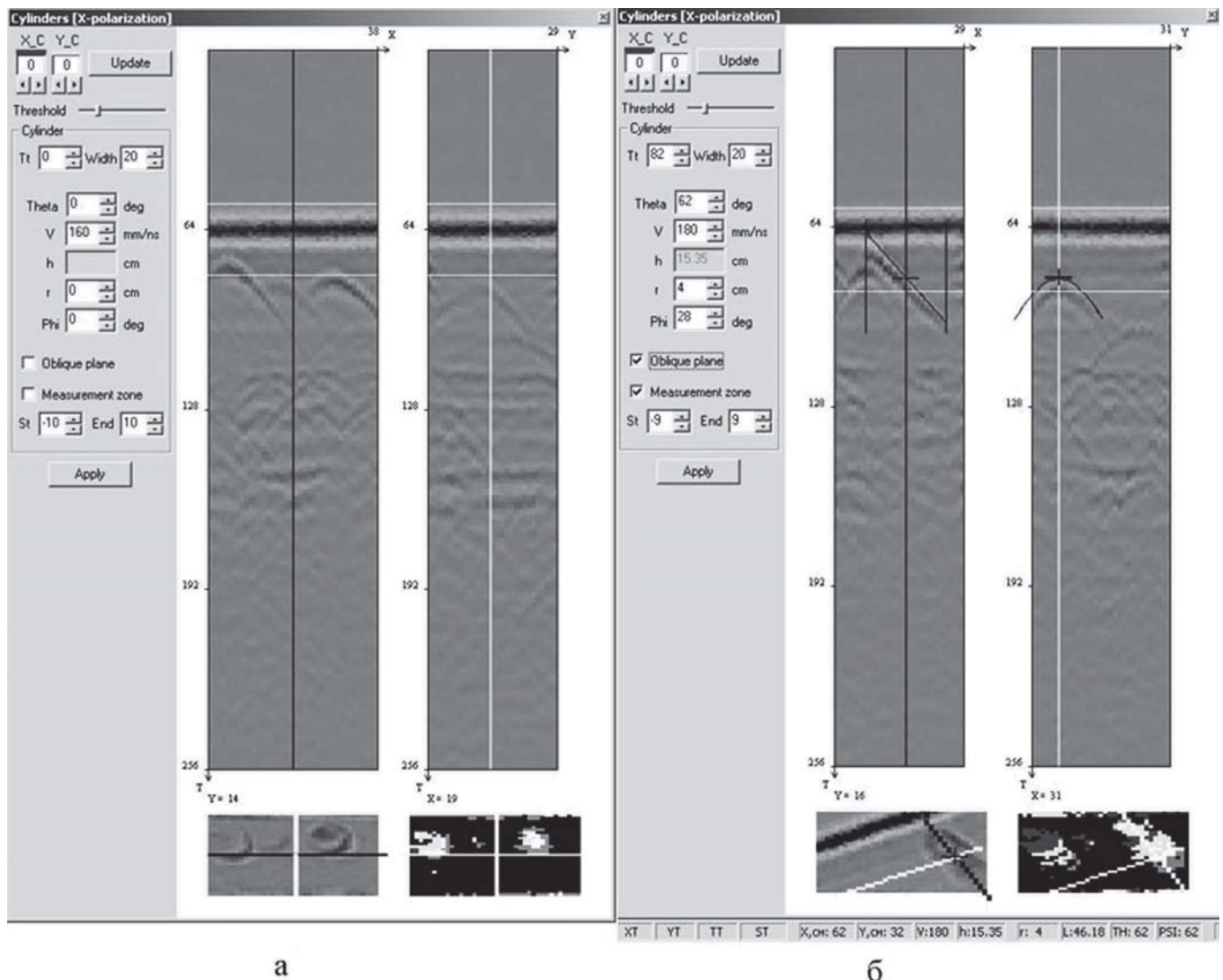


Рис. 3. Использование ортогональных сечений пространства сигналов для измерения скорости распространения сигналов и параметров наклонных цилиндров: а — исходные данные, б — результаты обработки

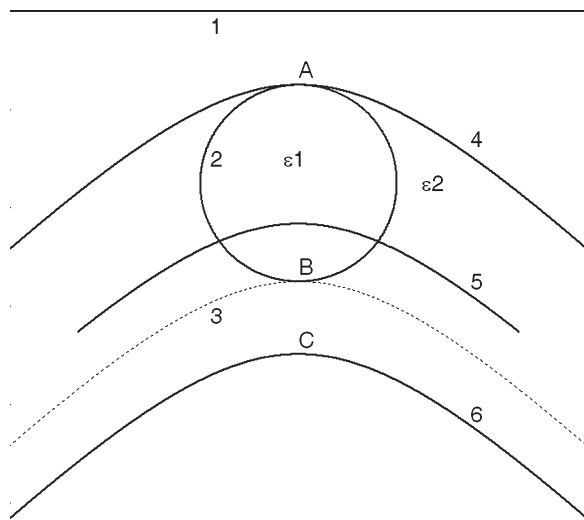


Рис. 4. Фронтальные годографы диэлектрического цилиндра

На рис. 4 показаны характерные фронтальные годографы для рассматриваемого случая. Прямая 1 представляет выбранную в процессе измерений ось  $U$ , окружность 2 — ортогональное сечение диэлектрического цилиндра, гипербола 4 — фронтальный годограф верхних отражений, гипербола 5 — фронтальный годограф нижних отражений цилиндра, имеющего диэлектрическую проницаемость меньше, чем окружающая среда, гипербола 6 — фронтальный годограф нижних отражений цилиндра, имеющего диэлектрическую проводимость больше, чем у окружающей среды. Пунктирная линия 3 соответствует фронтальному годографу нижних отражений для цилиндра, имеющего диэлектрическую проницаемость, совпадающую с окружающей средой. Этот годограф обычно не наблюдается, но его верхняя точка В может быть вычислена как окончание вертикального диаметра цилиндра, радиус которого рассчитывается по описанной методике. Отношение расстояния между вершинами годографов верхних и нижних отражений (например, отрезок  $AC$ ) к диаметру цилиндра  $AB$  равно отношению скорости распространения сигналов в среде, обратно пропорциональной величине  $\sqrt{\varepsilon_2}$  (где  $\varepsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость среды), к скорости распространения сигналов по диаметру анализируемого цилиндра, обратно пропорциональной  $\sqrt{\varepsilon_1}$  (где  $\varepsilon_1$  — диэлектрическая проницаемость цилиндра).

Обозначив это отношение через  $D = \frac{AC}{AB} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}}$ , получим формулу определения диэлектрической проницаемости цилиндра в виде  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \cdot D^2$ .

Результаты, полученные при решении поставленной задачи (скорость распространения сигналов, диэлектрическая проницаемость цилиндра, его радиус и пространственная ориентация), могут быть использованы как для непосредственной интерпретации наблюдаемых объектов, так и для формирования в пространстве интерпретации отражающих поверхностей объектов, обнаруженных в зоне сканирования, по методике [1]. Однако выводимые в строку состояния параметры часто более информативны, чем отображаемые в пространстве интерпретации отражающие поверхности объектов, поскольку они дают более точные представления об объекте, чем простое отображение этих поверхностей.

Подводя итоги, отметим, что представленная методика измерения скорости распространения сигналов и параметров цилиндра состоит из простых геометрических преобразований и стандартных методов аппроксимации. Поэтому она вполне может быть реализована в автоматическом режиме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Юфряков Б.А., Суриков Б.С., Сосулин Ю.Г., Линников О.Н. Метод интерпретации данных радиолокаторов подповерхностного зондирования // Радиотехника и электроника. — 2004. — Т. 49, № 12. — С. 1436–1451.
2. Юфряков Б.А., Суриков Б.С., Линников О.Н. Применение фронтальных годографов при интерпретации данных радиолокаторов подповерхностного зондирования // Разведка и охрана недр. — 2004. — № 12. — С. 20–24.
3. S. Shihab, W. Al-Nuaimy and A. Eriksen. Radius Estimation For Subsurface Cylindrical Objects Detected By Ground Penetrating Radar / Tenth Intern. Conference on Ground Penetrating Radar, June 21–24, 2004. — Delft, The Netherlands. — P. 319–322.
4. W. Al-Nuaimy, S. Shihab and A. Eriksen. Data Fusion For Accurate Characterisation of Buried Cylindrical Objects Using GPR / Tenth Intern. Conference on Ground Penetrating Radar, June 21–24, 2004. — Delft, The Netherlands. — P. 359–362.

© Владов М.Л., Старовойтов А.В., Калашников А.Ю., 2005

Владов М.Л., Старовойтов А.В., Калашников А.Ю. (МГУ)

#### НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ

В процессе интенсивной эксплуатации железнодорожных насыпей под действием динамических нагрузок на некоторых участках происходит деформация рельсового пути, которая обусловлена изменением прочностных характеристик отложений основных конструктивных слоев балластной призмы. Для оперативного выявления причин деформаций на таких участках, разработке методов по их устранению и поиска мест с возможным развитием подобных нарушений в будущем в последние годы эффективно используется метод георадиолокационного профилирования. Он позволяет с большой детальностью (от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч точек физ. наблюдений на 1 км профиля) проводить обследование верхней части насыпи, ее склонов и основания. Эффективное использование георадиолокации обусловлено главным образом тем, что верхняя часть насыпей сложена, как правило, сухими песчано-гравийными материалами, которые по своим электрофизическим характеристикам крайне благоприятны для применения данного метода. С помощью метода георадиолокации решаются следующие задачи:

1. Определение толщины основных слоев балластной призмы;
2. Изучение характера границ между слоями, что может указывать на процессы перемешивания гравийного и песчаного материала;
3. Определение рельефа кровли основной площадки, форма которой может указывать на наличие таких структур, как балластные корыта, мешки и т.д.;
4. Выявление мест скопления грязевых гнезд или линз в толще балластной призмы, приводящих к развитию выплесков;
5. Поиск мест локального переувлажнения, которое при динамических нагрузках способствует нарушению внут-

ренной структуры несвязных грунтов, из которых сложена верхняя часть насыпей;

6. Определение мощности балластных шлейфов на откосах и т.д. [3–5].

Особое значение георадиолокационные исследования имеют при обследовании высоких насыпей как наиболее потенциально опасных с точки зрения развития в них разнообразных нарушений, учитывая также то, что большая их часть была построена более 100 лет назад и не была рассчитана на современную интенсивность движения и вес поездов.

В настоящем сообщении рассматриваются некоторые примеры георадиолокационных наблюдений на трех участках. На первом и втором участках исследования проводились на высокой и низкой насыпи, на третьем — в выемке. В обоих случаях применялся георадар «Зонд 12с» с экранированной антенной 300 МГц производства «Radars Systems, Inc» (г. Рига, Латвия). Обработка данных велась с помощью программного обеспечения «RadExPro Plus» ООО «ДЕКО-Геофизика». Для геологической привязки выделенных слоев привлекались данные бурения, проведенного ранее, и проектная документация.

На первом из обследованных участков высота насыпи увеличивается от 3 до 18 м. На протяжении длительного периода времени на одном из высоких участков насыпи протяженностью 20–25 м происходили значительные деформации рельсового пути. Никаких признаков нарушений строения на склонах насыпи не наблюдалось. Целью георадиолокационных исследований было выяснение причин деформаций и выделение зон возможных нарушений на изученном отрезке пути. По верхней части насыпи было выполнено 4 профиля — по левой и правой обочинам и два профиля по межпутью (рис. 1). Один профиль был сделан вдоль основания высокого участка насыпи с целью изучения кровли известняков, так как одной из гипотез происхождения деформаций являлось возможное развитие здесь карста (сильно выветрелые карбонаты с прослоями песчаников были вскрыты на незначительной глубине на склоне долины, которую пересекает насыпь). Интерпретация этого профиля показала, что аномальных участков вдоль основания насыпи нет.

Анализ полученных данных по верху насыпи выявил существенные различия в типах волновой картины по всем профилям, хотя максимальные расстояния между ними не

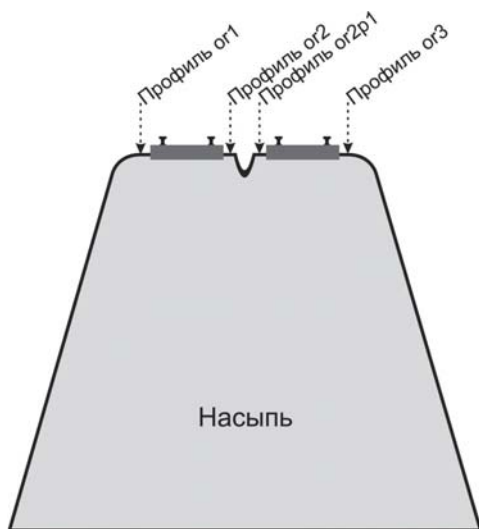


Рис. 1. Положение георадиолокационных профилей на высокой насыпи

превышают 2,5 м. На всех радарограммах по комплексу динамических и кинематических признаков (конфигурация осей синфазности отраженных электромагнитных волн, амплитуда и частотный состав записи, протяженность осей синфазности) было выделено 4 георадарных комплекса. Самый нижний комплекс (4) при сопоставлении с данными бурения был идентифицирован нами со слоем тугопластичных суглинков. По данным георадиолокации выделяется только их кровля, более глубокие границы из-за сильного поглощения в суглинках электромагнитных волн не выделяются (рис. 2, 3). При пересчете из временного в глубинный масштаб использовалась средняя скорость распространения электромагнитных волн 14 см/нс, характерная для сухих песчано-гравийных смесей.

Георадарные комплексы 2 и 3 по типу волновой картины существенно отличаются от комплекса 4. В них отчетливо прослеживаются оси синфазности отраженных волн. Однако их конфигурация и амплитуда отражений различны, что и позволило разделить эту часть разреза на два отдельных комплекса — 2 и 3 (см. рис. 2, 3). По данным бурения они сложены песками различной крупности и влажности. Мощность комплекса 2 составляет в среднем 1 м, но может достигать и 1,5 м. Слой 3 характеризуется большей изменчивостью — его мощность меняется от 0,6 до 1,6 м.

Самый верхний георадарный комплекс 1 имеет временную мощность 8–14 нс и от нижележащего комплекса 2 он отличается по конфигурации осей синфазности. Комплекс 1 сложен щебнем и имеет мощность 0,5–1,0 м. На профиле ог1, пройденном по левой обочине (см. рис. 1, 2А), граница между комплексами 1 и 2 практически не выде-

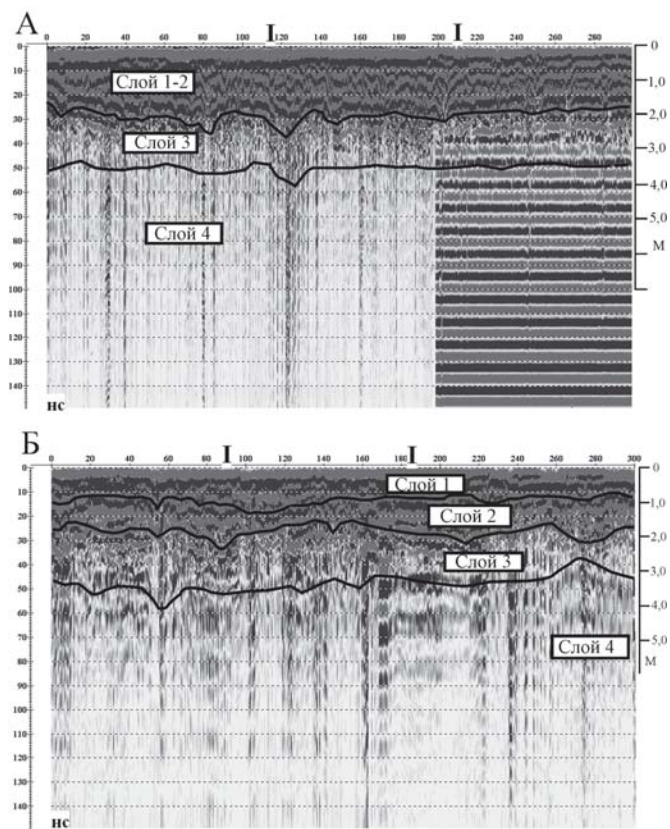


Рис. 2. Георадиолокационные профили по левой (А, профиль ог1) и правой (Б, профиль ог3) обочинам насыпи



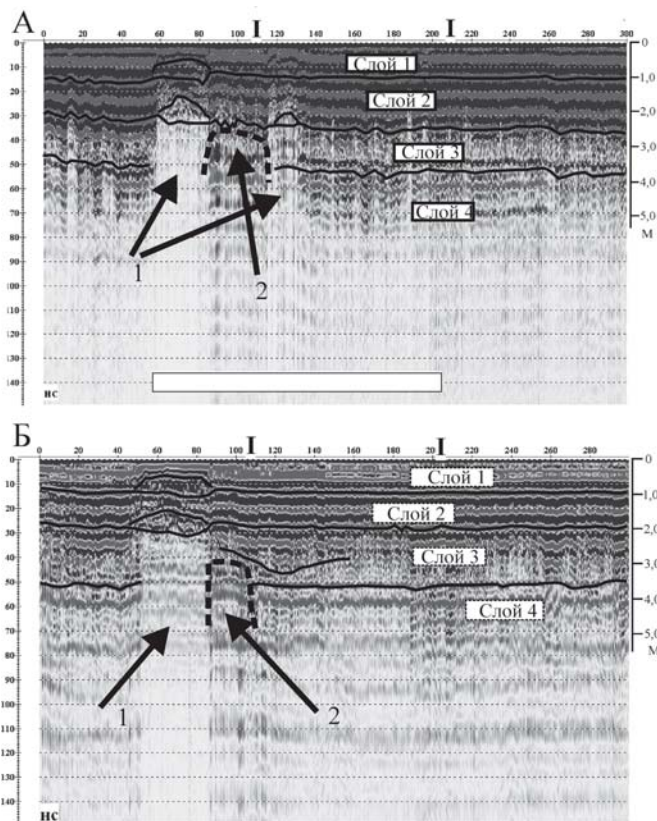


Рис. 3. Георадиолокационные профили по междупутью (положение профилей см. на рис. 1). А — профиль og2; Б — профиль og2p1; 1 — аномальные зоны первого типа; 2 — аномальные зоны второго типа

ляется, что может свидетельствовать о перемешивании в левой части насыпи слоев щебня и песка (щебень как бы «тонет» в песке).

Сравнение строения верхней части насыпи по всем четырем георадиолокационным профилям показывает, что на профиле по правой обочине (ПР og3, рис. 1, 2Б) характер отражающих границ между выделенными комплексами сильно меняется — они имеют довольно сложную форму по сравнению с другими профилями. Сопоставление с материалами, полученными на ненарушенных участках, свидетельствует о том, что границы между комплексами, имеющие здесь такую сложную форму, связаны с пологими деформациями слоев балластной призмы.

Анализ особенностей волновой картины на радарограммах по всем профилям выявил также наличие аномальных зон двух типов, которые имеют субвертикальное положение и обнаружены только на двух профилях, расположенных по междупутью (см. рис. 2, 3). Аномальные зоны первого типа характеризуются практически полным отсутствием осей синфазности в нижних частях этих зон и наличием выпуклых осей синфазности в верхних частях. Второй тип выделяется по характерной низкочастотной записи. На радарограммах эти зоны находятся рядом. Ширина аномальных зон первого типа меняется в пределах 20–25 м, второго типа — от 20 до 30 м (см. рис. 3). Участок с деформациями рельсового пути находится на стыке этих зон. Необходимо отметить также отличие в волновой картине на профилях, расположенных по междупутью (расстояние между ними не превышает 2 м) — на одном профиле имеются 2 аномальные зоны первого типа, а на втором — 1 зона. Таким образом, георадарные профили, располо-

женные на участке с деформацией железнодорожного полотна характеризуется резкой изменчивостью в плане волновой картины по сравнению с участками, где деформаций не наблюдается. Появление низкочастотной записи, как было неоднократно установлено нами при проведении георадиолокационных исследований на других объектах [1], свидетельствует о значительном увлажнении грунтов на этих участках. Отсутствие осей синфазности в аномальных зонах первого типа и их выгибание вверх над ними свидетельствует, по нашему мнению, о нарушении внутренней структуры в переувлажненных конструктивных слоях верхней части насыпи (включая суглинки) вследствие воздействия на них динамических нагрузок [2]. Результатом этого и явилось образование участков проседания и сопряженных с ними участков вспучивания в центральной части насыпи, что и явилось причиной деформаций рельсового пути. Необходимо еще раз подчеркнуть, что на склонах насыпи никаких видимых нарушений обнаружено не было.

На втором участке исследований, где высота насыпи не превышала 3–4 м и видимых деформаций пути не наблюдалось, продольные георадиолокационные профили не показали каких-либо нарушений в структуре слоев насыпи, отмечается только повышенная увлажненность грунтов. Однако на поперечном георадарном профиле в кровле суглинков отчетливо выделяются две отрицательные структуры: одна находится непосредственно под рельсовым путем (формируется балластное корыто), вторая — на левом склоне насыпи (рис. 4). Балластное корыто имеет симметричную форму и глубину около 30 см.

Очевидно, что данный участок насыпи является потенциально опасным, так как при отсутствии пути оттока воды из данного балластного корыта и из отрицательной структуры на ее склоне здесь, несмотря на относительно

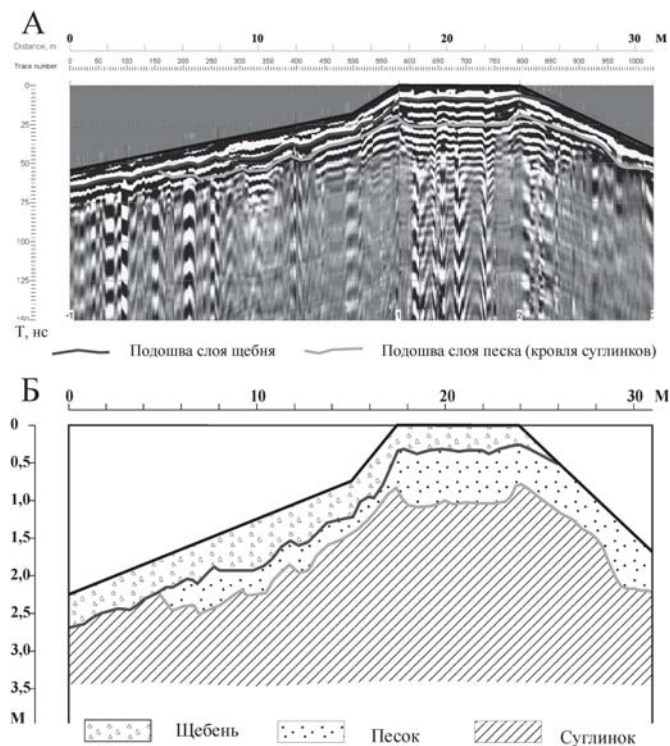


Рис. 4. Поперечный георадиолокационный профиль через насыпь и его интерпретация. А — георадиолокационный профиль с введенным рельефом; Б — глубинный разрез

небольшую высоту насыпи, также могут развиваться деформации, аналогичные вышеописанным.

Третий изученный участок насыпи протяженностью несколько сотен метров, в отличие от рассмотренных выше, находится в глубокой выемке и имеет небольшие мощности слоев песка и гравия. В процессе эксплуатации здесь отмечаются значительные вертикальные колебания рельсового пути. Георадиолокационное профилирование показало отсутствие аномальных зон на всем участке, мощности конструктивных слоев балластной призмы довольно хорошо выдержаны. Вдоль насыпи имеется сильно разрушенная дренажная система. По данным георадиолокации на небольшой глубине (1,5 м) была выделена кровля сильно увлажненных грунтов. Сопоставление с геологическими данными, полученными значительно ранее, по которым кровля увлажненных пород находилась на глубине около 2 м, показало, что за последние несколько лет произошел подъем уровня грунтовых вод и началось подтопление данного участка, что, по-видимому, и является основной причиной вертикальных колебаний рельсового пути.

Рассмотренные примеры, с одной стороны, показывают возможность решения задач, перечисленных выше, георадиолокационным методом, а с другой стороны, свидетельствуют об эффективности его использования в ситуациях, когда отсутствуют внешние признаки нарушений, по которым однозначно можно было бы определить причину деформаций как самой насыпи, так и рельсового пути (даже если деформации уже видны, как это имело место на первом из рассмотренных участков). К таким внешним признакам относятся, например, выплески и оползание на склонах насыпей и т.д. Георадиолокационное профилирование позволяет с большой детальностью получать необходимую информацию о генезисе нарушений и дает возможность определять действительные размеры в плане опасных участков, прогнозировать развитие ситуации, вырабатывать комплекс мер по их предотвращению и проводить мониторинг опасных участков. При геологической интерпретации материалов, проанализированных в данной работе, использовались данные бурения, проведенного до георадиолокационных наблюдений. Очевидно, что заверка данных георадиолокации бурением с определением физико-механических свойств грунтов позволит существенно повысить достоверность интерпретации.

Георадарное профилирование на всех рассмотренных участках проводилось в режиме пешеходной съемки (частота посылки у данного радара 14 сканирований в секунду, т.е. плотность наблюдений составляла около 20 точек на 1 м профиля). Минимальная ширина зон деформаций, аналогичных вышеописанным, но которые в настоящее время пока никак не выражены на поверхности насыпи, составляет первые метры (рис. 3 А, пк 0 — 40 м). Чтобы выделить структуры подобного размера при георадиолокационных исследованиях железнодорожного полотна с движущейся тележки или специального вагона, необходимо значительно увеличить частоту сканирований. При работах на скорости, например, 50 км/ч она должна составлять не менее 300 сканирований в секунду. Однако вопрос об идентичности волновой картины, получаемой при медленном протаскивании антенны и при работах на большой скорости, даже если расстояние между сканами будет одинаковым, требует специальной проработки. Методически этот вопрос представляется крайне важным, так как от его решения зависит выбор скорости движения по профилям, т.е. опреде-

ление горизонтальной разрешающей способности этого метода при различных методиках наблюдений.

Георадарные исследования на первом участке (на высокой насыпи) показали также существенные изменения волновой картины (т.е. изменения геологической ситуации) на продольных профилях, расположенных на расстоянии около 2 м, что доказывает необходимость расположения профилей как по обочинам насыпи, так и по межпутью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. — М.: МГУ, 2005.
2. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках. — М.: МГУ, 1997.
3. Технические указания по инструментальной диагностике земляного полотна. — М.: МПС РФ, 2000.
4. Цыганок В.С. Применение метода георадиолокации и электроконтактного динамического зондирования при обследовании земляного полотна и искусственных сооружений на латвийской железной дороге. / Тез. докл. на 4-й междунар. н.-пр. конф. «Георадар-2004». — М.: МГУ. — С. 47–48.
5. Явна В.А., Грицык В.И., Ковдус В.В. и др. Георадиолокационные обследования объектов железнодорожного пути. / Там же — С. 83–84.

© Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В., 2005

Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. (ООО «ЛОГИС»)

#### РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРА ГЕОРАДАРНЫХ ЗАДАЧ КАК СЛЕДСТВИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АППАРАТНОЙ БАЗЫ

Глубина зондирования и разрешающая способность с практической точки зрения являются важными параметрами, определяющими спектр задач, решаемых с помощью георадаров. В общем случае глубина зондирования зависит от удельного электрического сопротивления среды и потенциала георадара.

Общеизвестно, что с уменьшением частоты зондирования уменьшается удельное затухание электромагнитной волны в среде и, как следствие, увеличивается глубина зондирования. Например, для сухого песка удельное затухание на частоте 10 МГц составляет  $\approx 0,2$  дБ/м, а на частоте 1000 МГц  $\approx 8$  дБ/м. Таким образом, уменьшение рабочей частоты георадара — один из путей увеличения глубины зондирования.

Вторым важным фактором, влияющим на глубину зондирования, является энергетический потенциал, т.е. отношение напряжения передатчика к чувствительности приемника. Очевидно, что чем больше амплитуда импульса передатчика и чем выше чувствительность приемника, тем большую глубину зондирования можно получить. Но здесь есть несколько технических проблем.

В передатчиках низкочастотных антенных блоков георадаров «Око» используются наборы лавинных транзисторов, обеспечивающих суммарную выходную амплитуду импульса передатчика  $\approx 600\div 700$  В при частоте повторения импульсов до 100 кГц. При этом возможность дальнейшего увеличения амплитуды транзисторных передатчиков за счет наращивания числа транзисторов практически исчерпана. Генераторы на основе вакуумных разрядников способны формировать импульсы до 3÷5 кВ, но при этом снижается частота повторения примерно на 3 порядка.

Формирователи импульсов на основе диодных обострителей также позволяют увеличить амплитуду импульсов возбуждения в несколько раз, однако при этом значительно растет мощность потребления и практически на порядок снижается допустимая частота работы передатчика по сравнению с транзисторными схемами.

Таким образом, увеличение амплитуды импульсов возбуждения передатчика выше 1000 В приводит к существенному снижению скорости зондирования. Кроме того, могут возникнуть серьезные вопросы с электромагнитной совместимостью и безопасностью оператора.

Увеличивать чувствительность приемного устройства можно за счет увеличения коэффициента усиления приемного устройства, но и здесь есть свои ограничения. Уровень шумов приемного тракта (включая антенну) всех современных георадаров в основном определяется уровнем внешних помех от наземных радиоустройств, так что повышение чувствительности входного усилителя приемника не дает положительного эффекта.

Существует другой метод повышения чувствительности — за счет когерентного накопления. Исходя из предположения о случайном характере эфирных помех, выигрыш в отношении сигнал/шум равен  $\sqrt{N}$ , где  $N$  — величина накопления. Таким образом, при отсутствии мешающих собственных системных помех глубинность георадаров можно существенно наращивать за счет накопления. Поэтому механизм когерентного накопления рассматривается в качестве основного перспективного фактора повышения глубинности георадаров. Это иллюстрируется на рис. 1, где представлены две радарограммы, снятые при помощи георадара «ОКО» с АБ-700 по одному и тому же профилю с различными накоплениями (слева — 1, справа — 80).

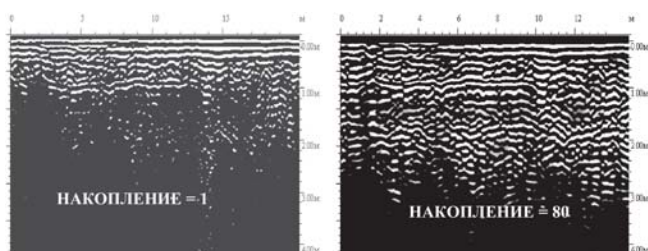


Рис. 1.

Однако метод когерентного накопления имеет существенный недостаток: в  $N$  раз снижается скорость зондирования. Классический для георадаров метод стробоскопического преобразования позволяет получить только один временной отсчет на один цикл излучения передатчика, что приводит к значительным потерям времени при наборе трассы. К этому прибавляется уменьшение скорости в  $N$  раз за счет накопления плюс потери времени на пересылку и обработку данных. В итоге даже при работе передатчика на частоте 100 кГц при накоплении  $N=1$  реальная скорость зондирования получается примерно 30...50 трасс в секунду. При накоплении  $N=10$  скорость зондирования снижается до 3...5 трасс в секунду, что уже мало для нормальной работы.

В низкочастотных антенных блоках георадаров «ОКО» последних модификаций для значительного увеличения величины накопления реализован «многоточечный» режим, который позволяет на один импульс излучения передатчика получать несколько временных отсчетов. В настоящее время на один излученный импульс производится

оцифровка по восьми временным стробам с 14-разрядным разрешением. Одновременно с учетом существенного увеличения скорости обмена данными между антенным блоком и ноутбуком удалось на порядок повысить уровень синхронного накопления сигналов. В итоге реальная скорость зондирования получается примерно 130...150 трасс в секунду. В дальнейшем скорость оцифровки будет наращиваться по мере появления соответствующей элементной базы. Использование в георадарах «ОКО» для накапливаемых данных 32-разрядной сетки позволяет практически без ограничения наращивать величину накопления.

Также были отработаны варианты возможного повышения глубины зондирования за счет понижения рабочих частот антенных блоков. За последний год был запущен в производство экранированный антенный блок АБ-90 с центральной частотой 90 МГц. Этот антенный блок имеет, на наш взгляд, максимально допустимые конструктивные размеры для экранированных антенн.

Дальнейшее понижение рабочих частот возможно только по линии неэкранированных дипольных антенных блоков. Традиционный дипольный вариант с размещением излучающих элементов перпендикулярно несущей раме имеет определенные ограничения при работе по пересеченной местности (кусты, деревья и т.д.). В настоящее время разработан дипольный антенный блок с полугибкой линейной конструкцией. Он имеет герметичную конструкцию и выполнен с использованием армированных сменных рукавов  $\varnothing 66$  мм с двухсторонним латексным покрытием, внутри которых расположены плоские дипольные излучатели. Приемный и передающий отсеки врезаны в разрывы рукава. Общая длина антенного блока будет изменяться в зависимости от частотного диапазона. Представляется обоснованным использовать такой антенный блок в диапазоне частот 25÷100 МГц. Конструкция данного антенного блока, получившего название «Тритон», позволяет легко маневрировать по пересеченной местности. Герметичная оболочка позволяет производить подводное зондирование при фиксированном заглублении или путем перемещения по дну водоема. Внешний вид антенного блока «Тритон» приведен на фото ниже (рис. 2).



Рис. 2.

Таким образом, для увеличения глубины зондирования в георадарах «ОКО» используются наиболее перспективные направления — увеличение накопления числа отсчетов на один излученный импульс, понижение рабочей частоты антенного блока.

Проведенные сравнительные испытания антенного блока «Тритон» с центральной частотой 50 МГц и антен-

ного блока АБД продемонстрировали основные особенности и отличия антенного блока «Тритон»:

конструкция блока позволяет осуществлять зондирование без отрыва от поверхности даже на сильно пересеченной местности (отсутствие отрыва увеличивает глубинность зондирования и уменьшает помехи от переотражений);

герметичность корпуса позволяет успешно решать задачи, связанные с подводным зондированием — исследование донных слоев, а также поиск и локализация объектов на больших глубинах ниже профиля дна;

легкий вес, меньшие габариты и неразборная конструкция блока «Тритон» обеспечивают повышенную надежность и высокую производительность.

Антенными блоками АБД-50 и «Тритон» производилось исследование одного и того же участка местности с одинаковыми параметрами зондирования. Исследуемый грунт представляет собой влажно-мерзлый песок, снизу ограниченный слоем торфа. Зондирование проводилось при температуре  $-4^{\circ}$  и относительной влажности 85%. Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Две радарограммы записаны при исследовании одного и того же участка местности с одинаковыми параметрами зондирования. Антенный блок «Тритон» имеет несколько большую глубинность и меньший уровень помех-переотражений по сравнению с АБД-50.

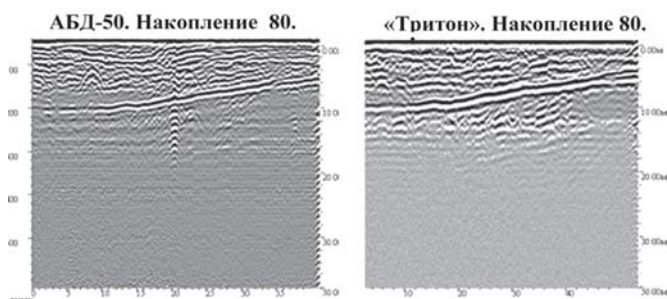


Рис. 3.

Результаты испытаний антенного блока «Тритон» на озере в г. Раменское представлены на рис. 4. Антенный блок был затоплен на глубину 4 м, сканирование проводилось в непрерывном режиме с накоплением 128.

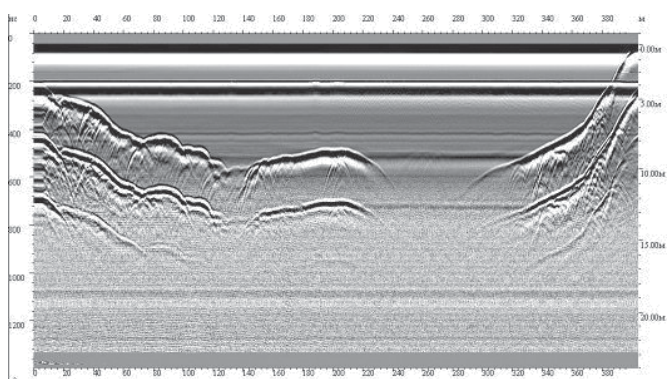


Рис. 4.

Георадары в настоящее время активно используются для обследования дорожной одежды. Георадарные профили после интерпретации позволяют воспроизвести картину слоев как основания, так и верхней части дорожной одежды. Однако использование контактных антенных блоков

затрудняло получение хороших результатов по самой верхней части из-за положения на эти участки мощного сигнала прямого прохождения. К тому же, в этих условиях для подавления прямого сигнала нельзя использовать операцию «вычитание среднего» из-за возможной потери информации от горизонтальных слоев. Единственным выходом из сложившейся ситуации является использование рупорных антенн с некоторым отрывом от поверхности. Создание рупорного антенного блока АБ-1700-Р позволило разрешить эту проблему.

Этот антенный блок позволяет проводить изучение самой верхней части изучаемой среды. Высота подвеса антенного блока выбирается около 20–30 см. Сам антенный блок монтируется на удобном быстроразъемном креплении к задней части автомобиля (рис. 5). Решение задачи зондирования с автомобиля потребовало увеличения быстродействия всей системы. Иногда георадарное зондирование, особенно на максимальных глубинах, в силу различных причин не дает приемлемых результатов. Единственным выходом из этой ситуации является использование скважинного георадара.



Рис. 5.

Использование таких георадаров может дать много дополнительной информации, которую нельзя получить другими методами. Сдерживающим фактором по этой технологии является необходимость создания разведочных скважин и более сложная интерпретация результатов зондирования. Для решения задач по скважинному зондированию был разработан скважинный комплекс для работы в скважинах с диаметром не менее 100 мм.

Скважинный георадарный комплекс (рис. 6) имеет сменные направленные экранированные антенные блоки с разной поляризацией антенн и центральной частотой около 700 МГц. В составе комплекса также имеется автоматическое поворотное устройство и ручное устройство для подъема-опускания штанги со встроенным датчиком перемещений. Кроме работы в одной скважине есть возможность производить работу «на просвет» из двух скважин.



Рис. 6.

Рис. 7.

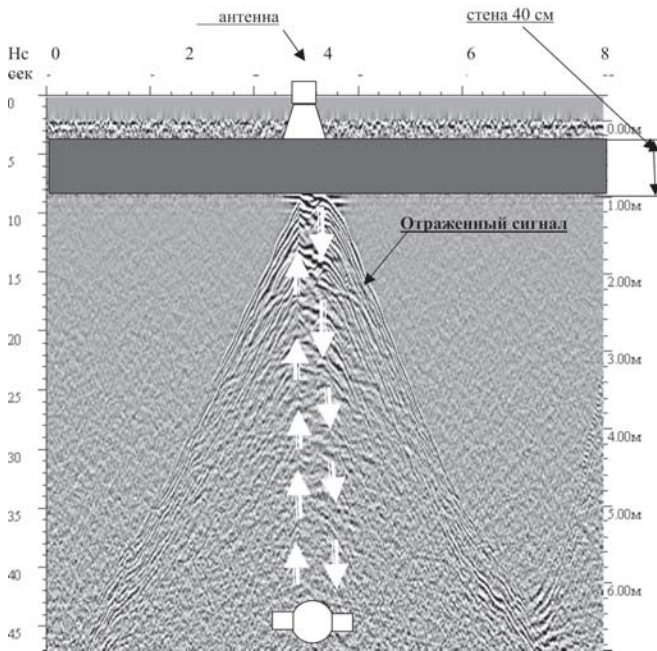


Рис. 8. Радарограмма рупорной антенны, развертка 48 нс, накопление 16

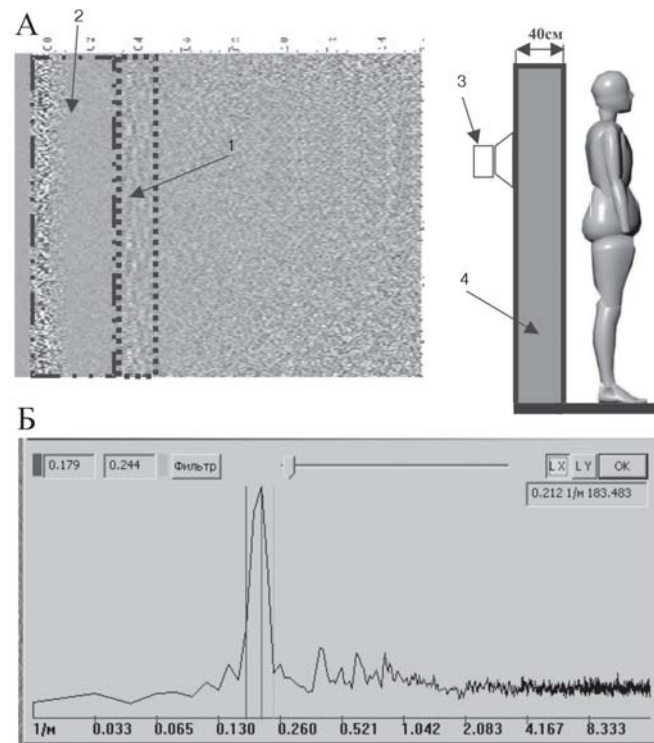


Рис. 9. Эксперимент по обнаружению человека по дыханию с помощью георадара: А — радарограмма после обработки «вычитание среднего глобального»; Б — спектр отраженного сигнала; 1 — участок радарограммы, соответствующий регистрации дыхания; 2 — то же, стене; 3 — антенный блок АБ-1700; 4 — кирпичная стена

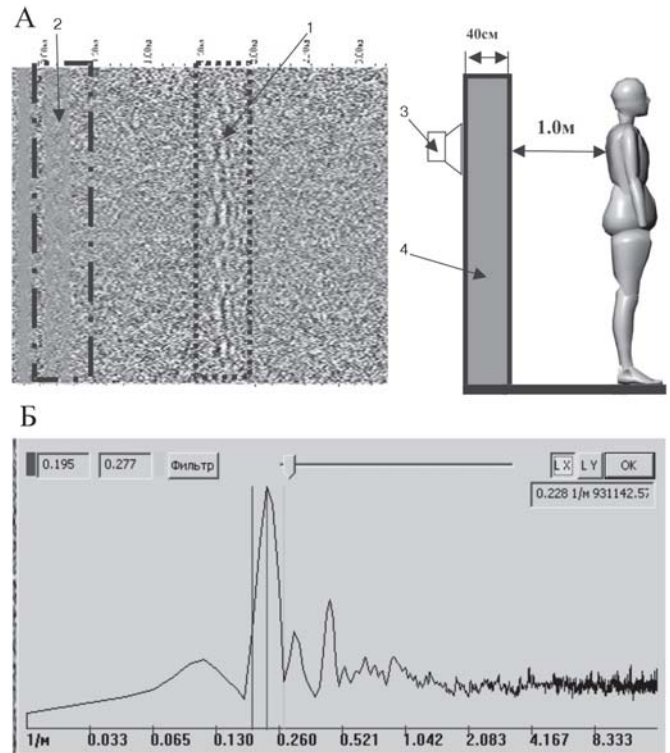


Рис. 10. Условные обозначения см. на рис. 9

На рис. 7 представлен скважинный зонд с осевой поляризацией сигнала. Георадары в последние годы находят все больший интерес в силовых структурах, где он зарекомендовал себя как надежное и быстрое средство для обследования площадок и строительных конструкций. Дальнейшее улучшение основных характеристик георадарных систем в последнее время привело к возможности использования георадаров для выявления движения за стенами. На рис. 8 приведены результаты зондирования через стену при движении человека с удалением до 7 м.

Были проведены экспериментальные работы по обнаружению человека, находящегося за стеной в соседнем помещении вплотную к стене (рис. 9) и на расстоянии 1 м от стены (рис. 10).

Приведенные выше достижения в совершенствовании георадаров за последние годы существенно расширили спектр решаемых георадаром задач и активизировали их внедрение в различные области народного хозяйства.

Георадары нового поколения открыли новые возможности для силовых структур при решении различных задач в антитеррористической деятельности, в том числе для обнаружения людей в укрытиях, за стенами и препятствиями, при выявлении контрабанды и т.д.

Появление герметизированных антенных блоков «Трифон» позволяет увеличить глубинность исследований при обнаружении объектов на дне водоемов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев А.С. и др. Обнаружение и дистанционная диагностика состояния людей за препятствиями с помощью РЛС // Радиотехника. — 2003. — № 7. — С. 42–47.
2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию / Учеб. пособие. — М.: МГУ, 2004.
3. Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. Некоторые результаты применения георадара «ОКО» / Тез. докл. 4-й междунар. н.-пр. конф. «Георадар-2004». — М.: МГУ. — С. 100–103.

### ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРОВ СЕРИИ «ТР-ГЕО» В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Георадары «ТР-ГЕО» разрабатываются и используются ООО «Геологоразведка» на протяжении последних восьми лет. В данной работе приводятся примеры практического использования георадаров «ТР-ГЕО», дается краткое описание георадаров и их программного обеспечения.

Георадары «ТР-ГЕО» предназначены для дистанционного зондирования грунтов и других сред со слабым и умеренным поглощением электромагнитных волн: скальных пород, влажных песчаных грунтов и супесей, слабо увлажненных суглинков. Они способны обнаруживать локальные неоднородности (металлические или диэлектрические) и границы слоев грунта, отличающихся друг от друга по электрическим параметрам. Работа георадаров основана на излучении видеоимпульса с широким спектром и регистрации отраженных от неоднородностей видеоимпульсов. Результаты обработки таких сигналов позволяют построить изображение отражающих границ неоднородностей среды зондирования, объемное или в виде вертикальных разрезов. Используемые георадары различаются диапазоном рабочих частот, размерами антенн, разрешающей способностью и дальностью зондирования. Характеристики георадаров серии «ТР-ГЕО» приведены в таблице.

Георадар	Размер антенны (см)	Средняя частота (МГц)	Глубина *
ТР-ГЕО-Д	100×90×20	20-30	до 30 м
ТР-ГЕО-Д	55×55×13	120-150	до 15-20 м
ТР-ГЕО-01	40×40×7, 41×33×5	150-200	до 10 м
ТР-ГЕО-02	25×25×5, 30×20×5	150-250	до 5-7 м
ТР-ГЕО-03	12×12×3, 8×8×3	~1000, ~1500	до 1 м

\* Указана глубина зондирования в песчаном грунте с умеренной влажностью.

Георадары «ТР-ГЕО-01», «ТР-ГЕО-Д» предназначены для построения геологических разрезов, для обнаружения карстовых полостей, зон разуплотнения в грунте, границ линз, пльвунов, аллювиальных отложений, локальных предметов, металлических или диэлектрических (крупных валунов), размерами не менее 0.3–0.5 м, кабелей, труб. На рис. 1 показана последняя модификация георадара «ТР-ГЕО-01». Георадар «ТР-ГЕО-03» предназначен для обнаружения дефектов в строительных конструкциях, пустот, кабелей, труб, локальных объектов размером не менее 5 см, для определения толщины слоев дорожного покрытия.

Регистрация сигналов производится при перемещении антенного блока по исследуемой поверхности. Допускается перемещение с небольшим зазором (1–5 см) между антеннами и поверхностью. Наилучшие результаты достигаются при плотном контакте антенн с грунтом и при ровной поверхности грунта. Антенный блок обычно перемещается вдоль нескольких параллельных профилей. Для отсчета управления записью сигналов может служить датчик пути. Расстояние между соседними профилями зависит от близости предполагаемого объекта зондирования и составляет 0.2–1 м. Для возможно более точного определения положения объекта размер области перемещения антенного блока на поверхности должен примерно вдвое превышать глубину объекта зондирования.

Антенны георадаров «ТР-ГЕО» щелевого типа. Это обеспечивает высокую развязку «верх-низ», то есть низкий уровень паразитных отражений от объектов, находящихся в воздушном полупространстве. Это свойство полезно при наличии посторонних предметов, при работе радара в непосредственной близости от стен строений, а также в условиях сильных электромагнитных помех. При необходимости осуществляется дополнительная экранирование антенн блоками резистивного материала.

Для записи и обработки сигналов используется программа «Радар». Обработка сигналов включает предварительную обработку, алгоритмы деконволюции, три алгоритма трехмерной фокусировки и алгоритмы трехмерной визуализации.

Предварительная обработка заключается в нахождении сигнала прямого прохождения между антеннами и вычитание его из всех записанных сигналов. В предварительную обработку входит также удаление низкочастотной составляющей, остающейся в результате неполного вычитания медленно затухающей экспоненты сигнала прямого прохождения. В случае необходимости проводится также полосовая фильтрация «звона», возникающего, например, в результате многократных отражений сигнала. Такой «звон» возникает, в частности, при зондировании железобетонных конструкций. Подавление случайного теплового шума, а также электромагнитных помех производится путем накопления и многократного усреднения сигналов. Число накопления измеренного значения в каждой точке временной развертки задается в виде функции, увеличивающейся к концу развертки и обеспечивающей требуемое отношение сигнал-шум по всей временной развертке радара. Эта функция учитывает экспоненциальное затухание отраженных сигналов в грунте. Усреднение сигналов производится также по мере медленного перемещения георадара в пределах небольших разрезов вдоль профиля, определяемых датчиком пути.

Результатом предварительной обработки является сумма сигналов, отраженных от объектов. Каждый такой отраженный сигнал от локального объекта или от границы раздела имеет вид затухающего осциллирующего сигнала, состоящего из нескольких (3–5) полупериодов. Алгоритмы деконволюции осуществляют преобразование этих отраженных сигналов к сигналам, состоящим из одного полупериода, или определяют моменты прихода и амплитуды отраженных сигналов. Из методов деконволюции в программе «Радар» имеются метод инверсной фильтрации, метод наименьших квадратов с регуляризацией А.Н. Тихонова. Исследовались также корреляционный и автокорреляционный методы. Автокорреляционный метод ищет похожие отраженные сигналы в соседних положениях антенного блока.



Рис. 1. Георадар «ТР-ГЕО-01»

ООО «Геологоразведка» в течение восьми лет (1997–2005) накоплен большой опыт практического использования георадаров серии «ТР-ГЕО» на строительных объектах г. Москвы. Рассмотрим различные области практического применения георадаров и результаты, полученные георадарами «ТР-ГЕО». Ниже приводятся результаты предварительной обработки в виде вертикальных волновых профилей или объемного изображения. Указаны шкалы (в метрах) по глубине и вдоль поверхности.

#### Мониторинг грунтового массива при проходке тоннелей.

Необходимость зондирования впереди проходческого щита связана с опасностью разрушения подземных коммуникаций, неточно нанесенных или не указанных на геологических разрезах. Кроме того, имеющиеся геологические разрезы грунта часто не соответствуют реальному геомассиву. Это связано с невозможностью бурения разведочных скважин в условиях плотной городской застройки. Линзы, древние русла рек и аллювиальные врезы могут иметь меньшие размеры, чем расстояние между скважинами.

Мониторинг грунта впереди забоя строящихся коллекторов позволил своевременно обнаружить: 5 металлических водопроводных труб, 2 газопроводные трубы, 1 керамический коллектор, 1 высоковольтный кабель, 5 старых разведочных скважин, 2 крупные карстовые полости, заполненные водой, емкостью не менее 150 м<sup>3</sup>, множество валунов большого размера. Обнаружено 29 снарядов калибра 152 мм и длиной около 50 см, оставшихся в грунте со времени Великой Отечественной войны. На рис. 2 показаны результаты зондирования на месте массового захоронения этих снарядов. Пять снарядов находятся рядом друг с другом на расстоянии примерно 0.5 м от поверхности забоя.

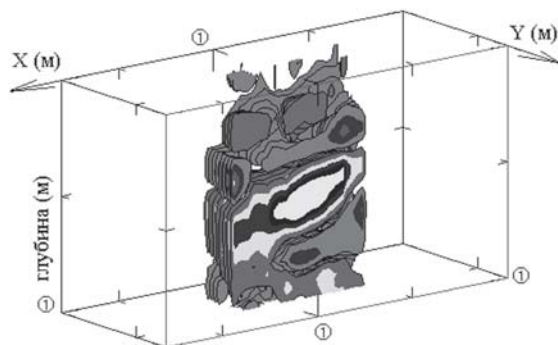


Рис. 2. Результаты зондирования пяти снарядов калибра 152 мм в глинистом грунте

#### Зондирование с дневной поверхности с целью уточнения геологических разрезов.

Этот вид зондирования необходим при прокладке тоннелей и других коммуникаций неглубокого заложения, в частности, методом микротоннелирования. Результаты зондирования георадарами используются совместно с данными скважинной разведки для построения или уточнения геологических разрезов между геологоразведочными скважинами.

#### Зондирование в скальном грунте.

Целью зондирования в штольнях и транспортных тоннелях, строящихся в скальных грунтах, является нахождение трещин и разломов в горном массиве. На рис.3 показан процесс зондирования в технологической штольне транспортного тоннеля, на рис.4 — один из результатов зондирования. Выявлены трещины на расстояниях до 3–4 м (указаны стрелками).



Рис. 3. Зондирование георадаром «ТР-ГЕО-02» в технологической штольне транспортного тоннеля

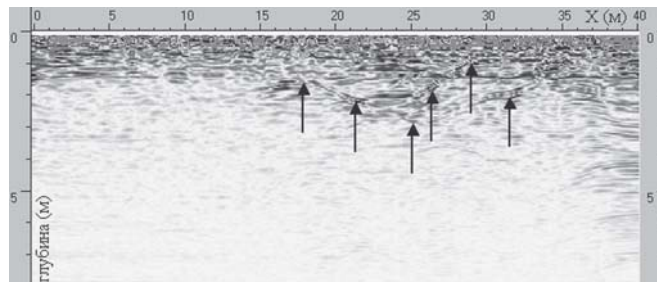


Рис. 4. Результаты зондирования трещин в скальном грунте георадаром «ТР-ГЕО-02»

#### Зондирование городских подземных коммуникаций.

При прокладке новых труб или кабелей, при ремонте старых коммуникаций необходимо знать точное расположение всех имеющихся в данном месте подземных коммуникаций и их разветвлений. Часто старые подземные коммуникации не нанесены на геологические карты. Это может приводить к авариям или поломке оборудования при прокладке новых коммуникаций.

#### Зондирование на строительных площадках.

Целью зондирования является изучение геоподосновы, поиск карстовых полостей, погребенных подвалов на местах будущего строительства. Приведем пример зондирования, в результате которого был обнаружен погребенный подвал на месте будущего котлована. На рис. 5а показаны

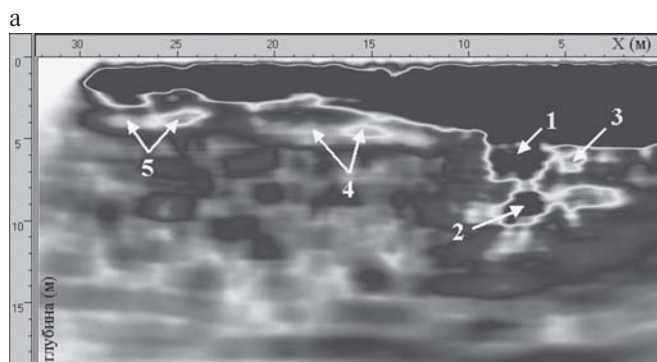


Рис. 5. Результаты зондирования после проведения фокусировки (а) и стена котлована, выкопанного на месте зондирования (б)

результаты зондирования после проведения фокусировки, на рис.5б — фотография стены котлована, выкопанного на месте зондирования. Неоднородности на полученном изображении соответствуют раскопанным железобетонным конструкциям.

**Использование георадаров при прокладке подземных коммуникаций методом микротоннелирования или с использованием других бестраншейных технологий.**

Целью зондирования является поиск техногенных и природных включений (крупных валунов), уточнение расположения подземных коммуникаций. Выявление этих объектов позволяет правильно спроектировать трассу, избежать аварий при микротоннелировании.

Исследование грунта необходимо также проводить после завершения строительства, поскольку при микрощитовой проходке иногда образуются пустоты и зоны разуплотнения в грунте. Зондирование георадарами «ТР-ГЕО», проведенное ООО «Геологоразведка» после строительства одного из коллекторов, выявило такие зоны разуплотнения, что подтвердилось при последующей проверке.

**Зондирование стен горной выработки при обделке из монолитного пресбетона.**

При зондировании высокочастотными радарми (со средней частотой ~1 ГГц) решается задача обнаружения возможных дефектов крепления, проводится контроль толщины бетонных стен тоннелей. Зондирование радарми с более низкой средней частотой имеет цель выявить карстовые пустоты и влажные зоны в непосредственной близости от стен горной выработки.

Результаты практической работы, проведенной ООО «Геологоразведка», показывают, что контроль состояния грунта с помощью георадаров является настоятельно необходимым и что георадары серии «ТР-ГЕО» успешно выполняют эту задачу.

© Кафиатуллин М.А., Соколов С.В., 2005

Кафиатуллин М.А., Соколов С.В. (ОАО Институт «Казгражданпроект»)

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДАРА В ОАО «ИНСТИТУТ «КАЗГРАЖДАНПРОЕКТ»

Первые опыты внедрения георадиолокации в отделе инженерных изысканий института представлены в нижеприведенных примерах.

Выбор был остановлен на георадарах серии «ОКО» производства ООО «ЛОГИС», как серийно выпускаемых и наиболее освещенных в средствах информации. Из линейки антенных блоков приобретен экранированный АБ–250 из соображений наибольшей универсальности для целей инженерных изысканий — глубинность исследований, разрешающая способность, габариты, возможность наблюдений на переменной базе.

На рис. 1 приведена обработанная радарограмма над железобетонным пожарным резервуаром перед фасадом реконструируемого оперного театра, построенного на рубеже 50-х годов. На радарограмме прослеживается контур и «усы» дифракции от стен и углов резервуара, а также интенсивная низкочастотная запись с «прогнутой» осью синфазности в интервале 22–29 м. Данная зона была интерпретирована как участок возможного повреждения кровли резервуара.

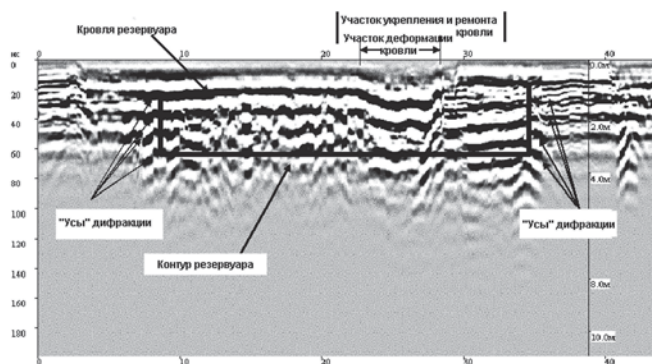


Рис. 1. Радарограмма над подземным резервуаром

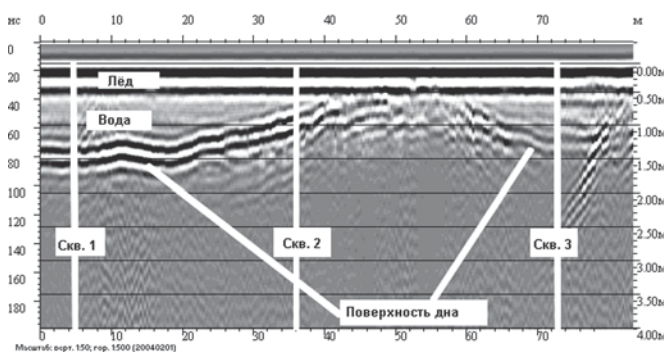


Рис. 2. Результаты работ на акватории

При демонтаже резервуара выяснилось, что возникновение характерной «звенящей» записи вызвано ранее имевшейся деформацией (прогибом) кровли на этом участке и подпором ее стальными трубами и поперечными балками с дополнительной гидроизоляцией. Следует отметить, что поверхностные проявления наличия подземной емкости отсутствовали: часть поверхности над резервуаром была заасфальтирована, часть находилась под декоративным газоном. Последствиями проведенного ремонта объясняется и появление «звона» справа от выделенной зоны.

На рис. 2 представлены результаты работ на акватории р. Казанки на участке строительства причала. Изыскательские работы выполнялись в зимний период, со льда. Толщина льда составляла около 50 см. Несмотря на многослойность весеннего льда и «загрязненность» записи кратными отражениями, нижняя кромка льда и поверхность дна прослеживаются достаточно уверенно. Нижележащие границы выделить не удалось. В правой части радарограммы видны боковые отражения от дамбы.

На рис. 3, 4, 5 в представлены примеры определения мощности песчаной насыпи с целью подсчета объема намывного песка. Речной песок способом гидронамыва перемещается на заболоченные прибрежные территории, которые в дальнейшем застраиваются.

Мощность однородного песка, уровень грунтовых вод определяются уверенно (см. рис. 3, 5), но в случае отсыпки смешанным, не слежавшимся грунтом ситуация резко меняется (см. рис. 4). Мощность грунтовой насыпи на приводимом примере такая же, что и песчаной, но глубина исследования снижается с 7–8 до 1–2 м. Возможно, для решения подобной задачи нужен более низкочастотный антенный блок либо другой метод. Для уточнения параметров разреза был опробован режим зондирования с пе-



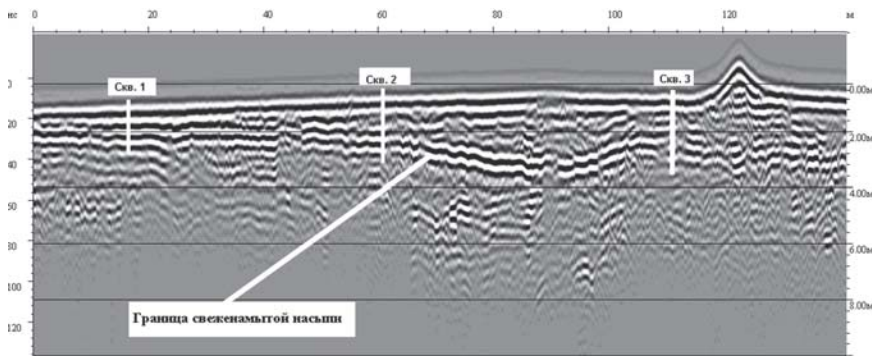


Рис. 3. Определение мощности намывного песка

ременной базой, когда излучающая антенна неподвижна, а приемная в пошаговом режиме относится на длину оптического соединительного кабеля (в нашем случае на 5 м) (см. рис. 5). Полученные значения скорости и диэлектрической проницаемости позволили уточнить границы инженерно-геологических элементов, что согласуется с данными бурения.

На рис. 6 показан пример обнаружения подземных коммуникаций (железобетонный канализационный коллектор и полиэтиленовый водовод) в песчаной насыпи. Как видим, трубы просматриваются весьма уверенно. Однако на участке суглинистой насыпи водовод не прослеживался.

Приведенные примеры не содержат принципиальной новизны и имеют целью показать как положительные стороны, так и известные ограничения возможностей метода, полученные из собственного опыта. Расширение круга задач, повышение качества и информативности инженерных изысканий требует комплексирования методов, пополнения аппаратного парка. В частности, необходимость приобретения дополнительных антенных блоков для целей дорожного строительства, обследования строительных конструкций и коммуникаций уже осознана, уточняется комплектация.

Для решения разноплановых задач необходимо развитие нормативно-методической базы, диалог заинтересованных пользователей. Важную роль, особенно в организациях, где штат геофизиков не превышает одного-двух, играет наличие удобного и понятного программного обеспечения с графическими возможностями, позволяющими

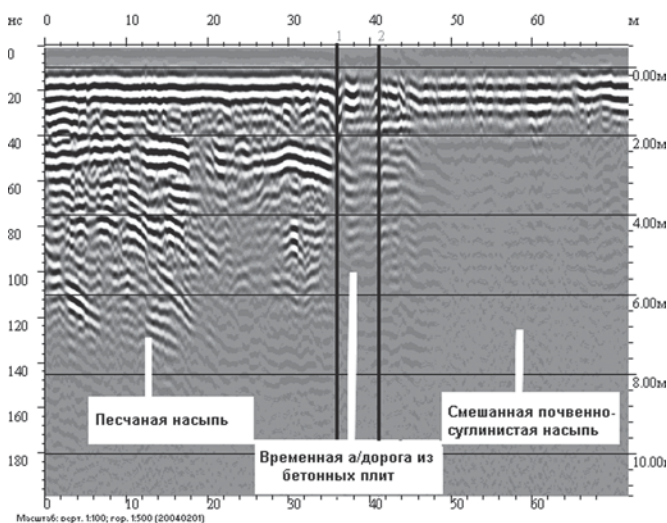


Рис. 4. Профиль через насыпь различного состава

ми оперативно и профессионально представлять результаты, так как по нашему опыту время, затрачиваемое на обработку, как правило, многократно превышает время полевых работ.

Говоря о комплексировании и расширении современной аппаратно-методической базы, не следует забывать и о простых, успешно зарекомендовавших себя методах. В изыскательских организациях г. Казани давно и успешно применяется электрокаротаж сухих скважин, который в сочетании с гамма-ка-

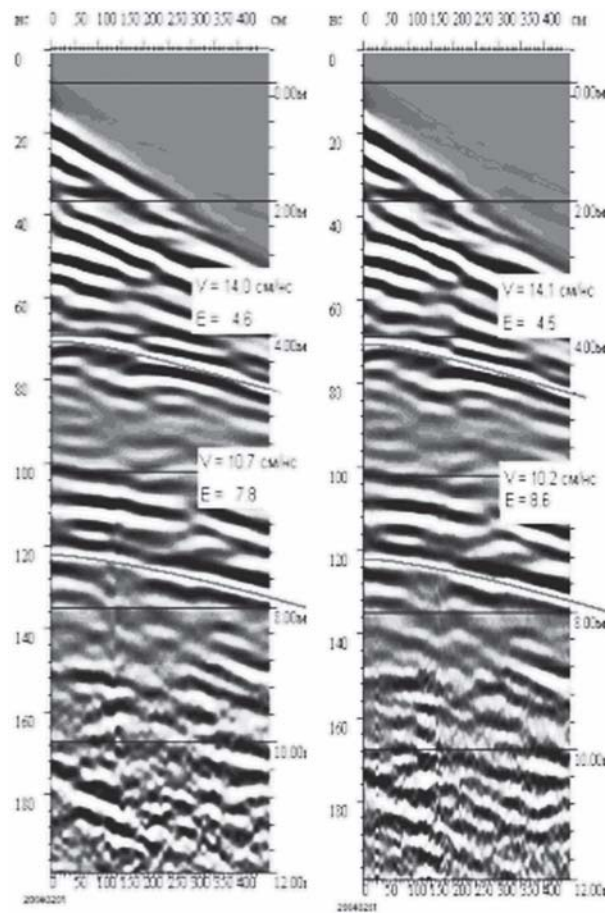
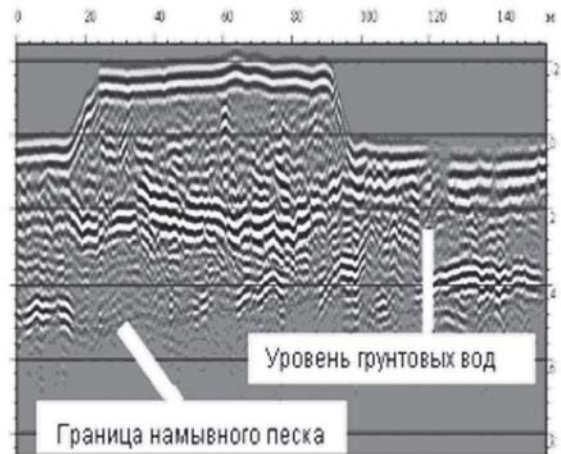


Рис. 5. Георадарный профиль через песчаную насыпь и годографы отраженных волн

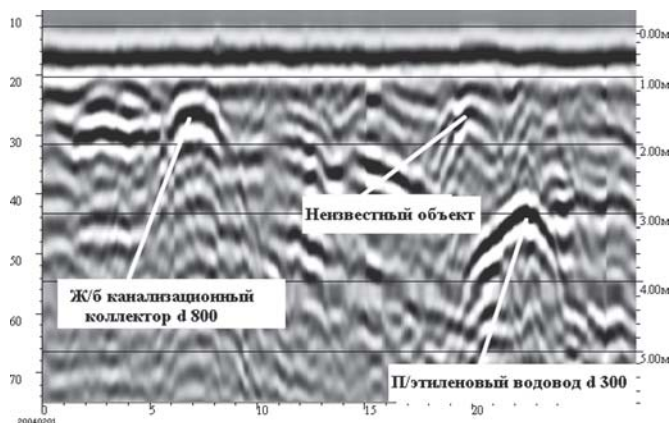


Рис. 6. Поиск подземных коммуникаций

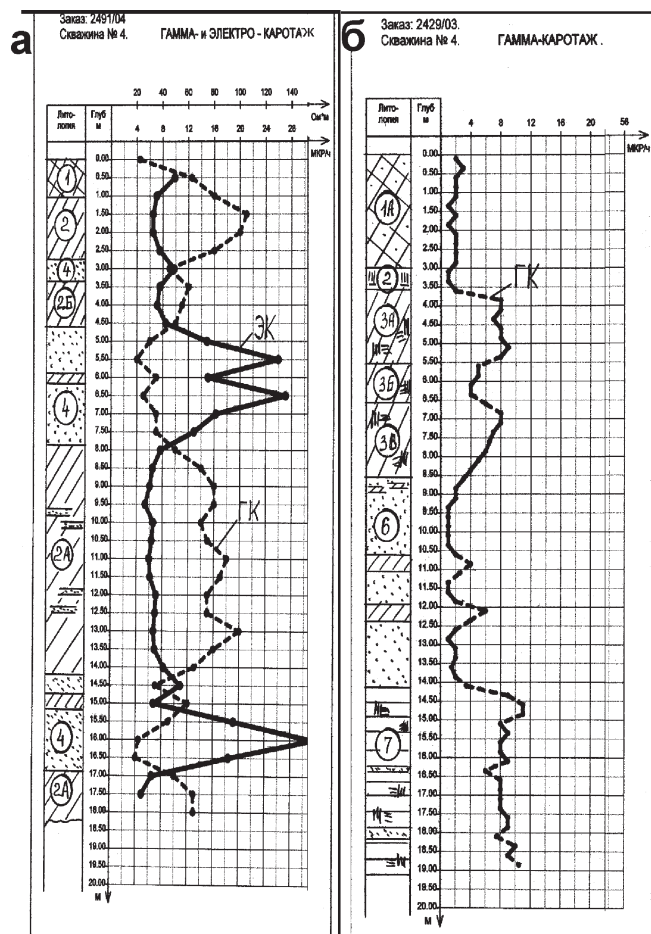


Рис. 7. Примеры каротажа инженерно-геологических скважин в трубах d 60: а — сухих, б — водонасыщенных

ротажом позволяет существенно повысить качество бурения и определить физико-механические свойства грунтов, используя как известные, так и выведенные корреляционные зависимости.

Для проведения ЭК используется двухэлектродный зонд с подпружиненными рычажными электродами, обеспечивающими непрерывный контакт со стенками скважины. Для регистрации подходит практически любая электроразведочная аппаратура. В частности, нами используется АНЧ-3. Замеры ведутся поточно, с необходимым шагом.

Для гамма-каротажа используются скважинные радиометры СРП-68-88. В обводненных, заплывающих скважинах выполняется только ГК, который проводится в толстостенных трубах диаметром 50–60 мм с конусным наконечником. Трубы задавливаются буровой установкой в ранее пробуренные инженерно-геологические скважины, как правило, после завершения буровых работ на объекте. Примеры применения каротажа приведены на рис. 7. Каротаж по описанной методике может быть выполнен практически на всех разрезах и является неотъемлемым комплексом сопровождения буровых работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Георадиолокационные исследования верхней части разреза. — М.: Изд-во МГУ, 1999.
2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. — М.: Изд-во МГУ, 2005.
3. Зонд для непрерывной записи электрического сопротивления пород в сухих инженерно-геологических скважинах / В.В. Смоленцев. Информационный листок № 142-81, УДК 621.317.343:622.2, Тат ЦНТИ, 1981.
4. Электрозонд для каротажа скважин в зоне аэрации / А.М. Аканов — Отчет по теме № 7. ГОССТРОЙ РСФСР. Производственное объединение «Стройизыскания», 1979.
5. GeoScan 32. Программа управления георадаром и визуализации получаемых данных: Иллюстрированное руководство пользователя. — Жуковский: ООО «Логис», 2000–2005.

© Капустин В.В., 2005

Капустин В.В. (ООО «ИнжСтройИзыскания»)

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОРАДАРНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Наиболее популярные и чаще всего используемые в практике специализированные программные пакеты RadExpro, GeoScan, Prism, SS Soft и аналогичные им позволяют осуществлять достаточно большой набор процедур обработки георадарных и сейсмических данных, необходимых как для получения экспресс-информации непосредственно при проведении полевых работ, так и на окончательном этапе камеральной обработки. Однако постоянно усложняющийся круг задач, стоящих перед инженерной геофизикой: необходимость проводить исследования неоднородных и поглощающих сред, локальных объектов и сред со сложной геометрией, в частности строительных конструкций, требуют зачастую более тонких и детальных возможностей анализа георадарных и сейсмических сигналов. Необходимо отметить, что специализированные пакеты обработки непрерывно наращиваются и в них включаются новые модули, расширяющие возможности анализа данных. Это довольно медленный процесс, и данные пакеты обработки в большей мере ориентированы на решение инженерно-геологических задач. Кроме того, пользователю не всегда доступны новые версии. Поэтому представляется полезным обратить внимание практикующих геофизиков, в особенности тех, которые используют геофизические методы при исследовании строительных конструкций, на системы и пакеты по обработке сигналов общего назначения.

Широкие возможности анализа сигналов и изображений (числовых матриц) могут быть реализованы при использо-

вании пакета Signal Processing системы MATLAB либо аналогичных пакетов в системах Mathcad и Mathematika. Для ввода данных в перечисленные пакеты необходим лишь конвертор, переводящий формат георадарных или сейсмических данных в текстовой или бинарный формат. Возможности пакета Signal Processing+Wavelet Toolbox огромны, поэтому даже краткое их перечисление не представляется возможным. Остановимся только на отдельных моментах, наиболее часто необходимых в практике решения инженерно-геофизических задач.

**1. Моделирование сигналов и их последовательностей и расчет синтетических радарограмм и сейсмограмм.** Необходимость подобного моделирования зачастую возникает при обследовании строительных конструкций, для анализа которых используются модели со сложной геометрией и специфическими электрофизическими и акустическими свойствами. В системе MATLAB удобно может быть реализована процедура расчета сигналов и их последовательностей благодаря наличию встроенных функций. Имеется возможность рассчитывать как единичную трассу, так и участок профиля с границами, заданными гладкими функциями, с учетом расхождения, поглощения, кратных отражений и заданным уровнем белого шума. Введение шумовой компоненты производится также с помощью встроенной функции. Реализована возможность моделировать сигналы различной формы и длительности и их последовательности. Данные возможности создают условия для более глубокого для анализа кинематических и динамических условий отражения и прохождения сигналов, что необходимо при работе, в частности, на строительных конструкциях при наличии большого количества кратных отражений, для решения задач исследования состояния конструкций и характера контакта конструкции с вмещающим грунтом.

**2. Спектральный анализ, оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование.** На начальном этапе обработки георадарных и сейсмических данных проводится анализ кинематических и динамических свойств отраженного сигнала с целью выбора процедур обработки для выделения сигнала на фоне существующих помех. В пакете Signal Processing имеется большой набор способов спектрального анализа, которые могут быть использованы для обработки георадарных и сейсмических трасс с целью обнаружения и определения характеристик полезного сигнала. Для оценки поглощающих свойств среды в ряде случаев необходимо проводить спектральное оценивание сигнала в пределах временного окна, соответствующего длительности сигнала.

В пакете MATLAB имеется целый набор временных окон и, в частности, окна с функцией, минимизирующей проявление эффекта Гиббса. Удобное средство визуализации спектра сигнала предоставляется в рассматриваемом пакете с помощью построения спектрограмм, представленных зависимостью амплитуды спектральных составляющих в скользящем окне от времени и частоты. Возможность вычисления спектра сигнала во временном окне и вычисления частного от деления амплитудных спектров отраженных сигналов позволяет количественно рассчитывать коэффициент поглощения. Еще более мощное средство для отслеживания изменения спектра сигнала во времени предоставляет вейвлет-преобразование сигнала, прототипом которого является оконное преобразование Фурье. Рас-

чет вейвлет-спектрограмм и специальных функций, определяющих положение их минимумов и максимумов, позволяют наглядно отобразить изменения спектральных составляющих сигнала во времени.

**3. Кратномасштабный вейвлет-анализ, декомпозиция сигналов.** Основная идея кратномасштабного анализа состоит в возможности представления сигнала в виде суммы его грубого (аппроксимирующего) представления и набора детализирующих локальных представлений сигнала в разных его местах. В частотном представлении это означает разбиение полосы сигнала на низкочастотную (аппроксимирующую) и высокочастотную составляющие с последующей разбивкой низкочастотной области на детализирующие составляющие. Для анализа сейсмических и георадарных данных опробованы следующие виды вейвлетов: добеши, симлеты и койфлеты. Выбор вейвлетов определялся наличием у них следующих свойств: ортогональность, наличие компактного носителя, симметричность, близость к форме исследуемого сигнала. Помимо всех перечисленных свойств симлеты из данной группы вейвлетов имеют наилучшее свойство симметричности. Эти свойства обеспечивают возможность выполнения алгоритма быстрого вейвлет-преобразования.

Встроенные функции для расчета непрерывных и дискретных вейвлет-преобразований позволяют проводить довольно детальное исследование особенностей сигнала, производить очистку сигнала от шумовой компоненты с помощью установления пороговых значений и, благодаря свойству коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования, строить фильтры с переменной во времени амплитудно-частотной характеристикой. Наиболее полный анализ структуры сигналов и более детальные виды фильтрации могут быть осуществлены с использованием пакетных вейвлетов. Опробованные на практике различные виды обработки георадарных и сейсмических данных показывают полезность применения вейвлет-анализа для решения инженерных задач, в частности, при исследовании строительных конструкций.

**4. Обработка числовых массивов данных.** Массивы георадарных и сейсмических данных после конвертирования в текстовой или бинарный формат могут быть обработаны средствами пакета Signal Processing+Wavelet Toolbox с применением двумерных Фурье и вейвлет-преобразований. Числовые матрицы данных наблюдения могут быть непосредственно визуализированы средствами программного пакета либо преобразованы в какой-либо графический формат.

Преобразованные в изображения массивы данных могут быть обработаны в пакете Image Processing Toolbox, который открывает широкие возможности для проведения анализа изображений (волновых полей) на основе вейвлет-декомпозиции. На основе двумерных разложений может быть построена и фильтрация. Помимо традиционных средств обработки в пакете имеются и специализированные средства, такие как выделение границ между областями, целочисленная арифметика изображений, выделение площадок максимумов и минимумов и целый ряд других возможностей. Применение данных средств способствует лучшей визуализации волновых полей и расширяет возможности их анализа.

**Практическое применение средств обработки.** Большинство приводимых далее примеров относится к задачам исследования строительных конструкций, т.е. среды со слож-

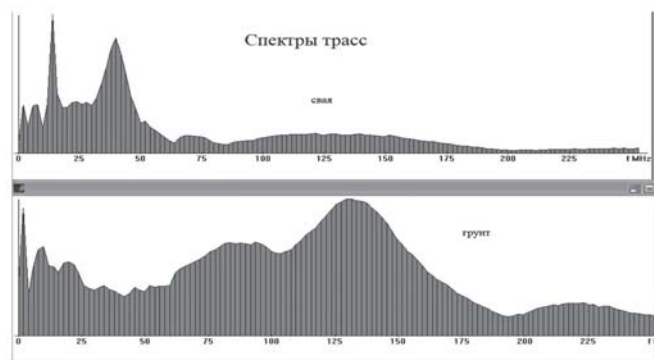
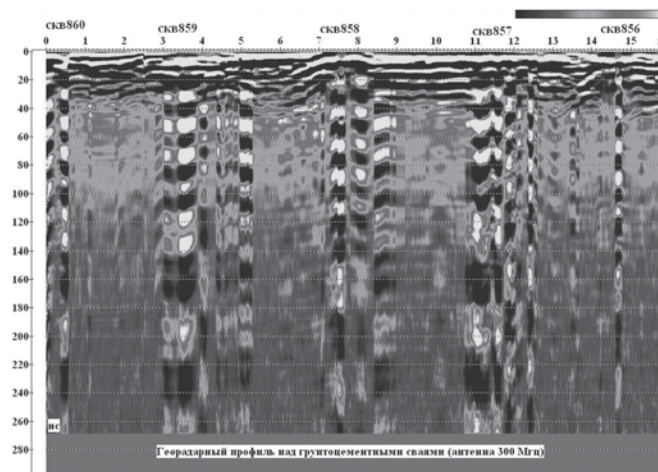
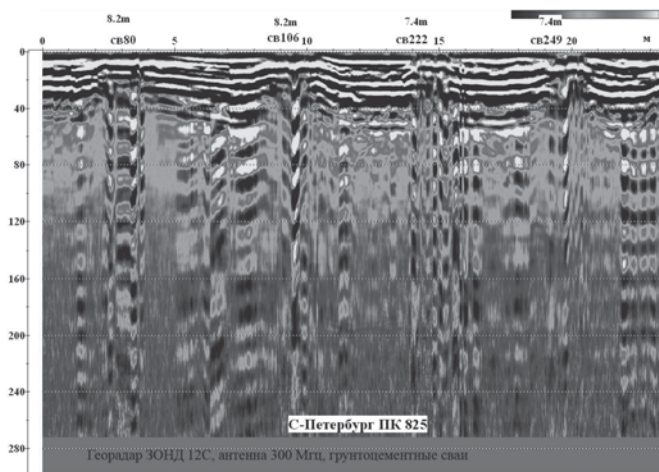


Рис. 1. Примеры георадарных записей, полученных над грунтоцементными сваями

ной геометрией и специфическими электрофизическими и акустическими свойствами. Применение дополнительных возможностей для обработки данных позволяет более детально исследовать изучаемые модели и подготовить более удобный материал для интерпретации.

В ряде задач инженерной геофизики приходится иметь дело с ситуацией, когда полезный сигнал представляет собой сумму высокоамплитудной низкочастотной и низкоамплитудной высокочастотной составляющих. Подобная ситуация возникает при проведении исследований вблизи поверхностей или локальных объектов, где происходит образование низкочастотных волн типа Рэлея, Стоунли, гидроволн или образование в антенне георадара низкочастотных колебаний при работе в средах с высоким затуханием. Разделение волн различного частотного состава и соответственно различного типа представляет большой интерес при обработке и интерпретации материала.

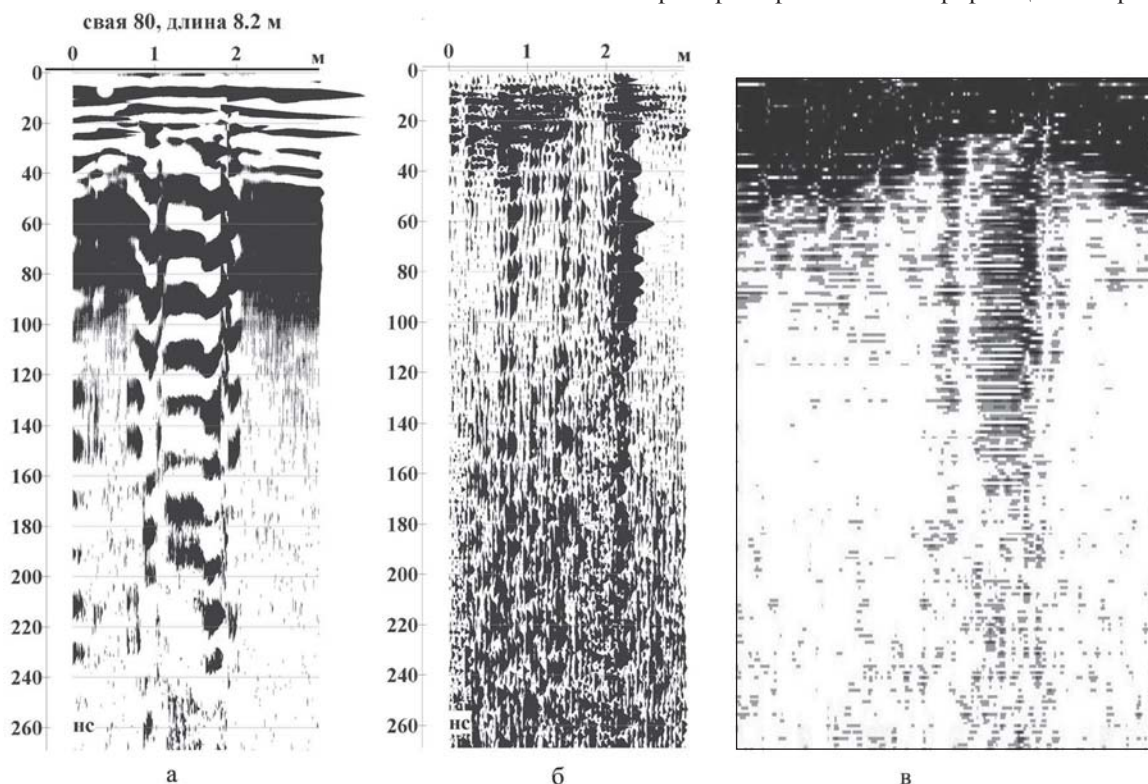


Рис. 2. Результаты декомпозиции и реконструкции по выбранному уровню: а — исходная запись; б — одномерная реконструкция; в — двумерная реконструкция

Решение этой задачи с помощью методов фильтрации, основанных на преобразованиях Фурье, не всегда может быть выполнено корректно, так как базисные функции не локализованы во времени, что приводит в ряде случаев к заметному изменению формы и длительности сигнала. Использование в качестве базисных функций вейвлетов, имеющих лучшую локализацию во временной и частотной области, дает заметно лучший результат, хотя также

не является строгим решением поставленной задачи. В качестве примера можно рассмотреть результаты георадарных наблюдений над грунтовым массивом, армированным грунтоцементными сваями (рис. 1).

Характерной особенностью георадарной записи является наличие высокоамплитудного низкочастотного «звона» при прохождении антенны над грунтоцементной сваем. С одной стороны низкочастотный «звон» является хорошим диагностическим признаком для обнаружения положения сваи, с другой стороны он является помехой при необходимости прослеживания отражающих границ в грунтовом массиве и в теле самой сваи. Для устранения низкочастотной компоненты может быть использовано одномерное или двумерное вейвлет-разложение и реконструкция по выбранной компоненте (рис. 2). Таким образом, видно, что после проведения указанных процедур можно вести речь лишь о наличии слабых отражающих границ в верхней части сваи.

При проведении сейсморазведочных работ и наблюдений методом скважинной сейсмоакустики подобная проблема возникает при необходимости совместного анализа объемных и поверхностных (волн Рэлея) и гидроволн в случае скважинных наблюдений. Применение вейвлет-декомпозиции и реконструкции по различным уровням разложений позволяет отдельно проводить анализ кинематических особенностей распространения объемных и поверхностных волн (рис. 3) и объемных и гидроволн при сейсмоакустических наблюдениях в скважинах (рис. 4 и 5). Особенностью распространения поверхностных волн при наличии двух и более границ является наличие дисперсии фазовой скорости. Для анализа дисперсии удобно использовать пакетное вейвлет-разложение, позволяющее представить сигнал в виде набора узкополосных групп с выбранным частотным диапазоном, распространяющихся с собственной групповой скоростью и провести реконструкцию сигнала отдельно по каждой группе для

определения кинематических параметров.

При исследовании строительных конструкций, в частности буронабивных свай, требуется определить среднюю скорость распространения объемной волны при известной длине сваи для оценки качества произведенного бетонирования сваи. Следующий пример показывает возможности одномерного вейвлет-преобразования для определения времени пробега отраженной от конца сваи объемной волны при регистрации и возбуждении колебательного процесса на поверхности сваи (рис. 6). Для проведения сравнительного анализа колебательных процес-

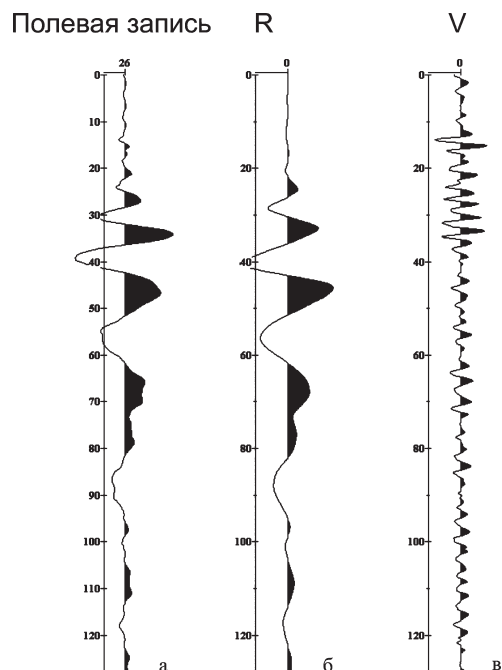


Рис. 3. Декомпозиция и реконструкция сейсмической трассы: а — исходная запись; б — низкочастотная составляющая (поверхностная волна); в — высокочастотная составляющая (объемная волна)

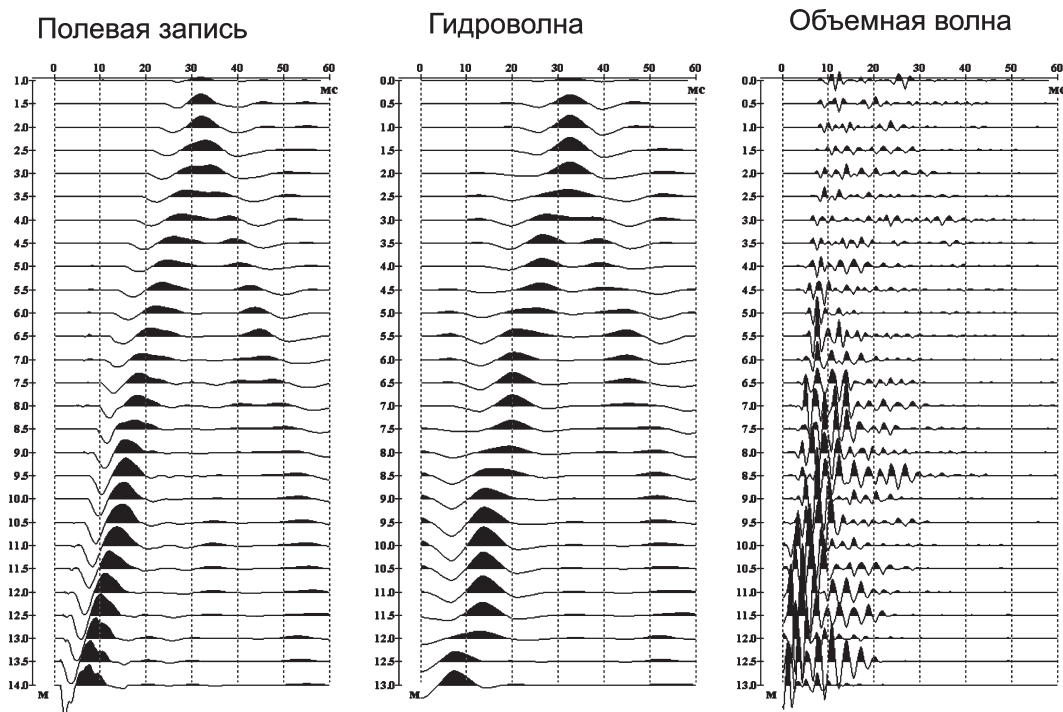


Рис. 4. Разделение объемных волн и гидроволн с помощью одномерной вейвлет-декомпозиции и реконструкции

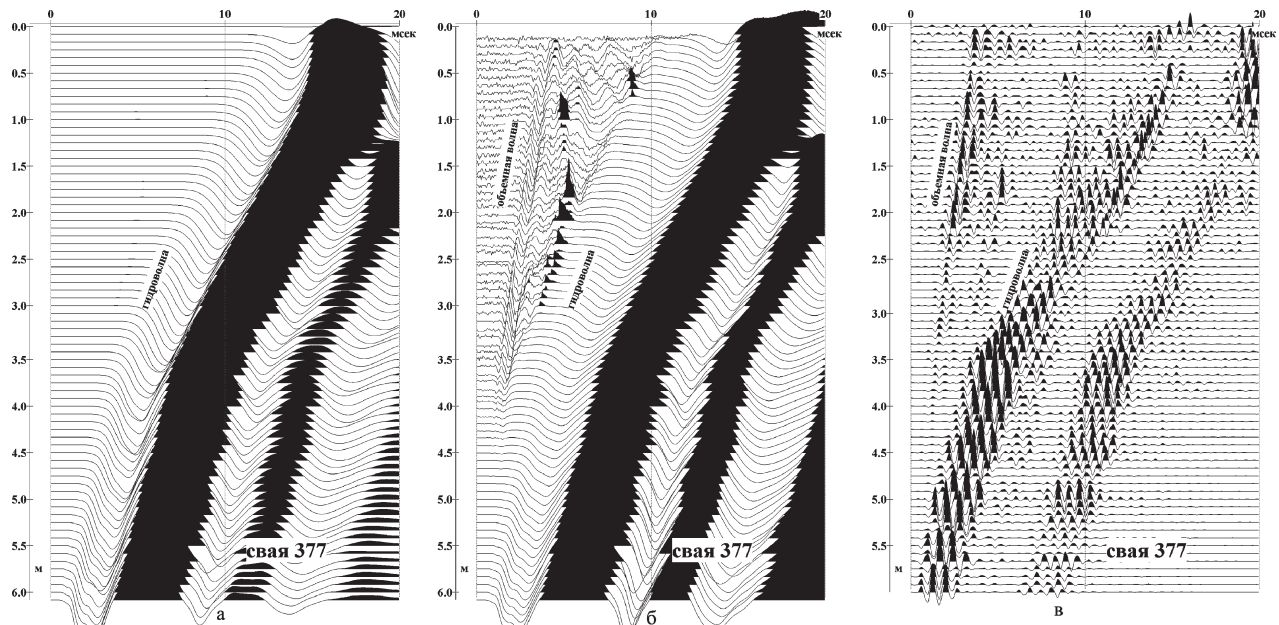


Рис. 5. Реконструкция по высокочастотной составляющей с целью выделения объемной волны и высокочастотной гидроволны: а — исходная запись; б — после амплитудной коррекции; в — вейвлет-реконструкция

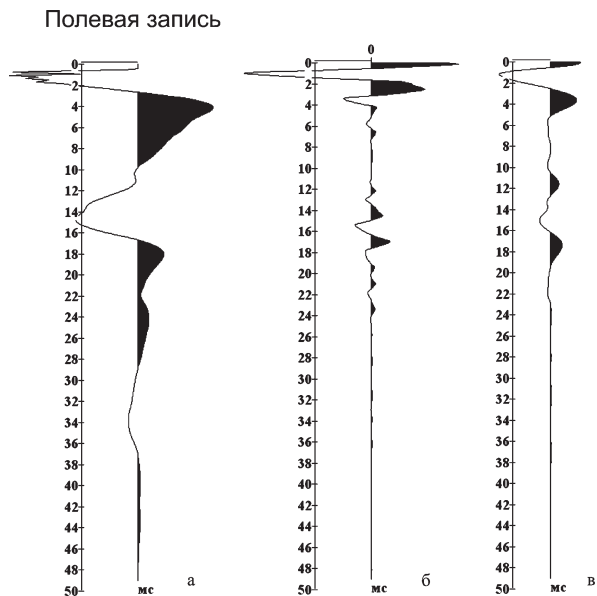


Рис. 6. Результаты обработки записи колебательного процесса в буронабивной свае: а — исходная запись; б — реконструкция по высокочастотной составляющей (объемная волна); в — результат применения полосовой фильтрации

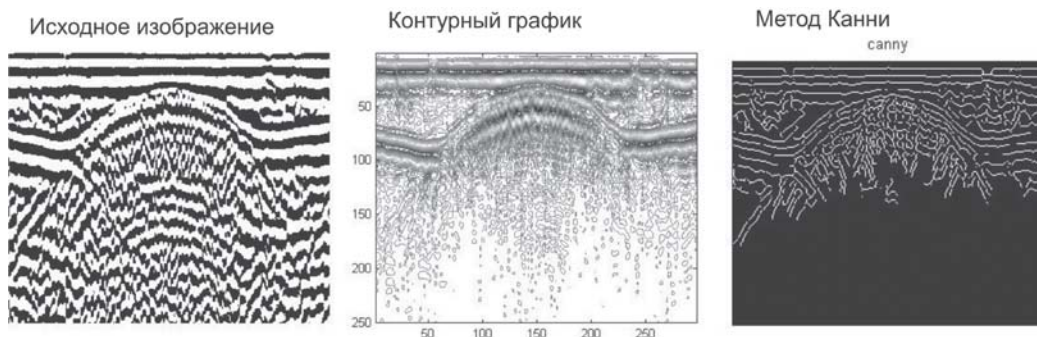


Рис. 7. Пример обработки георадарных изображений

сов, измеренных на группе буронабивных свай, с целью качественной оценки их состояния, наряду с методами спектрального Фурье-анализа при использовании пакета Signal Processing+Wavelet Toolbox имеется возможность использования вейвлет-спектрограмм, статистических и стохастических характеристик коэффициентов разложения.

Следующий пример демонстрирует построение изображений по георадарной записи, проведенной над сводчатым перекрытием, находящимся внутри здания (рис. 7). Полученные изображения позволяют выделить более детальные особенности строения объекта исследований.

К сожалению, в рамках статьи нет возможности привести более расширенный набор примеров и задач, где возможно использование изложенных выше методов обработки. Тем не менее, приведенные примеры наглядно демонстрируют широкие возможности программных пакетов обработки сигналов общего назначения при решении задач инженерной геофизики и разработки новых приемов обработки, которые со временем могут быть использованы в специализированных геофизических программных пакетах. Опыт применения методов вейвлет-анализа при обработке георадарных и сейсмических данных показывает, что в ряде случаев удается получить лучший результат, чем при использовании Фурье-анализа, в особеннос-

ти при анализе слабых высокочастотных сигналов на фоне высокоамплитудных низкочастотных сигналов и помех. Использование дополнительных возможностей анализа сигналов совместно с традиционными методами обработки позволяет улучшить качество материала, подготовляемого для дальнейшей интерпретации.

Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И., Прийма Г.Ю., Чугаев А.В. (Горный институт УрО РАН)

### ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ОТРАЖЕННЫМИ ВОЛНАМИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКОЛОСТВОЛЬНОГО МАССИВА

Подземный способ разработки месторождений твердых полезных ископаемых подразумевает строительство и эксплуатацию различных горнотехнических сооружений. К разряду основных относятся шахтные стволы, представляющие собой вертикальные горные выработки. Их проходка, по сути, и означает начало разработки месторождения. С состоянием шахтных стволов напрямую связана сохранность эксплуатационных горных выработок, а следовательно, и рудника в целом. Ствол, до попадания в проектируемый для разработки интервал геологического разреза, обычно пересекает несколько водоносных горизонтов. Основным методом борьбы с периодически появляющимися водопритоками из этих горизонтов является тампонаж, рассчитанный на укрепление ближней к внешней стенке тюбинговой крепи ствола 1,5–2-метровой зоны. Необходимость и место его проведения определяется визуальным контролем тампонажных пробок. В случае интенсификации поступления воды в ствол он малоэффективен, и возможно создание гидроизоляционных «завес» [6] на пути внешних водопритоков.

В подобной ситуации возникает вопрос локализации путей водопритоков от их удаленных источников и оценка необходимого объема тампонажного материала, что, в свою очередь, требует расширения объема обследований с привлечением инструментальных методов. Для этого предлагается малоуглубинная наземная сейсморазведка, использующая отраженные волны продольного типа, регистрируемые по методике многократных перекрытий [7, 9]. Практическое опробование проходило в пределах соляных рудников, действующих на территории крупнейшего в Европе Верхнекамского месторождения калийных солей [2, 3].

Успешность реализации сейсморазведочных исследований во многом определяется оптимальностью параметров системы наблюдений для исследуемого интервала глубин и предполагаемых размеров картируемых неоднородностей. Необходимо соответствие аппаратного и программного обеспечения параметрам системы наблюдений. В рамках рассматриваемой проблемы это — возможность высокочастотной регистрации в широком динамическом диапазоне и минимальные искажения исходного спектра, при достижении в цифровой обработке необходимого для интерпретации отношения сигнал/шум.

Выполнение подобных требований возможно при использовании компьютеризированных широкодиапазонных малогабаритных сейсмостанций, производимых фирмой Interseis (Латвия) [4], маломощного невзрывного источника ударного типа и современных пакетов программ цифровой обработки, разработанных для PC платформ [1]. Данное аппаратно-программное сопровождение обуславливает возможность проведения сейсморазведочных исследований в условиях значительной техногенной загруженности промплощадок, где и располагаются шахтные стволы.

Обычно наблюдения выполняются по сети профилей, параметры которой также определяются сейсмогеологическими особенностями площади исследований, включающей шахтный ствол. Профильные линии выходят за пределы предположительно нарушенной зоны массива, как минимум, на длину расстановки. Расстояние между ними не превышает диаметра первой зоны Френеля для целового интервала глубин геологического разреза. На профильных линиях, расположенных в непосредственной близости от ствола, применяются как продольные, так и непродольные [5] системы наблюдений. В непродольных — линии приема и возбуждения располагаются с разных сторон ствола. Для изучения строения и свойств массива как в непосредственной близости от ствола, так и на удалении от него в основном используются суммарные временные разрезы общей глубинной точки (ОГТ), общего пункта возбуждения (ОПВ) и общего пункта приема (ОПП). Дополнительно привлекаются динамические и кинематические характеристики. В процессе обработки

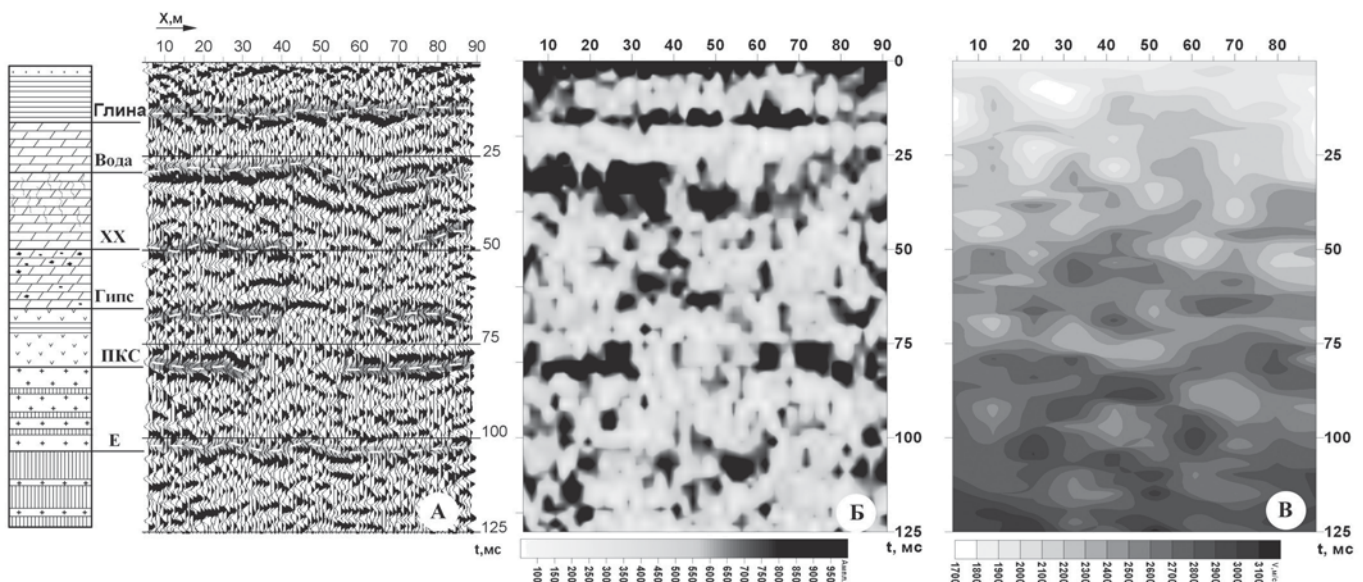


Рис. 1. Околоствольный массив. Временной разрез (А), амплитудная (Б) и скоростная (В) характеристики

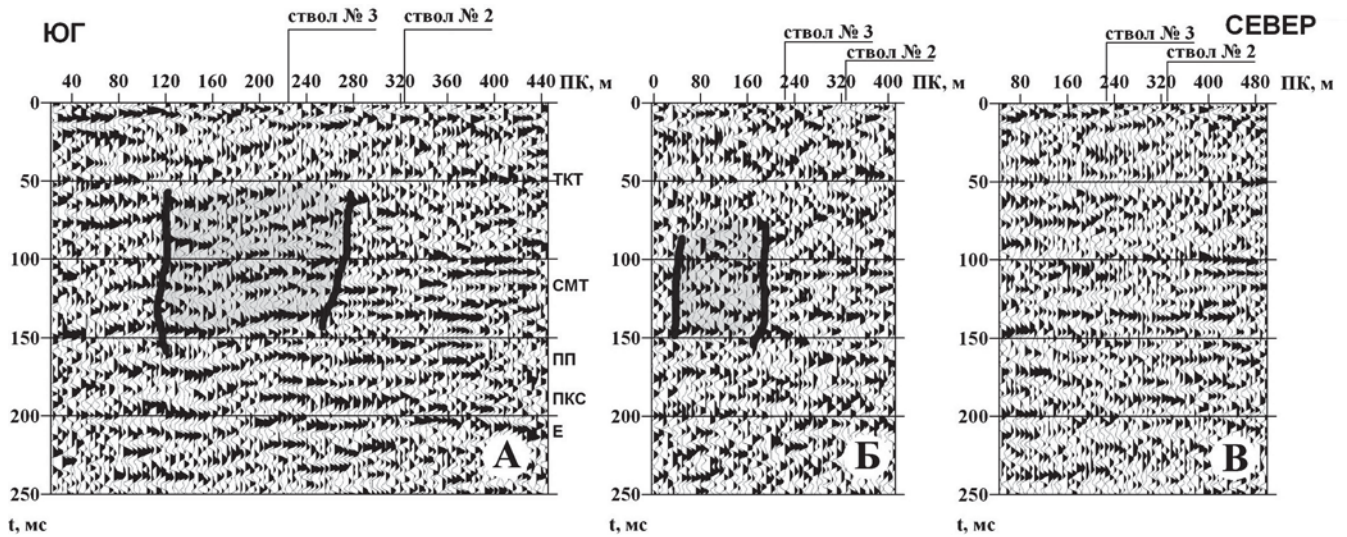


Рис. 2. Околоствольный массив. Непродольное профилирование. Суммы лучевых выборок по координатам ОГТ (А), ОПВ (Б), ОПП (В)

существенное внимание уделяется обратной и веерной фильтрациям как основным средствам борьбы с поверхностными и преломленными волнами.

При интерпретации такого набора данных, в первую очередь, выполняется стратиграфическая привязка выделенных на временных разрезах отражающих горизонтов (ОГ) (рис. 1 А). Далее проводится качественный анализ волновой картины, заключающийся в изучении рисунка суммарных сейсмозаписей и пространственно-временного распределения их динамической (см. рис. 1 Б) и кинематической (см. рис. 1 В) составляющих. Этот анализ завершается количественной оценкой аномальных зон, выделенных на основе качественного анализа. Оценка базируется как на определении скоростей распространения упругих волн, так и на степени согласованности изменений всех рассматриваемых характеристик волнового поля, измеряемой в значениях комплексного параметра [8]. Максимальные значения комплексного параметра соответствуют наиболее разуплотненным участкам породного массива.

Для продольных профильных наблюдений координаты выделенных участков соответствуют непосредственно пикетам профилей. Для непродольных — они приурочены к общему месту точек пересечения аномальных лучей из выборок по суммируемым координатам ОГТ, ОПВ, ОПП (рис. 2). Комплексирование продольных и непродольных наблюдений позволяет выполнять пространственные интерпретационные построения с детальной локализацией зон разуплотнений в непосредственной близости от ствола. Количественные оценки представляются как по профилям, так и в виде площадных и пространственных схем, обеспечивающих локализацию потенциальных путей водных потоков. На рис. 3 приведен пример подобного представления.

Судя по распределению комплексного параметра на временных срезах, в непосредственной близости от ствола № 3 прослеживается зона повышенных значений северо-западного простираения. Наиболее четко она проявляется в интервалах, соответствующих  $t=125$  и  $225$  мс. Следует отметить также наличие повышенных значений комплексного параметра в районе ствола № 1, начиная со времени в  $175$  мс. Зоны повышенных значений комплекс-

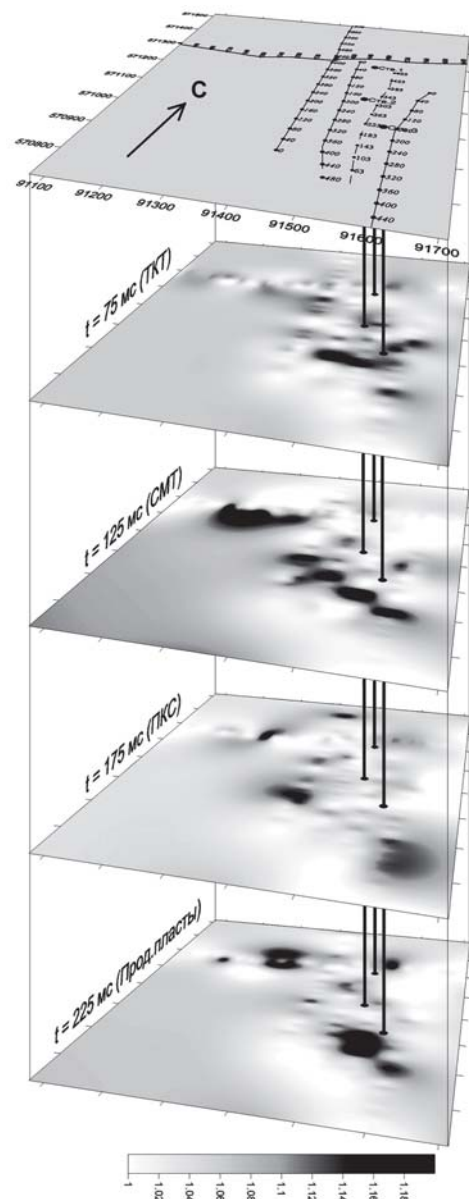


Рис. 3. Результаты интерпретации данных сейсморазведки околоствольного пространства



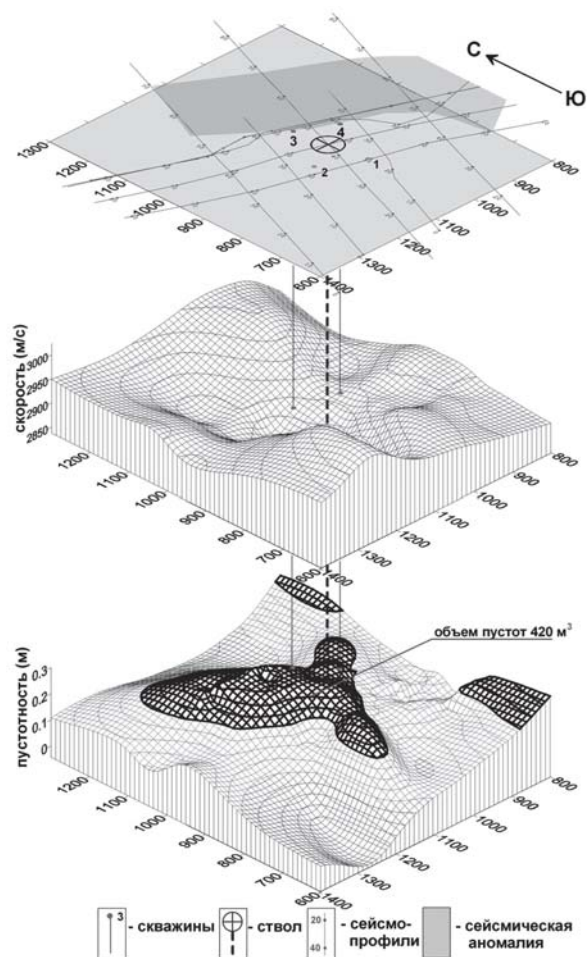


Рис. 4. Временные срезы комплексного параметра

где  $V_{cp} = \frac{h_1/V_1 + h_2/V_2}{h_1/V_1 + h_2/V_2}$  — среднего значения (1.2–1.3) северо-западного простирания отражают распределение наиболее ослабленных (трещиноватых) участков в исследуемом объеме массива и, следовательно, наиболее благоприятных для движения водных потоков. Косвенным подтверждением данного предположения служит повышенная обводненность ствола № 3, по сравнению с остальными. Количественная оценка возможного объема трещиноватости в пределах локализованных зон базируется на уравнении средней скорости:

где  $h_1$  и  $h_2$ ,  $V_1$  и  $V_2$  — предполагаемые мощности и скорости упрощенной двухфазной модели среды, справедливой для конкретного значения  $V_{cp}$  ( $V_{cp} \approx V_n$ ). Например, если принимается, что  $h_1$  — мощность не заполненных трещин, то  $V_1 = 330$  м/с, а  $V_2$  будет характеризовать скорость в плотном массиве конкретной литологической разности.

С этой целью рассчитываются площадные структурные и скоростные модели для всех выделенных на временных разрезах интервалов. На их основании и определяется объем массива со скоростью распространения упругих волн, принятой для ослабленных по механическим свойствам зон ( $V_1 \ll V_2$ ). В качестве примера подобного подхода на рис. 4 представлено распределение значений интервальной скорости ( $V_n$ ) и суммарной трещиноватости ( $h_1$ ) в интервале Гипс-Пкс (см. рис. 1), полученных при соответ-

ствующей сети наблюдений. Из их рассмотрения следует, что с северо-запада в юго-восточном направлении площадь исследований, включая ствол, пересекает низкоскоростная область. В пределах данной области сконцентрированы и волновые аномалии, подобные выделенной на представленном (см. рис. 1 А) временном разрезе.

По сейсморазведочным данным объем суммарной трещиноватости для данного интервала геологического разреза в пределах наиболее ослабленной его части оценивался в  $420 \text{ м}^3$ . Результаты последующего бурения и тампонажа массива в основном подтвердили подобный прогноз. При тампонаже удалось закачать в массив около  $300 \text{ м}^3$  бетона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голярчук Н.А. Программный комплекс цифровой обработки сейсморазведочных данных SPS-PC. — Норильск, 2003.
2. Джиноридзе Н.М. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. — СПб.-Соликамск, 2000.
3. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2001.
4. Малоглубинная сейсморазведочная станция IS-48 // Горный вестник. — 1998. — № 4.
5. Мешбей В.И. Методика многократных перекрытий в сейсморазведке. — М.: Недра, 1985.
6. Савич А.И., Яценко З.Г., Горбунов А.А. Опыт оценки качества укрепительной цементации скальных пород сейсмоакустическими методами на Ингурской ГЭС // Гидротехническое строительство. — 1977. — № 12.
7. Санфилов И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996.
8. Санфилов И.А., Пригара А.М. Использование динамических характеристик сейсмических записей для уточнения прочностных характеристик массивов горных пород // Горное эхо. Вестник Горного института УрО РАН. — 2002. — № 3.
9. Sanfirov I., Yroslavcev A., Kvitkin S., Nezdanov V. Shallow reflection seismic application for estimation of the salt massif common fracture / Proceedings of 9<sup>th</sup> meeting environmental and engineering geophysics. — Prague, 2004. — P. 021, 4P.

© Коллектив авторов, 2005

Мясоедов Н.К. (НК «Роснефть»), Кушнеров Н.Н., Попов А.Ю., Яковлев А.П. (ООО «ЛАРГЕО»)

#### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ДИФРАГИРОВАННЫХ КРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ SRME

Существующий на сегодня спектр технологий фильтрации кратных волн основан на предположении, что полезные отражения и кратные имеют разный кинематический сдвиг. Это позволяет на больших удалениях применить такие методы, как F-K фильтрации и преобразование RADON для дискриминации помех.

Метод адаптивной фильтрации — Surface Related Multiple Elimination (SRME), основанный на волновом уравнении, моделирует и предсказывает кратные волны без создания модели среды. Дополнительным преимуществом является тот факт, что моделирование можно провести без информации о начальном импульсе и коэффициентах отражения дна.

Процесс фильтрации выполняется как адаптивный, в котором отражающие свойства оцениваются, а выходные сейсмограммы с подавленными кратными отражениями рассматриваются как выход инверсии. Как результат тех-

нология SRME обеспечивает подавление предсказанных кратных волн, образованных отражениями в слое дно-поверхность моря методом адаптивной фильтрации, и выделение сигнала с минимальной энергией. Важным достоинством технологии является эффективность ее применения для сложных сред, в которых сложно дискриминировать кратные по скоростям отражения от геологических границ.

Компанией «ЛАРГЕО» выполнено тестирование технологии SRME при обработке сейсмических данных 2D морской съемки по проекту «Туапсинский прогиб» в восточной части Черного моря. Район съемки характеризуется крайне сложно-построенными тектоническими складчатыми комплексами с интенсивным кратнообразованием, осложненным переменным профилем дна. Следует отметить, что разрез на временной сумме при изменении рельефа дна существенно осложнен дифрагированными кратными. В разработанном графе для массовой производственной обработки применялось высоко разрешающее преобразование Радона. Эффективность применения данного метода достаточно высока, однако в зонах преобладания дифрагированных кратных в силу их явной негиперболичности и ограничений преобразования Радона, связанных с апертурой, остаточная амплитуда кратных все еще высока. Это в значительной степени препятствует выделению полезных сейсмических отражений для построения геологической модели среды после проведения временной миграции до суммы Pre-Stack TM и оценки AVO/AVA аномалий на целевых горизонтах. На рис. 1 показана сейсмограмма ПВ из области профиля 2D, осложненного дифрагированными кратными отражениями до проведения процедур подавления кратных (А), после по-

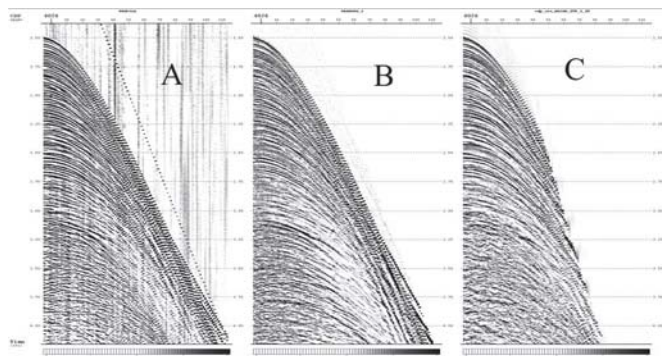


Рис. 1.

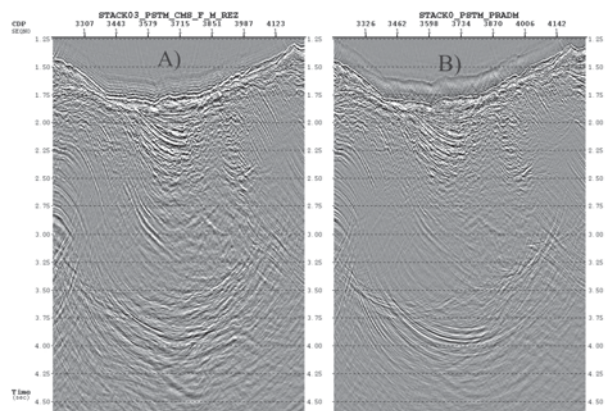


Рис. 2.

давления кратных с помощью преобразования HR Радона (В) и после применения SRME (С). Отмеченная интенсивная кратная на TWT=3.1s подавляется более эффективно после применения SRME. Подавление помехи на меньших удалениях с применением SRME относительно преобразования Радона можно рассматривать как более эффективное, что позволяет при суммировании получить лучшее отношение сигнал-шум.

Фрагмент суммарного разреза после применения миграции до суммы PSTM с фильтрацией кратных показан на рис. 2: подавление кратных с применением технологии SRME (А), Радона (В).

Увеличение объема сейсмических работ в зонах шельфов и континентальных склонов с переменным профилем дна вынуждает к поиску новых технологий подавления кратных. Продемонстрированный новый подход на основе SRME позволяет выполнять эффективное подавление кратных волн в сложных средах, где стандартные методы работают недостаточно эффективно.

© Коллектив авторов, 2005

Владов М.Л., Калинин В.В., Старовойтов А.В., Шалаева Н.В. (МГУ)

### ОПЫТ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙ

В настоящее время продолжают возрастать объемы производства свай для закрепления массива грунтов и создания оснований. Только в Москве общая длина изготовленных свай за год достигает нескольких сотен километров. Известны многочисленные технологии изготовления свай, отличающиеся как составом наполнителя, так и технологией изготовления. Например, одной из таких технологий является устройство свай «TurboJet» в грунте с помощью струйной цементации. В лидерной скважине используется энергия высоконапорной струи цементного раствора для одновременного разрушения и перемешивания грунта с цементным раствором прямо на месте (по международной терминологии «mix-in-place»). После твердения раствора образуется новый материал — грунтобетон, обладающий более высокими деформационными и прочностными характеристиками, чем вмещающий грунт. В наиболее полном виде и наиболее удачно сущность этой технологии, ее преимущества по сравнению с другими, расчеты свай и примеры применения изложены в работах А.Г. Малинина [2–4], имеющего большой опыт производства таких свай в различных условиях.

Область применения грунтоцементных свай чрезвычайно широка. Сюда относятся ограждение бортов котлована, повышение устойчивости откосов сваями-шпонками, укрепление фундаментов зданий и сооружений, полотна строящихся дорог и многое другое.

Одним из преимуществ такой технологии устройства свай заявлена «чрезвычайно высокая предсказуемость результатов укрепления грунтов» и «возможность ... достаточно точно рассчитать геометрические и прочностные характеристики создаваемой подземной конструкции...» [4]. Действительно, в этом направлении сделано довольно много. Получены обобщенные зависимости пределов

прочности на сжатие материала сваи от количества цемента на кубометр сваи для литологических и гранулометрических разностей несвязных грунтов от глин до гравия. Имеются подтверждаемые в ряде случаев расчеты диаметра сваи в зависимости от типа грунта и технологических параметров изготовления сваи.

Другие технологии изготовления свай в грунте, куда относятся илоцементные, пескоцементные, буронабивные, бетонные и другие, также опираются на некоторые предварительные расчеты прочностных характеристик и форм сваи в зависимости от типа грунта, внешних условий и особенностей способа изготовления сваи.

Однако это лишь самые общие зависимости. На самом деле, практика показывает, что, по крайней мере, еще три фактора существенно влияют на прочностные характеристики и диаметр изготовленной сваи. Причем действие этих факторов может привести к результату, весьма далекому от расчетного. Сюда относятся:

наличие или отсутствие воды в разрезе — степень водонасыщенности пород, положение уровня грунтовых вод или полного влагонасыщения;

степень неоднородности грунта по разрезу для данной сваи и в плане для группы свай — чрезвычайно высока в условиях техногенных грунтов в городах;

время — малоизучен процесс твердения различных участков тела сваи — искусственного материала-грунтоцемента в зависимости от гранулометрии, обводненности, диаметра сваи, положения сваи в массиве грунтов и температуры.

Поэтому изготовители свай или заказчики проводят разнообразные мероприятия по контролю качества и «настройке» технологии изготовления в конкретных условиях. Например, перед массовым изготовлением свай на конкретном объекте устраивают опытные сваи с последующим тщательным изучением результата. Кроме того, на объектах с большим количеством свай определенный процент изготовленных свай подвергают различным видам обследования.

Одной из проблем оценки качества свай является определение предела прочности материала, распределение этого параметра по стволу готовой сваи и оценка диаметра сваи по всей ее длине. Прямые и наиболее распространенные методы определения этих параметров основаны на разбурировании подлежащей диагностике сваи по ее оси и на нескольких расстояниях по радиусу от оси с отбором керна. Таким путем достигается два результата.

Во-первых, отобранный керн поступает для прямых определений предела прочности, а во-вторых, по типу керна — грунт или материал сваи — полученного из смещенных от оси сваи скважин судят о диаметре сваи. Оба полученных результата не свободны от ошибок.

Определение предела прочности по керну представляет собой дифференциальную оценку и относится к данной точке тела сваи. В то же время, многочисленные подобные измерения, произведенные разными организациями, показывают большую или меньшую неоднородность свай по показателю предела прочности. Одной из возможных причин разбросов результатов прямых определений по керну в близких точках является хорошо известная и нерешаемая проблема соблюдения технологии отбора и хранения керна.

Описанный способ определения диаметра сваи может дать предельные оценки диаметра сваи по тому, на каком расстоянии от оси получен еще материал сваи, а на каком

уже грунт, но в отсутствие инклинометрии невозможно правильно позиционировать несколько скважин на расстоянии в первые десятки сантиметров друг от друга в теле сваи при ее длине более 10 м.

Другой прямой способ оценки диаметров и формы сваи — непосредственные измерения после откапывания. Однако этот способ можно применять далеко не всегда даже на опытных сваях, например, при укреплении уже имеющихся оснований.

Таким образом, во всех перечисленных случаях способы прямых измерений требуют больших затрат при отмеченной степени достоверности результата. Кроме того, указанные прямые способы определения прочностных характеристик и формы свай являются одномоментными и уже не могут быть повторены через некоторое время.

С целью сокращения объемов бурения и количества откапываемых свай в дополнение к способам прямых измерений предела прочности материала и диаметров сваи, а также для получения возможности мониторинга предлагается сейсмоакустический метод исследований.

Для его реализации необходима одна скважина диаметром не менее 80 мм, пробуренная по оси готовой сваи и заполненная технической водой.

#### Физические основы метода.

Принцип сейсмоакустических исследований состоит в возбуждении упругих волн в заполняющей скважину жидкости и приеме в стволе скважины волн разных типов, распространяющихся по жидкости, внутренней поверхности ствола скважины, телу сваи и окружающей сваю породе. Скорости распространения этих волн, их динамические характеристики и спектральный состав несут информацию о геометрии и упругих параметрах тела сваи.

По временам пробега волн при известной геометрии расстановки и пути волн в среде вычисляется скорость распространения объемных волн  $V_p$  и гидроволн  $V_g$ , которая определяется динамическим модулем сдвига около-скважинного пространства (материала сваи)  $\mu$ , плотностью  $\rho_0$  и скоростью волн  $C_0$  в заполняющей скважину жидкости и, таким образом, связана со скоростью поперечных волн  $V_s$  и плотностью материала  $\rho$  [1,6].

$$V_g = C_0 / (1 + \rho_0 C_0^2 / \mu)^{1/2}, \quad V_s^2 = \mu / \rho.$$

В свою очередь, предел прочности материала  $\sigma_{сж}$  сваи тесно связан со скоростями распространения продольных и поперечных волн и плотностью материала [5]. Однако зависимость эта не аналитическая. Переход от значений скоростей волн и плотности материала осуществляется по корреляционным зависимостям, полученным в результате многочисленных сопоставлений с прямыми определениями предела прочности по образцам керна. Такие зависимости получены для многих типов пород и искусственных материалов. Например, в работе [5] приведено обобщенное уравнение регрессии для пород с высокой акустической жесткостью типа песчаников при коэффициенте корреляции 0,89:

$$\lg \sigma_{сж} = 0,255 V_p + 1,708.$$

Другим примером из той же работы может служить зависимость для пород с низкой акустической жесткостью типа суглинков:

$$V_p^2 = 1,36 \sigma_{сж} + 0,1.$$

Специфические зависимости  $\sigma_{сж}(V_p, V_s)$  получены для мерзлых пород [5].

Таким образом, измерения скоростей распространения упругих волн давления в скважине вдоль оси сваи позволяют определить предел прочности материала сваи на одноосное сжатие. Поскольку между материалом затвердевшей сваи и вмещающим естественным грунтом обязательно существует больший или меньший контраст акустических жесткостей, акустическая волна распространяется от источника в сторону контрастной границы и обратно. Спектральные характеристики зарегистрированных волн и знание скоростей  $V$  распространения волн двух типов (см. выше) позволяют определить времена прихода колебаний, дошедших от источника до границы между телом сваи и естественным грунтом, и на этом основании рассчитать эффективный диаметр сваи  $D$ , например, интерференционным способом по значению частоты  $F$  минимума модуля спектра:

$$D = V / (2F).$$

#### Аппаратура для производства работ [1].

На сегодняшний день, технологически наиболее удобным источником упругих волн является электрический разряд в жидкости. При протекании импульсного тока в межэлектродном промежутке образуется небольшая локализованная область перегретой жидкости с температурой до нескольких тысяч градусов, которая преобразуется в пульсирующую паро-газовую сферу с повышенным давлением внутри. Эта область генерирует сферическую акустическую волну и гидродинамические потоки. Через заполняющую скважину жидкость суммарный импульс давления передается на стенки скважины и далее в околоскважинное пространство.

Технически это может быть реализовано в виде контейнера с гибкими стенками, заполненного соленой водой, где и размещены разрядные электроды. Контейнер диаметром, не превышающим 50 мм, и длиной не более 1 м расположен на конце токоведущей магистрали — коаксиального высоковольтного кабеля диаметром 10–15 мм и свободно перемещается по стволу скважины. На поверхности токоведущая магистраль подключена к собственно

блоку возбуждения, включающему в себя накопительные конденсаторы, схему заряда, высоковольтный коммутатор, а также схему управления и синхронизации с приемно-регистрирующей аппаратурой.

Источником питания установки служит бытовая электросеть 220 В/50 Гц. Потребляемая мощность зависит от величины накопленной электрической энергии и числа циклов «заряд-разряд» в единицу времени. Необходимая электрическая энергия разряда для работы в скважинах глубиной до 50 м не превышает 150 Дж. При одном цикле в секунду, потребляемая мощность не превышает 0,5 кВт.

Прием упругих волн давления осуществляется с помощью зонда с гибкими стенками диаметром не более 40 мм и длиной не более 0.5 м, содержащего внутри пьезоприемники. Зонд размещен на конце многожильного экранированного кабеля диаметром в 5–6 мм, соединяющего приемники с регистрирующей аппаратурой на поверхности. Регистратор представляет собой цифровую систему сбора и хранения информации на базе любого стандартного аналого-цифрового преобразователя, компьютера типа «notebook» и аналогового усилителя. Общий вид аппаратуры для обследования свай представлен на рис. 1.

#### Методика производства работ.

Наблюдения проводятся по трем методикам.

В первом цикле наблюдений источник (или приемник) располагается неподвижно на забое скважины, приемник (или источник) перемещается по стволу скважины с заданным шагом, обычно не превышающим 0.5 м, до устья (потенциальный каротаж скважины).

Во втором цикле наблюдений (дифференциальный каротаж) источник и приемник фиксируются на постоянной базе, обычно в 1 м, и вся установка перемещается снизу вверх по стволу скважины с шагом 0.5 м.

В третьем цикле наблюдений производится дифференциальный каротаж на базе 2 м также с шагом между точками наблюдения в 0.5 м. Эти циклы наблюдений проводятся на каждой свае.

Имея в виду, что радиусы обследуемых свай лежат в пределах 0.5–2.0 м, а скорости распространения продольных волн лежат примерно в пределах 1500–3000 м/с, техника возбуждения колебаний обеспечивает длины волн в пределах 0.5–2.0 м. Таким образом, обеспечивается чувствительность волнового поля к свойствам материала и геометрии сваи, а также определяется выбор шагов и баз измерения.

#### Результаты сейсмоакустических измерений в скважине и лабораторных измерений на образцах керна

Глубина, м	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	Радиус, см	$\sigma$ , кг/см <sup>2</sup>	$\sigma$ , кг/см <sup>2</sup> (данные по образцам, пределы)	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> (данные по образцам, средняя)
1.0	3.56	1.23	92	90		1.74
1.5	3.28	1.14	76	77	54-61	1.74
2.0	2.73	1.11	47	88		1.76
2.5	2.73	1.24	45	92	30-44	1.78
3.0	2.64	1.00	40	66		1.75
3.5	2.56	1.06	34	80	47-47	1.72
4.0	2.82	1.07	43	75		1.76
4.5	2.42	1.28	50	111	51-54	1.80
5.0	3.03	1.34	47	148		1.85
5.5	3.28	1.27	48	119	26-48	1.90
6.0	3.28	1.08	66	111		1.92



Рис. 1. Установка для сейсмоакустических исследований качества грунтоцементных свай. На переднем плане погружаемые в скважину электроискровой излучатель и приемник колебаний

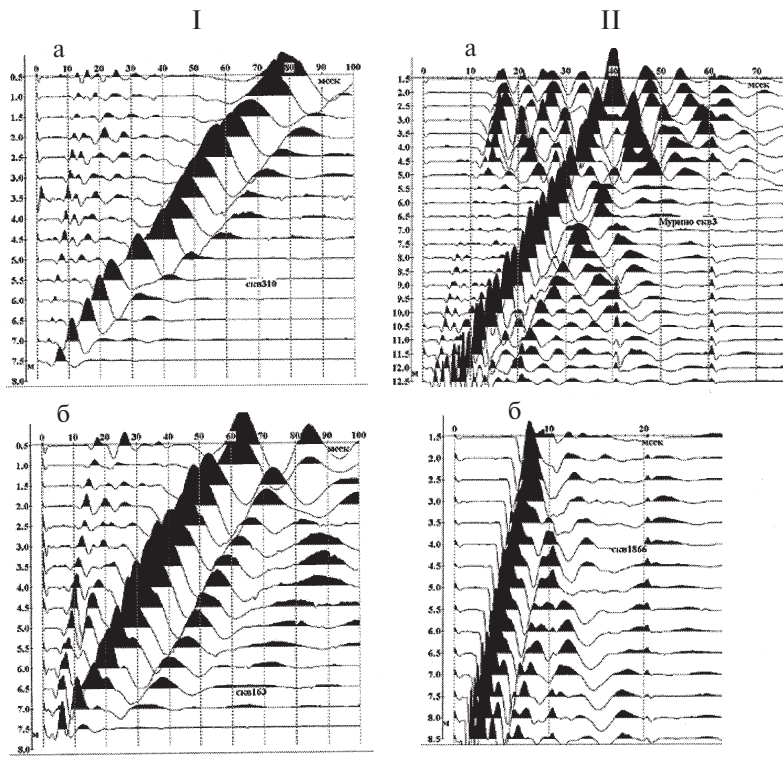


Рис. 2. Примеры волновых картин при наблюдениях с фиксированным на забое источником и перемещающимся приемником (потенциальный каротаж): I — в грунтоцементной свае (а) и пескоцементной свае (б); II — в свае TurboJet (а) и бетонной свае (б)

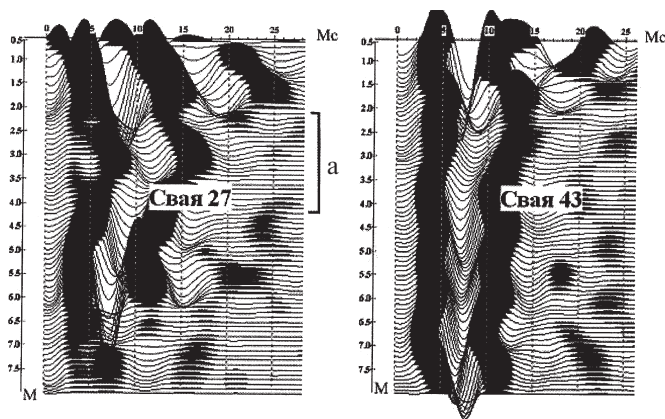


Рис. 3. Пример одного из видов волновой картины (дифференциальный каротаж) для интервала пониженных значений предела прочности (а) — свая 27 и свая 43, прочностная характеристика которой более выдержана по глубине

В результате по каждому виду полевых наблюдений регистрируются волновые картины. Уже их внешний вид показывает высокую чувствительность волнового поля к материалу сваи, форме и технологии ее изготовления. На рис. 2 приведены примеры записей при неподвижном источнике для свай различных типов. На каждом из приведенных фрагментов волновых полей отчетливо видны в первых вступлениях импульсы прямой продольной объемной волны и спустя некоторое время более интенсивные и низкочастотные импульсы гидроволны.

На рис. 3 приведены примеры волновых картин, полученных на постоянной базе

вдоль ствола скважины. Отчетливо виден интервал увеличенных времен пробега волн в материале сваи, соответственно уменьшения скорости распространения волн, соответствующего понижению предела прочности.

Результаты сейсмоакустических наблюдений по определению предела прочности материала сваи и эффективного диаметра представляются, как правило, в виде таблицы и в графическом виде. Туда же выносятся (если эти определения производились) результаты независимых прямых определений пределов прочности материала сваи по образцам керна и замеры радиусов сваи после ее откапывания, если оно производилось. Такие примеры сравнения результатов прямых замеров и сейсмоакустических наблюдений приведены в таблице и на рис. 4.

В таблице отражены результаты расчетов предела прочности материала сваи с подбором корреляционной зависимости  $\sigma(\rho, V_p, V_s)$  из литературных источников (см. ссылки в работе [5]). Более близкие к лабораторным определениям значения могут быть получены при построении «местных» корреляционных зависимостей для конкретного объекта, типа грунтов и технологии устройства сваи.

Выводы.

1. С помощью сейсмоакустического метода определяются интегральные значения предела прочности материала сваи — среднее значение для элемента сваи высотой 0.5 м.

2. Возможные большие расхождения в значениях предела прочности, установленного прямыми измерениями на образцах и по данным сейсмоакустики, определяются прежде всего принципиальными различиями между интегральной характеристикой для объема, определяемого диаметром сваи и базой наблюдений, примерно  $3.14 \times (0.3)^2 \times 0.5 \text{ м} = 0.14 \text{ м}^3$  и объема образца примерно  $3.14 \times (0.02)^2 \times 0.07 \text{ м} = 0.00009 \text{ м}^3$ . Многочисленные результаты разбуривания свай с отбором керна и прямыми определениями предела прочности материала сваи показывают, что тело сваи неоднородно по всем трем направлениям. В этих условиях интегральная характеристика может иметь существенное значение при оценке прочностных и деформационных характеристик сваи в целом.

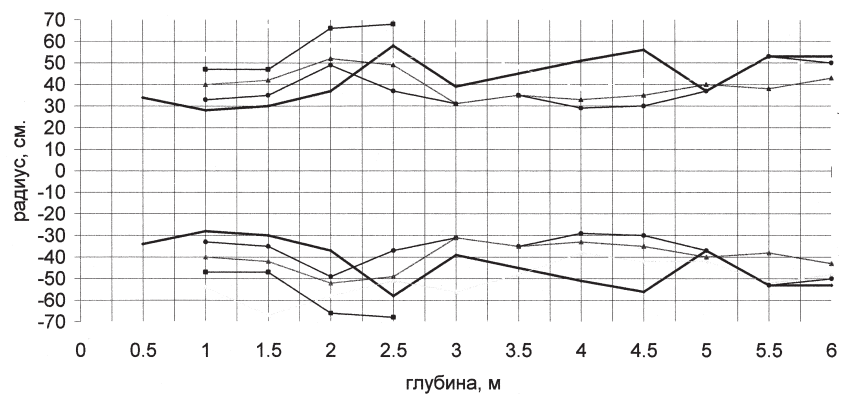


Рис. 4. Результаты определения эффективного диаметра сваи: по данным акустики (жирная линия) и прямыми измерениями радиуса откапанной сваи в по разным азимутам (тонкие линии)

3. Необходимо отметить перспективность сейсмоакустического скважинного метода для оценки эффективных диаметров свай в условиях недоступности прямых измерений.

4. Сейсмоакустический метод обследования свай через осевую водонаполненную скважину нуждается в ряде доработок. Сюда относятся прежде всего получение устойчивых корреляционных связей между значениями скоростей распространения упругих волн разных типов и прочностными характеристиками искусственных грунтов, образуемых с помощью различных технологий в различных естественных условиях, выяснение реакции волнового поля на горизонтальные неоднородности в сечении свай и методические доработки, которые должны позволить получать сведения о свае с меньшим шагом по глубине.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Калинин А.В., Калинин В.В., Владов М.Л. и др. Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки. — М.: МГУ, 1989.
2. Малинин А.Г. Применение струйной цементации в подземном строительстве. // Подземное пространство мира. — 2000. — № 2.
3. Малинин А.Г. Предварительное инъекционное закрепление грунтов при строительстве тоннелей в Перми. // Подземное пространство мира. — 2001. — №1.
4. Малинин А.Г. Применение грунтоцементных свай в городском строительстве. // Пермские строительные ведомости. — 2001. — № 4.
5. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. / Под ред. Н.Н. Горяинова. — М.: Недра, 1992.
6. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. — М.: Недра, 1986.

© Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Юдина Л.И., 2005

Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г. (Горный институт УрО РАН), Юдина Л.И. (ООО «УралГидроизоляция»)

### СЕЙСМОРАЗВЕДочНАЯ ОЦЕНКА ПРИЧИН ДЕФОРМАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ПОВЫШЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

В последнее время в объеме инженерных геофизических исследований все большее место занимают задачи, связанные с реконструкцией и ремонтом уже существующих зданий и сооружений. Приход частным инвесторам в строительную индустрию обусловил режим жесточайшей экономики на этапе проектирования для инженерно-геологических изысканий. Ну а в случае начала явных процессов разрушения уже построенных зданий и сооружений — не до экономии. Необходимо срочно определять причины деформаций и принимать эффективные конструктивные меры. Особую остроту подобные ситуации приобретают на крупных промышленных и социально значимых объектах, обычно характеризующихся наличием конструкций повышенной ответственности.

Для решения подобных задач изначально привлекательны различные методы дистанционного инструментального контроля, позволяющие получать квазинепрерывное пространственное распределение изучаемой физической характеристики и не требующие непосредственного доступа к обследуемым элементам строительных конструкций. К такого рода методам можно отнести инженерную сейс-

моразведку на отраженных волнах, реализуемую по методике многократных перекрытий [3, 5].

Интерпретационные параметры, получаемые при сейсмических наблюдениях, тесно связаны с физико-механическими характеристиками пород и чувствительны к изменению состояния и свойств пород во времени. Глубинность изучения разреза при сейсмических наблюдениях на поверхности практически не ограничена, и, в отличие от других геофизических методов, сейсморазведка наименее подвержена влиянию большого количества техногенных помех в условиях градопромышленных агломераций. Сейсморазведочные исследования можно проводить не только на дневной поверхности около самих сооружений, но и внутри их.

Возбуждение упругих колебаний производится ударными источниками малой мощности — кувалда, строительный пистолет, а регистрация колебаний осуществляется с помощью хорошо зарекомендовавших себя во всем мире сейсмоприемников фирмы ОУО. Подобный набор оборудования обеспечивает регистрацию колебаний в диапазоне частот до 2000 Гц. Значительное влияние на характеристики получаемого волнового поля оказывают качество крепления к поверхности наблюдений и условия возбуждения колебаний. В силу того, что наблюдения зачастую проходят внутри зданий, на асфальтированных площадках и даже на вертикальной поверхности, кроме обычного заглубления сейсмодатчиков, возможны различные оригинальные виды креплений: на деревянных брусках, с помощью алебаstra или «жидких гвоздей». При возбуждении упругих волн в подобных условиях можно производить удары без применения традиционной плиты-подложки [2].

Для записи сейсмической информации применяются широкодиапазонные компьютеризированные сейсмостанции IS-32, 48, 96, 128 (Латвия). Данные станции характеризуются следующими основными параметрами: диапазон рабочих частот 3–8000 Гц, динамический диапазон 96–116 дБ, длина записи 2048 дискрет при 48 каналах, число аппаратных накоплений до 64, питание 12 В, масса с компьютером и аккумулятором 6–8 кг.

Параметры систем наблюдений, как правило, выбираются на основе накопленного опыта и в соответствии с общими положениями теории интерференционного приема, т.е. с учетом целевого интервала исследований и предполагаемых размеров поисковых объектов [1, 3, 4, 5].

Граф цифровой обработки сейсморазведочных данных включает широкий набор процедур: полосовая и обратная фильтрация, расчет и коррекция кинематических поправок, учет остаточных фазовых сдвигов по программам коррекции статических поправок, вычитание наиболее интенсивных поверхностных волн-помех, коррекция формы сигнала, когерентная фильтрация. Основными результатами цифровой обработки являются окончательные временные разрезы общей глубинной точки (ОГТ), которые вместе с динамическими и скоростными разрезами составляют информационную базу этапа интерпретации. В основе интерпретации лежит литолого-стратиграфическая привязка осей синфазности, наиболее динамически выраженных на окончательных временных разрезах. По ее результатам определяется целевой для анализа интервал временного разреза. В качестве основного критерия выбора является возможность влияния особенностей

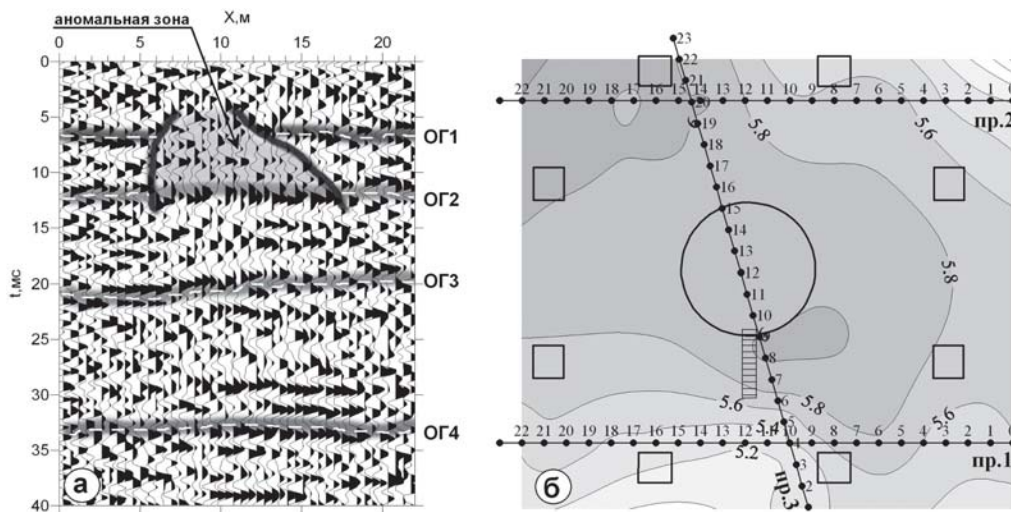


Рис. 1. Обогащительная фабрика: временной разрез (а) и структурная схема основания (б)

строения данного интервала на устойчивость обследуемой конструкции.

На рис. 1 а представлен временной разрез, полученный по профилю, пройденному в цехе обогащительной фабрики соляного рудника. Исследования выполнялись для оценки возможных причин трещин в специализированных многотонных строительных конструкциях (рис. 2). На временном разрезе выделяется целый ряд отражающих горизонтов. В соответствии с результатами анализа скоростей распространения упругих волн, они находятся на различных глубинах от поверхности бетонного пола цеха: 1) 2,5–3 м, 2) 5–6 м, 3) 12–13 м, 4) 20–21 м. Первый и второй ОГ приурочены к основанию цеха и носят «техногенный» характер. Начиная с 3 ОГ, регистрируются геологические границы в отложениях, подстилающих здание цеха. В интервале пк 6–17 для 1 и 2 ОГ отмечается нарушение их горизонтального прослеживания и повышенное затухание.

Отмеченные особенности волновой картины могут быть вызваны наличием разуплотнений в «техногенных» отложениях основания цеха, которые, в свою очередь, могут являться причиной деформаций обследуемых строительных конструкций. Для их локализации выполнены площадные построения. Анализировались закономерности распределения не только физических свойств «тех-



Рис. 2. Обогащительная фабрика: конструкция повышенной ответственности — чаша сгустителей

ногенных» отложений, но и гипсометрия вмещающих и подстилающих отражающих границ. Необходимость учета структурного фактора очевидна в связи со значительным весом и высотой конструкций. Данные особенности (см. рис. 1 б) строения активной зоны подстилающих строительную конструкцию отложений учитывались в расчетной схеме деформаций, необходимой для разработки проекта усиления.

Следующий пример интересен взаимосвязью конструктивных дефектов и

техногенных инженерно-геологических процессов, вызывающих прогрессирующие нарушения целостности строительной конструкции. На рис. 3 а представлен временной разрез МОГТ, полученный по профилю, пройденному в бетонном резервуаре фильтра-отстойника водоочистных сооружений. На временном разрезе (пк 20–27) по нарушению слежения отражающих горизонтов прослеживается сквозная зона. Она приурочена к известному участку максимальной трещиноватости стенок резервуара.

Анализ структурных особенностей отражающих границ в отложениях, подстилающих резервуар, показал наличие «русла» (см. рис. 3 б) в перекрывающих коренные породы суглинках. На его формировании сказались как поведение кровли коренных пород, так и постоянные водные утечки. Положение и физико-механические свойства данной особенности строения приповерхностных отложений закладывались в расчетную схему при разработке проекта восстановления гидроизоляционных свойств резервуара.

К разряду наиболее ответственных относятся строительные конструкции, расположенные в пределах нефтеперерабатывающих предприятий. Очевидно, что здесь деформационные процессы могут привести не просто к разрушению самой конструкции, но и к непоправимым экологическим последствиям. На одном из подобных объектов в течение длительного времени наблюдались процессы трещинообразования, оцениваемые первоначально как признаки обычного износа конструкции, вызванного временным фактором. Но поскольку строительные-косметические меры не имели сколько-нибудь длительного эффекта, а процессы разрушения стали приобретать устойчивую динамику, возникла необходимость оценки и основания здания.

По результатам качественной интерпретации волновой картины (рис. 4 а) и скоростного анализа (см. рис. 4 б) в интервале глубин от земной поверхности до 5 м выделена ослабленная по физическим свойствам зона (пк 20–40), проходящая под широкой частью здания. Данная зона приурочена к прогибу структурной геологической границы на глубине 5–6 м, вероятно, вызвана техногенными водными перетоками. В ее пределах отмечается снижение упругих свойств до уровня разрыхления с об-

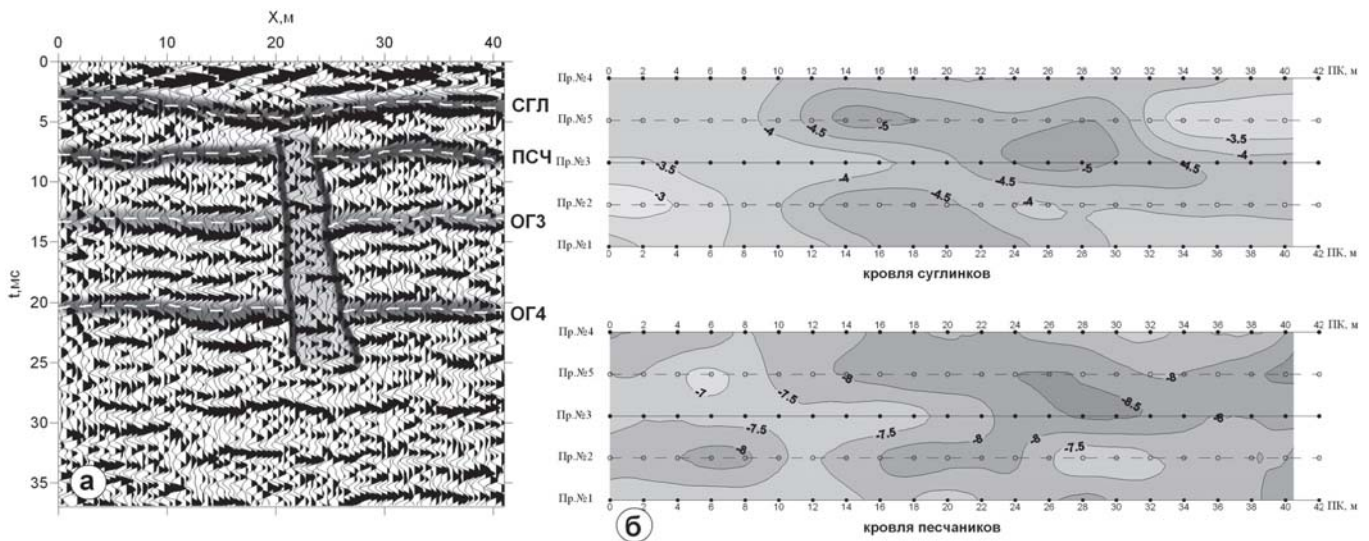


Рис. 3. Водозабор: временной разрез (а) и структурные схемы отражающих горизонтов в основании резервуара (б)

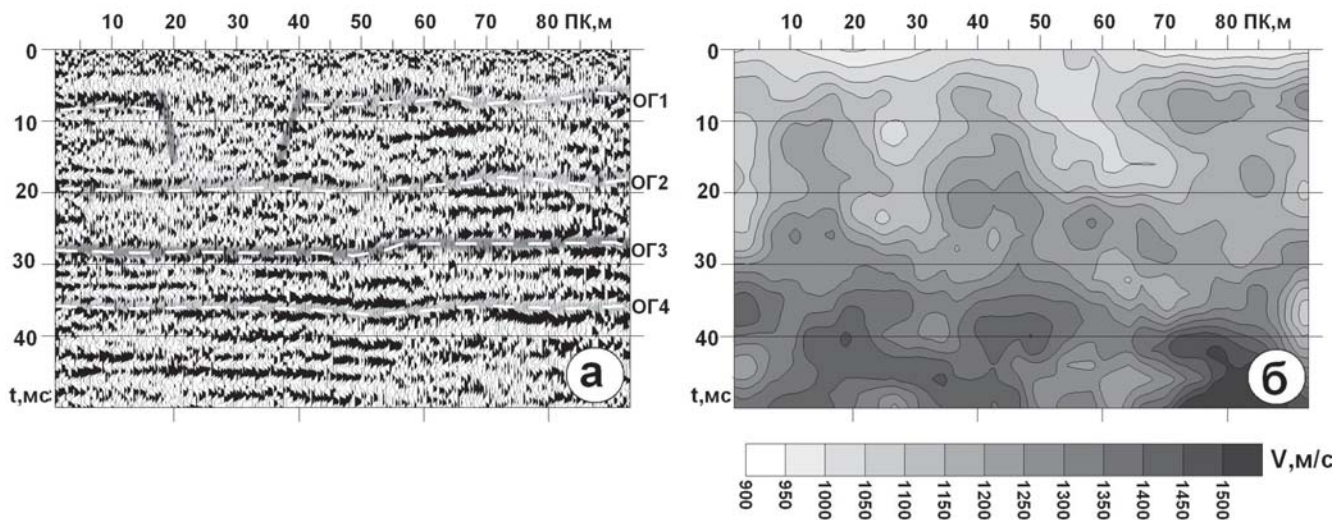


Рис. 4. Цех химреагентов: временной разрез (а) и его скоростная характеристика (б)

разованием суммарной пустотности в 0,3–0,4 м на интервале 5–6 м. Резкое изменение упругих свойств на участке ПК 40–50, вероятно, вызвано неравномерной нагрузкой в основании конструкции в районе сочленения широкой и узкой частей здания. Выявленные по сейсморазведочным данным особенности строения породного массива в основании здания позволили выработать ряд защитных мер по предотвращению дальнейшего разрушения здания и внести коррективы в проект его реконструкции.

Представленные примеры иллюстрируют наиболее типичные ситуации из нашего опыта инженерно-геофизических исследований на подобного рода объектах. Полученная с их помощью информация обеспечила принятие оптимальных проектных решений, результативность которых прошла испытание временем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Санфилов И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996.
2. Санфилов И.А., Фатькин К.Б. Сравнительный анализ различных типов невзрывных источников для малоглубинной сейсморазведки / Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы региональной конференции. — Пермь: Перм. ун-т, 1997.
3. Санфилов И.А., Ярославцев А.Г. Применение методик многократных перекрытий при решении инженерно-геологических задач / 300 лет горно-геологической службе России: Тез. докл. международ. геофизич. конфер. — СПб., 2000.
4. Санфилов И.А., Ярославцев А.Г. Опыт применения сейсморазведки ОГТ для решения инженерно-геологических задач // Геофизика. — 2004. — № 3. — ЕАГО.
5. Санфилов И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И., Прийма Г.Ю., Пригара А.М., Возможности сейсморазведки отраженными волнами для решения задач инженерно-строительных изысканий / Проблемы и задачи инженерно-строительных изысканий: Тез. докл. конферен. — Пермь, 2005.



**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ  
УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВ В МАССИВЕ**

Полевые методы для оценки поведения грунтов при динамических воздействиях можно разделить на три группы: сейсмоакустические, вибрационные и геотехнические, которые различаются как набором оцениваемых показателей, так и способом их получения. Сейсмоакустические методы предназначены для получения показателей упругих и диссипативных свойств грунтов по скоростям, амплитудам и спектральному составу сейсмических волн. Результаты этих исследований долгое время достаточно свободно использовались в проектировании при расчете колебаний сооружений на упругих или вязко-упругих основаниях. Однако измеряемые сейсмоакустическими методами показатели недостаточны для адекватной характеристики реакции динамически чувствительных дисперсных грунтов на переменные воздействия. Если существует возможность тиксотропного разупрочнения связных грунтов или разжижения песчаных и слабосвязных разностей, недостаточно определить их упругие и диссипативные показатели, и требуется оценка возможной степени изменения прочности и несущей способности грунтов основания при динамической нагрузке для последующего учета в проектировании. Тем не менее, сейсмоакустические методы могут с успехом применяться для решения этой задачи в комплексе с другими современными полевыми и лабораторными методами инженерной геологии.

Один из потенциально перспективных путей такого комплексирования — непосредственное использование данных полевых сейсмоакустических измерений для получения критериев динамической неустойчивости грунтов на основе эмпирических корреляционных зависимостей. Так, в основе методики оценки потенциала разжижения песков по скоростям поперечных волн на основе данных сейсмондирования, лежит экспериментально полученная аналогия с предложенным Г.Б. Сидом [5] методом определения приведенного циклического сопротивления разжижению (CRR) песка по результатам испытаний на стандартную пенетрацию. Затем эта величина сопоставляется с расчетным значением приведенного циклического напряжения сдвига (CSR) по разрезу при землетрясении с заданным периодом повторяемости. И если ожидаемое циклическое напряжение превышает циклическое сопротивление грунта, можно ожидать его разжижения при сейсмическом толчке данной силы.

Использование скорости поперечных волн  $V_s$  в качестве полевого индекса разжижаемости основано на том, что как  $V_s$ , так и CRR в значительной мере определяются величиной эффективных сжимающих напряжений, пористостью грунтов, историей их нагружения и геологическим возрастом отложений. Полученные разными авторами зависимости между разжижаемостью грунтов (в терминах CRR) и скоростью поперечных волн с учетом влияния природного давления для несвязных грунтов были проанализированы с привлечением обширного полевого материала по 26 землетрясениям и более чем 70 площадкам из-

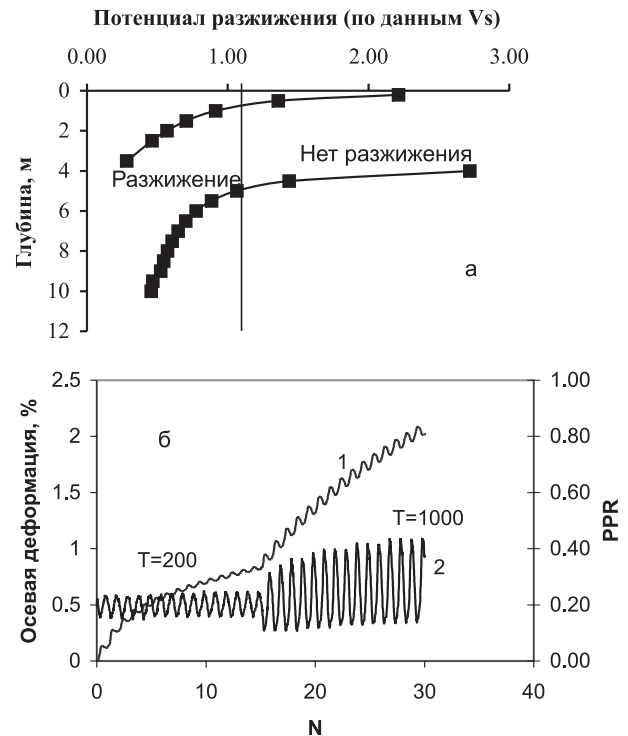
мерений. В результате была предложена следующая зависимость [4]:

$$CRR = a \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right),$$

где  $V_{s1} = V_s \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.25}$  — скорость поперечных волн с учетом

влияния природного давления  $\sigma'_v$ ;  $V_{s1}^*$  — критическое для проявления разжижения значение скорректированной скорости поперечных волн  $V_{s1}$ ;  $a$  и  $b$  — параметры кривой (рекомендуется принимать  $a=0,022$  и  $b=2,8$ ).

Эта методика была опробована нами при оценке потенциала разжижения песков на некоторых площадках о. Сахалин. Так, для одной из таких площадок по данным статического зондирования в интервале глубин 4–5,4 м, а возможно и глубже был установлен слой потенциально разжижаемых грунтов. Результаты оценки потенциала разжижения по величине скоростей поперечных волн свидетельствуют о возможности разжижения песков в диапазоне 0,5–3,5 м и глубже 5 м для землетрясений с периодом повторяемости 200 лет (рис. 1 а) и практически всей 10-метровой толщи песков кроме прослая суглинков — при землетрясении с периодом повторяемости 1000 лет. Но лабораторные динамические испытания на образцах этих песков средней крупности при плотности скелета, соответствующей условиям естественного залегания, напротив, указывают на их неразжижаемость (см. рис. 1 б) при ожидаемых землетрясениях, хотя можно ожидать накопления ошугитых сдвиговых деформаций. Отмеченные расхождения результатов разных методов могут, на наш взгляд, отражать территориальную специфичность той



**Рис. 1.** Изменение потенциала разжижения песков средней крупности с глубиной: по данным пластовых скоростей поперечных волн для землетрясения с периодом повторяемости  $T=200$  лет (а) и по результатам динамических испытаний (б): 1 — кинетика роста деформации, 2 — относительного порового давления

базы данных, которая положена в основу принятой сегодня схемы расчета CRR по  $V_s$ , но не исключают ее дальнейшего уточнения для выявления динамически чувствительных отложений.

Второй путь — использование данных полевых сейсмических наблюдений для оценки реальных параметров волн напряжений, распространяющихся от различных источников, в массивах грунтов. При переходе волны (кроме гармонической) из фундамента в грунт не только понижается ее преобладающая частота за счет фильтрующих свойств среды, но и возникают упругие волны разного типа. Энергия воздействия распределяется некоторым образом между этими волнами, характеризующимися разным затуханием и имеющими, следовательно, разный эффект на грунты в разных точках массива. При опирании машин на свайные фундаменты в силу разной жесткости концевой и головной части сваи различными будут и параметры уходящих в грунт колебаний. Для машин ударного и нерегулярного действия форма и параметры генерируемых ими сейсмических волн вообще меняются непредсказуемо с удалением от источника.

Для экспериментальной оценки прочности и деформируемости грунтов оснований таких объектов требуется обеспечить: 1) непосредственное измерение параметров волн напряжений в массиве и 2) корректное их воспроизведение в эксперименте. Для решения указанных задач на участке Самотлорского нефтяного месторождения в Западной Сибири — территории с многочисленными источниками вибраций от тяжелого транспорта, нефтедобывающего и перекачивающего оборудования вблизи компрессорных станций и автодорог выполнены сейсмические наблюдения, включавшие: 1) измерение вибраций по трем компонентам для получения скоростей смещения частиц грунта в сейсмических волнах; 2) малоглубинные сейсмические наблюдения; 3) измерение вибраций в скважинах для определения зависимости интенсивности колебаний от глубины. Сеть точек измерений разбивалась из соображений обследования направлений от источника вибраций и максимально равномерно распределенных точек по полю обследования. В каждой точке располагалась трех-

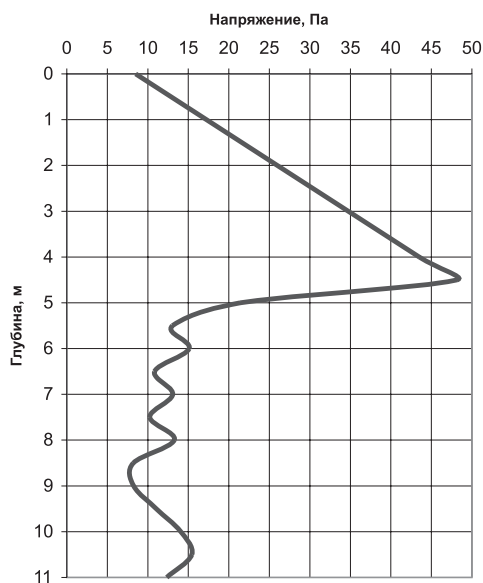


Рис. 2. Распределение напряжения в сейсмической волне от газлифтной компрессорной станции КС-2 с глубиной по скважине

компонентная установка из трех взаимно перпендикулярных сейсмоприемников, зафиксированных в слое почвы. Для скважинных измерений использовалась установка на основе сейсмоприемника СВ-20, которая помещалась в водонаполненную скважину и перемещалась с шагом 0,5 м.

Анализ результатов показал, что приповерхностные сейсмогеологические условия территории выдержаны, и среда от поверхности до 10 м по глубине представляет собой двухслойный разрез. Получено, что компрессорные станции разной мощности, трубопроводы и автодороги с тяжелым транспортом генерируют в приповерхностном слое сейсмические волны, среди которых наибольшую долю энергии (более 86 %) источника переносит поверхностная волна. При характерной центральной частоте колебаний 25 Гц и скорости распространения 180 м/с длина волны составляет немногим более 7 м. Максимальные напряжения в сейсмической волне от компрессорной станции приурочены к границе между выделенными слоями (рис. 2). От поверхности до этой границы интенсивность возрастает почти в 10 раз, затем спадает в интервале 1–2 м практически до значений, характерных для поверхности. Далее, на фоне вариаций, связанных в основном с ошибкой измерений, интенсивность колебаний спадает с глубиной практически по линейному закону с градиентом  $-1,25$  Па на 1 м. Таким образом, экстраполируя график ниже забоя измерительной скважины, можно сказать, что на глубинах ниже 15–16 м напряжения в грунтах, вызванные работой компрессорной станции будут стремиться к нулю.

Полученный результат измерений в скважинах можно использовать для построения карт-срезов на различных глубинах. Для этого значения характеристик волны на карте, построенной по поверхностным наблюдениям, должны быть умножены на коэффициент, представляющий собой отношение напряжений на заданной глубине к значениям на поверхности в соответствии с экспериментальным графиком. Для построения карт пиковых напряжений на фронте волны от разных источников (рис. 3) измеренные значения скоростей смещения  $V$  (м/с) частиц были пересчитаны в напряжения  $\sigma$  (Па) в соответствии с выражением:

$$\sigma = \rho \cdot C \cdot V,$$

где  $\rho$  — плотность грунта в приповерхностном слое ( $\text{кг/м}^3$ );  $C$  — скорость распространения волны (м/с).

Опираясь на карты распределения напряжений по площади на заданной глубине вблизи того или иного источника воздействия, можно перейти к моделированию динамической нагрузки в лабораторном эксперименте. Однако остаются три существенных вопроса.

1. На некотором удалении от источника (невозможно провести измерения непосредственно под фундаментом установки) зафиксированные значения напряжений на фронте сейсмической волны даже от наиболее мощных агрегатов не превышают 120–140 Па. Накоплением пластических деформаций в этом — упругом диапазоне нагрузок — можно пренебречь. Однако измеренные напряжения не соответствуют такому непосредственно вблизи сваи или под фундаментом.

2. Каким образом корректно моделировать воздействия со сложной формой волны, например, нерегулярные, генерируемые многими техногенными источниками?

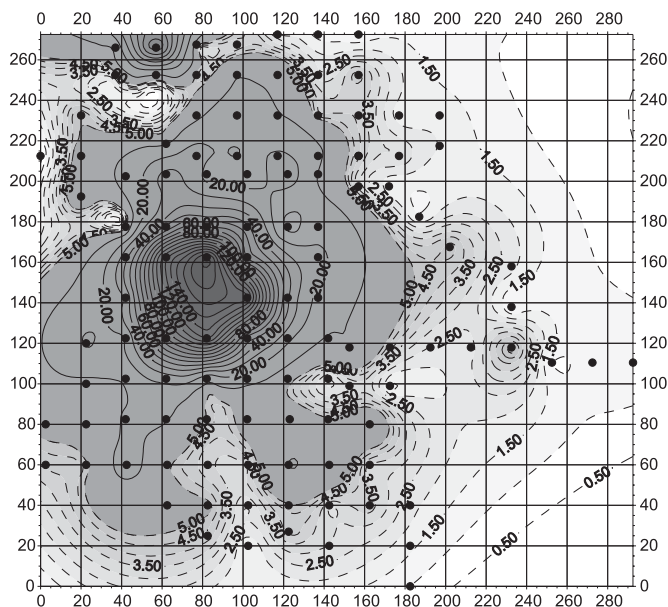


Рис. 3. Карта распределения напряжений в поверхностной волне (горизонтальная компонента, проекция вектора на горизонтальную плоскость) вблизи газлифтной станции. Изолинии проведены: основные через 10 Па, промежуточные через 0,5 Па

3. Технические источники вибрации характеризуются весьма высокой длительностью (многие годы) динамического воздействия на грунты основания. Каким образом корректно моделировать такое воздействие в лабораторном эксперименте разумной продолжительности?

Ответ на них предлагает разработанный нами в последние годы [2]; (Вознесенский, 1995, 2000) энергетический подход в динамике грунтов. С позиций энергетики процесса динамического нагружения грунта естественной мерой его динамической устойчивости является суммарная величина энергии, рассеянная единицей объема грунта во всех циклах воздействия к заданному уровню деформирования или моменту разрушения, и чем выше эта величина, тем более динамически устойчив грунт. Эта суммарная энергия на единицу объема грунта (удельная рассеянная энергия) может быть рассчитана по площади петли гистерезиса в лабораторном эксперименте при достаточной скорости регистрации напряжений и вызываемых ими деформаций. Критический уровень удельной рассеянной энергии должен быть сопоставлен с энергией от источника воздействия, рассеянной грунтом в массиве за заданный интервал времени. Задача, следовательно, сводится к оценке энергии, рассеиваемой грунтом за единицу времени.

Для расчета потока энергии вибраций от компрессорных станций по результатам сейсмоакустических измерений были построены карты плотности потока энергии через поверхность земли и проведены измерения в скважине, характеризующие распределение интенсивности воздействия по глубине. Результаты измерения скорости смещения частиц на поверхности показали, что воздействие от насосной станции представляет собой практически гармоническое колебание с узким амплитудным спектром с центральной частотой  $f_0 = 25$  Гц. Таким образом, функцию скорости смещения частиц в волне от насосной станции можно представить в виде

$$V(t) = A \sin(2\pi f_0 t).$$

Поток энергии  $W$ , переносимый волной со скоростью смещения частиц на фронте  $V(t)$  через единицу площади за время  $t$ , равен [3]:

$$W = \rho C \int_0^t V^2(t) dt,$$

где  $C$  — скорость распространения поверхностных волн, м/с;  $\rho$  — характерное значение плотности грунтов в приповерхностной части разреза, кг/м<sup>3</sup>. Делая соответствующие подстановки, получим:

$$W = \rho C A^2 \left( \int_0^t \sin^2(2\pi f_0 t) dt \right) / 2\pi f_0.$$

Взяв верхний предел интегрирования в 1 с и произведя интегрирование, получим значение плотности потока мощности сейсмической волны (Вт/м<sup>2</sup>) в точке наблюдений:

$$\frac{W}{t} = \rho C A^2 / 2.$$

Анализ построенных карт потока мощности показал, что вблизи мощных компрессорных газлифтных станций, использующихся для поддержания давления в нефтеносном пласте, их влияние ограничено расстояниями 60–80 м в плане и 15–16 м по глубине. Вне этого объема плотности потока мощности не превышает 0,0001 Вт/м<sup>2</sup>. На территории перекачивающих станций влияние каждого из компрессорных блоков в плане ограничивается расстоянием 60–80 м, но для двух совмещенных блоков распространяется на площадь 180×180 м в плане (рис. 4) при той же глубине влияния 15–16 м. Влияние автодороги на существующее в верхней части массива грунтов поле напряжений в перпендикулярном к оси дороги направлении сказывается на расстоянии до 100 м. Характерные значения плотности потока мощности от изученных источников оказались следующими: компрессорная станция (газлифтная) — 0,005–0,006 Вт/м<sup>2</sup>; компрессорная станция,

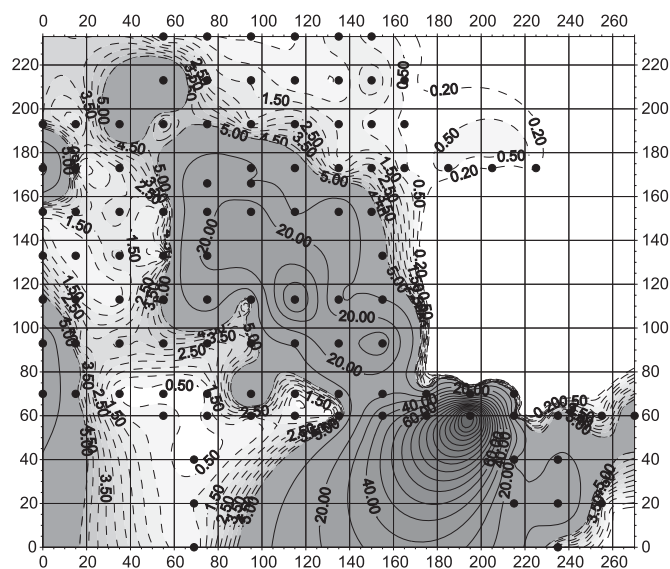


Рис. 4. Карта потока мощности поверхностной волны (горизонтальная компонента, проекция вектора на горизонтальную плоскость) вблизи компрессорной станции. Изолинии проведены: основные через  $10 \cdot 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>, промежуточные  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>, дополнительная  $0,2 \cdot 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup>

перекачивающая 0,04–0,05 Вт/м<sup>2</sup>; автодорога — 0,007–0,01 Вт/м<sup>2</sup>. Различия в мощности воздействия от разных источников в приповерхностных частях массивов определяются не только интенсивностью возбуждаемых колебаний, но и особенностями фундаментов установок. Так, газлифтные компрессорные станции на изученной территории располагаются на массивном фундаментном блоке-ростверке, опирающемся на висячие сваи, и значительная часть сейсмической энергии от вертикальной моды колебаний уходит непосредственно в глубину массива с концевой части сваи, не формируя поверхностной волны.

На основании этих данных проведено интегрирование потока энергии через основания и боковую поверхность неправильных цилиндров, основаниями которым служат площадки, ограниченные выбранными изолиниями на поверхности вокруг каждой из станций, а высота образующей равна 11 м (значимая глубина проникновения поверхностной волны). Площадь оснований вычислялась как площадь поверхности внутри выбранной изолинии, а поток энергии (Вт) определялся как

$$W_{\text{осн}} = \sum (ds \cdot dW),$$

где  $ds$ , м<sup>2</sup> и  $dW$ , Вт/м<sup>2</sup> снимались с карты плотности потока энергии в изолиниях. Поток энергии через боковую поверхность цилиндра определялся из

$$W_{\text{бок}} = \sum (L \cdot dh \cdot W \cdot K(h)),$$

где  $L$ , м — длина изолинии;  $dh$ , м — шаг по глубине (равен 1 м — шагу наблюдений в скважине);  $W$ , Вт/м<sup>2</sup> — значение изолинии на поверхности;  $K(h)$  — коэффициент изменения плотности потока энергии с глубиной.

В итоге выделяемая за счет вибраций станции мощность в объеме при описанной методике оценки составила:

для газлифтной компрессорной станции — выбранная для оценки изолиния 65,5 мВт/м<sup>2</sup> имеет длину 233 м. При глубине оценки до 11 м оценочный объем составляет около 47 500 м<sup>3</sup>. Выделяемая мощность вибраций в этом объеме составляет примерно 1000 Вт;

для перекачивающей станции (для каждого из 2 агрегатов оценки примерно одинаковы) выбранная для оценки изолиния 165,5 мВт/м<sup>2</sup> имеет длину 365 м. При глубине оценки до 11 м оценочный объем составляет около 116 200 м<sup>3</sup>. Выделяемая мощность вибраций в этом объеме составляет примерно 30 000 Вт.

Таким образом, удельная энергия воздействия, приходящаяся на единицу рассматриваемого объема, составит 1,8 и 22,3 кДж/м<sup>3</sup> в сут., соответственно. Далее для сопоставления с экспериментальными критериями динамической устойчивости требуется оценить долю поглощенной, т.е. рассеянной грунтом, энергии воздействия. Такая оценка предполагает наличие сведений о характеристиках затухания грунтов (коэффициентов поглощения), которые могут быть заданы из некоторых общих соображений (как часто делается при расчете колебаний фундаментов на уровне не более 5%), либо получены экспериментально, что, конечно, предпочтительнее. Затем, умножая падающую энергию на коэффициент поглощения и на продолжительность воздействия, получим тот уровень рассеянной энергии, который должен быть сопоставлен с экспериментально полученным критическим. Оценивая динамическую устойчивость грунтов в энергетических терминах и, пола-

гая коэффициент поглощения функционально зависимым от уровня деформации, а рассеянную энергию — аддитивной с точки зрения накопления «повреждений» структурных связей грунта величиной, эксперимент может быть резко сокращен по сравнению с реальной длительностью воздействия за счет повышения уровня действующих напряжений.

При оценке поглощающих свойств грунтов для последующего расчета деформаций естественных или искусственных оснований, вызванных динамическими нагрузками от сооружений или других источников, необходимо учитывать, что суммарное поглощение волн напряжений складывается из двух частей (без учета релаксационного поглощения): 1) частотно-зависимого поглощения за счет неидеальной упругости среды и 2) поглощения за счет развития необратимых — пластических деформаций грунта, которое во многих ситуациях можно принять частотно-независимым в некотором заданном диапазоне частот. Соотношение между энергетическими потерями за счет этих двух механизмов поглощения определяется, в первую очередь, уровнем волн напряжений от источника, особенно на границе раздела «фундамент-грунт».

Одним из приемов определения параметров частотно-зависимого поглощения упругой энергии воздействия на различные грунты является метод отношения модулей спектров сейсмических сигналов, прошедших разный путь в грунте. Материалом для таких расчетов могут служить, например, импульсы волн, отраженных от кровли и подошвы пласта, импульсы прямых волн при различных расстояниях между источником и приемниками. Более сложные приемы определения параметра поглощения связаны с преломленными и рефрагированными волнами.

Наш опыт показывает, что для его определения можно использовать результаты лабораторных ультразвуковых измерений на образцах грунта при нескольких базах измерений при прохождении как продольных Р-волн, так и поперечных горизонтально поляризованных SH-волн. Отдавая себе отчет в том, что результаты ультразвуковых измерений отличаются от результатов измерений на частотах в первые десятки Герц, и опираясь на довольно хорошо изученные вопросы дисперсии упругих волн, мы получаем результаты, пригодные для оценки поглощения не хуже, чем с 10% точностью. В основу положено представление о том, что отношение модулей спектров двух сигналов, прошедших разный путь в поглощающей среде можно записать в виде:

$$S_1(\omega) / S_2(\omega) = K e^{-\beta Z},$$

где  $K$  — множитель, учитывающий не частотно-зависимые потери энергии волн и изменение амплитудных характеристик приемного тракта;  $\beta$  — поглощение в среде на пути  $Z$ . Предполагая линейную зависимость поглощения от частоты  $\beta(\omega) = \beta_0 \omega$ :

$$\ln(S_1(\omega) / S_2(\omega)) = -\beta_0 \omega Z + C,$$

где  $C$  — константа, а  $(-\beta_0 Z)$  — угловой коэффициент — производная аппроксимирующей прямой (рис. 5). Поскольку  $Z$  — известно, определяется  $\beta_0$  — параметр поглощения, свойство среды.

Таким образом, имея в виду, что энергия пропорциональна квадрату модуля спектра, для оценки ее убывания необходимо удвоить значение  $\beta_0$  и выбрать центральную

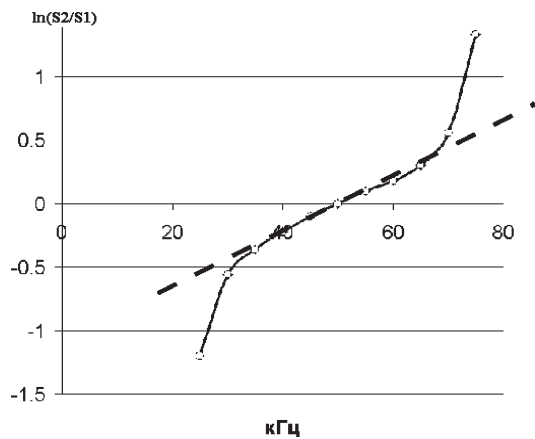


Рис. 5. Аппроксимирующая прямая кривой логарифма отношения модулей спектров в полосе частот 30–70 кгЦ

частоту  $F$  из интересующего нас диапазона частот. Тогда убывание энергии за счет поглощения на пути  $Z$  в среде с параметром поглощения  $\beta_0$  можно будет оценить с помощью экспоненциального множителя  $\exp(-2\beta_0 \cdot 2\pi F \cdot Z)$ . Если в результате деления модуля спектров полученная кривая аппроксимируется отрезком прямой, и линейную зависимость поглощения от частоты можно считать доказанной, то формально можно перейти к добротности  $Q$ :

$$Q = \frac{\pi}{\lambda \cdot \beta(\omega)},$$

где  $\beta(\omega) = \beta_0 \omega$ ;  $\lambda$  — длина волны и  $\lambda = 2\pi C / \omega$  и  $C$  — скорость распространения волны в среде. Тогда

$$Q = \frac{1}{2\beta_0 C}.$$

С другой стороны, «если некоторый объем подвергается действию циклических напряжений с частотой  $\omega$ , безразмерная характеристика внутреннего трения (степень неупругости) определяется как

$$\frac{1}{Q(\omega)} = \frac{\Delta E}{2\pi E},$$

где  $E$  — пиковое значение упругой энергии, запасенной в этом объеме, а  $\Delta E$  — энергия, потерянная в каждом цикле вследствие неидеальной упругости материала» [1].

Однако определенные таким образом потери энергии характерны для грунта при ничтожных амплитудах деформации — не более  $10^{-4}$  %. При повышении уровня напряжений энергия расходуется также и на пластическое деформирование материала — разрыв структурных связей грунта, что и приводит к снижению его физико-механических показателей. Именно это поглощение, напрямую связанное с накапливаемыми деформациями, определяет динамическую устойчивость грунта и важно с инженерной точки зрения. Следовательно, требуется оценить долю поглощенной энергии, израсходованной на пластическое деформирование грунта. Она равна разнице между полной рассеянной энергией и энергией, поглощенной за счет неидеальной упругости грунта.

Полную удельную рассеянную энергию  $\Delta E$  можно определить по площади петли гистерезиса на основании ре-

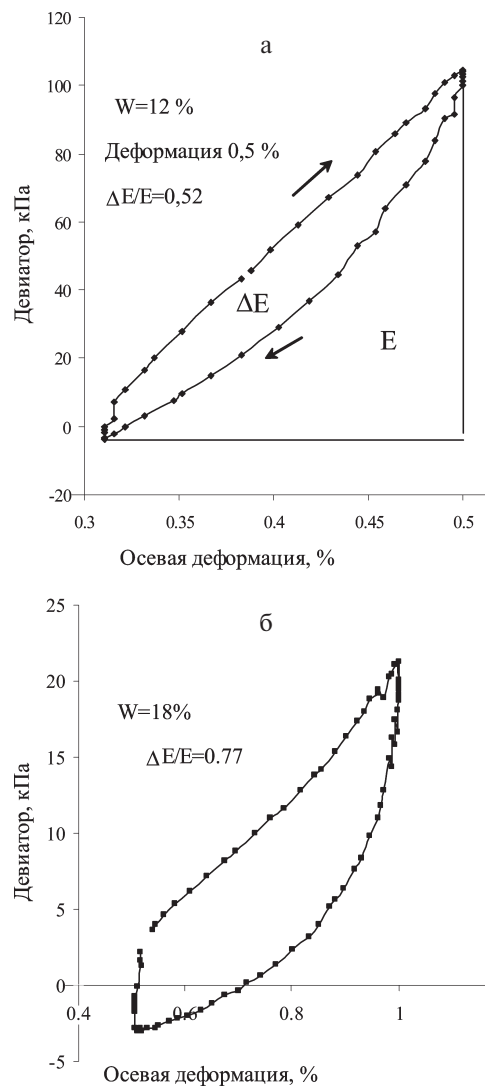


Рис. 6. Схема расчета коэффициента суммарного поглощения по результатам циклических трехосных испытаний разных дисперсных грунтов: а — твердого лессовидного суглинка (eII, Южная Молдавия), б — пластичной супеси (dIII-IV, Тульская обл.)

зультатов лабораторных, например, трехосных динамических испытаний:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\sigma_{i+1} + \sigma_i) \cdot (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i),$$

где  $\sigma$  — приращение девиатора напряжений относительно исходного уровня;  $\varepsilon$  — осевая деформация;  $n$  — число зарегистрированных  $i$ -ых значений. При подстановке напряжений в кПа, а деформаций — в долях единицы, величина удельной рассеянной энергии выразится в кДж/м<sup>3</sup>. Поглощение затем может быть рассчитано как доля общей работы, совершенной над грунтом за цикл воздействия ( $E$ ), как это показано для двух разных по составу и свойствам грунтов на рис. 6.

Таким образом, для правильной оценки динамической устойчивости грунтов в энергетических терминах требуется раздельное определение параметров поглощения при двух существенно различных уровнях деформаций, что возможно сделать только в комбинации сейсмоакустических методов и методов механики грунтов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. — М.: Мир, 1983. — Т. 1. — С. 162.
2. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. — М.: УРСС Эдиториал, 1999.
3. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973.
4. Andrus R.D., Stokoe K.H. II. Liquefaction resistance based on shear wave velocity / Proceedings of NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, NCEER, State University of New York at Buffalo. — 1997. — P. 89–128.
5. Seed H.B., Idriss I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential // Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. — 1971. — V. 97; № SM9. — P. 1249–1273.

© Коллектив авторов, 2005

Монахов В.В., Овчинников В.И., Урусова А.В. (ООО «НПЦ ГЕОТЕХ»), Савин А.Н. (МИИТ), Большаков Д.К. (МГУ)

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ДЕФОРМИРУЮЩИХСЯ УЧАСТКАХ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В современных условиях эксплуатации железных дорог РФ земляное полотно испытывает интенсивное воздействие поездных нагрузок. В сочетании с влиянием множества техногенных, погоднo-климатических и геологических факторов это приводит к возникновению в земляном полотне деформаций, в т.ч. создающих угрозу безопасности движения поездов.

Для стабилизации участков земляного полотна, где происходят деформации, разрабатываются и применяются противодеформационные мероприятия, основной базой для эффективного и рационального проектирования которых является детальное исследование инженерно-геологических условий. Однако проведение такого обследования с достаточной полнотой традиционными геологическими методами требует значительного объема бурения, что связано с большими временными и стоимостными затратами. Кроме того, из-за невозможности размещения буровой техники в непосредственной близости от железнодорожного пути, бурение производится легкими станками или вручную, что не всегда обеспечивает необходимую глубину изучения разреза. Еще один момент, связанный с дискретностью получения геологической информации при бурении, создает определенные затруднения при пространственной интерпретации данных. Поэтому решение вопросов полноты изысканий, по нашему мнению, связано с необходимостью привлечения методов инженерной мало-глубинной геофизики, которые обеспечивают проведение изысканий в труднодоступных условиях и позволяют получать непрерывную информацию как об основных элементах геологического строения, так и о физико-механических свойствах среды «in situ». И только совокупность геолого-геофизических данных позволяет достаточно надежно установить причины деформаций и принять правильное проектное решение по стабилизации земляной насыпи.

В данной публикации приводятся результаты геофизических исследований, которые проводились на участках деформаций железнодорожного пути с различными инженерно-геологическими условиями: на 1780–1781 км линии Армавир-Туапсе Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД) и на 22 км направления Москва-Курск Москов-

ской железной дороги (МЖД). Основной задачей изысканий являлось изучение геологического строения с целью выявления причин происходящих там деформаций земляного полотна.

На указанном участке СКЖД деформации земляного полотна начались сразу после окончания строительства в 1911 г. и выражаются в просадках обеих рельсовых нитей со сдвижкой пути в плане, которые вызваны подвижками грунтов косогора, активизирующимися во время выпадения значительных количеств осадков. Результаты этих негативных процессов показаны на рис. 1, где наблюдаются существенные нарушения защитных инженерных сооружений.

Для решения поставленной задачи был выполнен достаточный объемный комплекс исследований, включающий сейсмические наблюдения КМПВ и электрические зондирования по методике СЭЗ, выполненные по сети профилей, ориентированных как вкрест так и вдоль железнодорожного пути, георадиолокационные наблюдения по профилям, проложенным вдоль осей 1-го и 2-го пути и в междупутье, бурение в объеме 1–3 скважины на каждом поперечном сейсмическом профиле. Результаты исследований показали, что данный участок имеет сложное геологическое строение, обусловленное:

схожестью литологического состава пород оползневых тел и подстилающих ненарушенных пород коренной основы, что привело к неоднозначной корреляции данных бурения;

незначительной глубиной залегания поверхности грунтовых вод, а также наличием переувлажненных участков выше по разрезу;

значительной мощностью (до 30–35 м) сложнопостроенных оползневых отложений;

наличием сложного ступенчатого рельефа коренных пород, способствующего образованию зеркал скольжения оползневых тел (рис. 2 А)

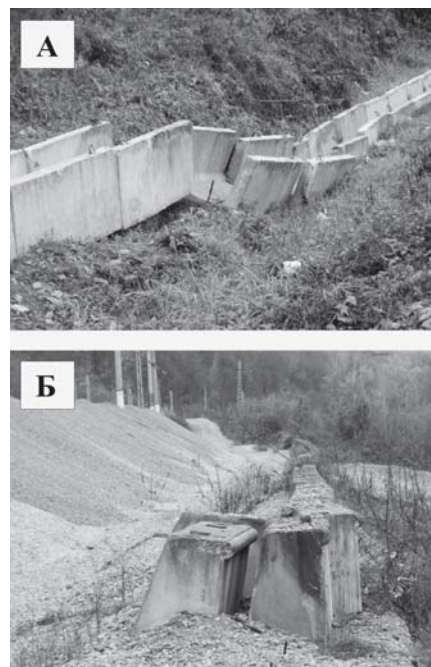
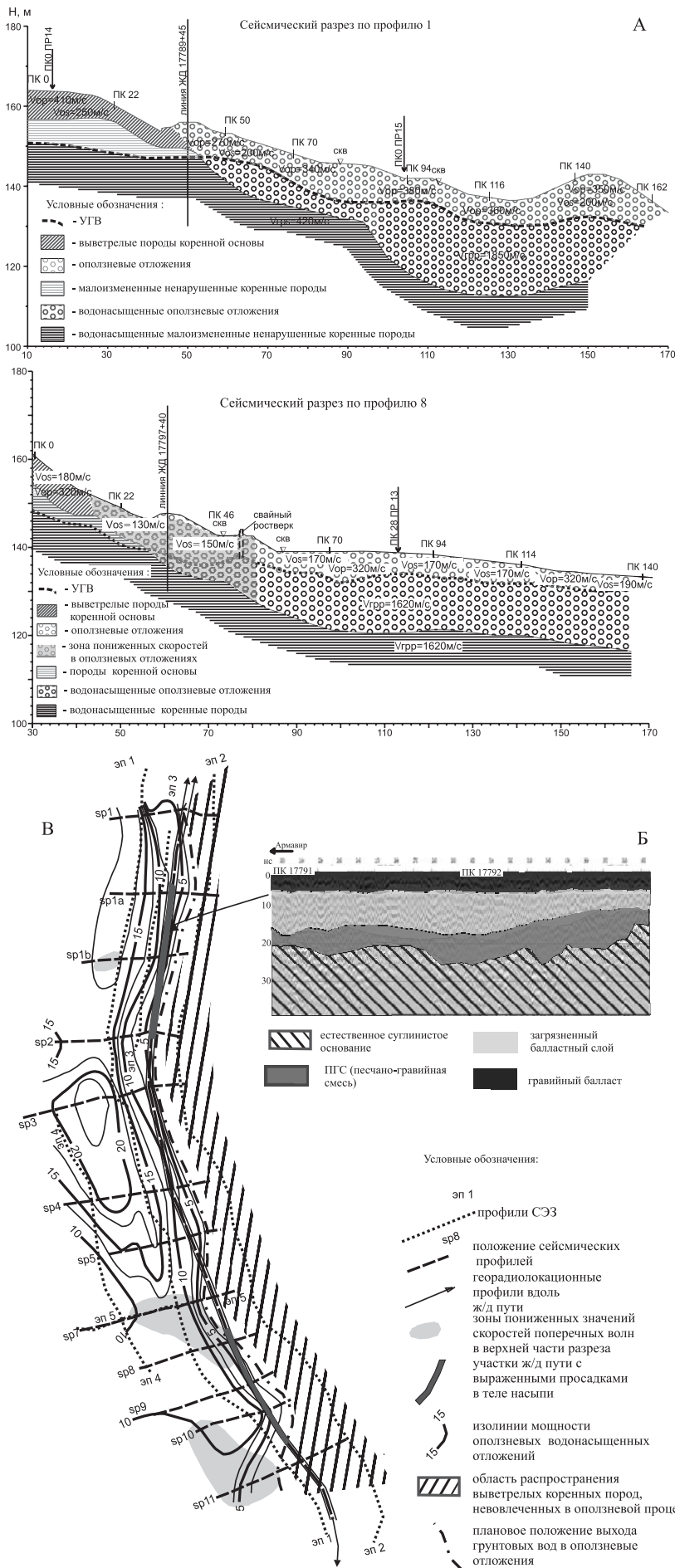


Рис. 1. Деформации инженерных сооружений на оползневом участке Северо-Кавказской железной дороги: А — деформации водоотводящих лотков (в районе SP 7); Б — деформации свайного ростверка (в районе SP 8)



Общая геологическая ситуация достаточно наглядно отражена на схематической карте участка, приведенной на рис. 2 В. Склон, расположенный выше железнодорожного пути, характеризуется неглубоким (5–7 м) залеганием кровли коренных малоизмененных пород и достаточно высокими скоростными характеристиками поверхностных отложений, являющихся корой выветривания пород коренной основы. Уровень грунтовых вод в возвышенной части участка располагается в коренных породах на глубине порядка 12–15 м. Такое положение границ в разрезе этой части участка позволяет говорить о том, что вовлечение этих отложений в оползневой процесс маловероятно при сохранении сложившихся здесь геологических и гидрогеологических условий.

При переходе в зону развития оползневых отложений, поверхности кровли ненарушенных отложений и УГВ сближаются, затем пересекаются и по мере понижения дневного рельефа расходятся (см. рис. 2 А, 2 В). Области пересечения этих границ являются зонами интенсивного водонасыщения рыхлых отложений, что может способствовать активизации процесса оползнеобразования, особенно в породах с низкими скоростными характеристиками.

Непростая гидрогеологическая ситуация складывается в районе ростверка, где образуется локальный подъем зеркала подземных вод, что связано, по-видимому, с тем, что противодеформационные сооружения являются барьером для водотока (см. рис. 2 А).

По результатам георадиолокационного обследования в строении насыпи выделяются две достаточно протяженные (около 300 м) аномальные зоны (см. рис. 2 Б, 2 В), где фиксируются наиболее значительные изменения в ее конструктивных слоях. Деформации в первой зоне (sp 1а–sp 3) могут провоцироваться достаточно близким к поверхности положением УГВ. Вторая аномальная зона (sp 8–sp 10), где фиксируются пониженные значения скоростей упругих волн в верхней части разреза, связана с активизацией оползневых процессов. Представленные результаты геолого-геофизических исследований достаточно убедительно показывают эффективность примененного комплекса изысканий на участках развития оползневых процессов и связанных с ними деформаций земляного полотна железной дороги.

Ниже рассматриваются результаты геолого-геофизических работ, которые были проведены в совершенно иной инженерно-геологической ситуации. На 22 км направления Москва–Курск МЖД между станциями

**Рис. 2. Результаты геофизических исследований на оползневом участке Северо-Кавказской железной дороги:** А — сейсмические разрезы по 1 и 8 профилям наблюдения; Б — фрагмент радарограммы с результатами интерпретации; В — схематическая карта участка работ

Покровская и Красный строитель (Южный Административный округ г. Москвы) были выполнены геолого-геофизические исследования на участке деформаций четырехпутного земляного полотна, выражающихся в оседаниях опор контактной сети и рельсовых нитей. В геологическом отношении верхняя часть разреза этого района г. Москвы представлена толщей четвертичных пород, которая сложена переслаиванием моренных суглинков и глин, водно-ледниковых песков и супесей, аллювиальных и озерных песков и суглинков. Мощность этих отложений пространственно изменчива и составляет 5–20 м. В изучаемой области также почти повсеместно распространены покровные суглинки, образующие маломощный (1–2, местами до 3–4 м) чехол.

В комплекс изысканий наряду с бурением инженерно-геологических скважин были включены сейсморазведочные работы методом преломленных волн (МПВ) и георадиолокация с набором различных антенных блоков. Сейсмическими методами на обследуемом участке предполагалось решить следующие задачи: изучение геологического строения до глубин 20–25 м с определением глубины залегания и прослеживанием уровня грунтовых вод (УГВ) и поверхности плотных пород. Перед георадиолокационной съемкой ставилась задача детального изучения строения земляного полотна железной дороги с выявлением аномальных (просадки, повышенное влагонасыщение и т.д.) зон в конструктивных слоях.

Для решения поставленных задач была отработана сеть профилей, ориентированных вкрест предполагаемого простираения зоны деформации, параллельно железнодорожным путям. Полевые наблюдения проводились сейсмостанцией «Лакколит-24М» по методу преломленных волн

(МПВ) с возбуждением и регистрацией как продольных (Z-компонента), так и поперечных (Y-компонента) волн.

На рис. 3 представлены результирующие сейсмический (А) и георадиолокационный (Б) разрезы по профилю, который был отработан между вторым и третьим путями и проходил непосредственно через инженерно-геологическую скважину. На сейсмическом разрезе преломляющая поверхность, построенная по поперечным волнам с граничной скоростью 300–350 м/с, испытывает погружение на пикетах 60–140, связанное, по-видимому, с погребенным эрозионным врезом. Северный борт этой структуры крутой, противоположный — пологий, максимальная амплитуда погружения составляет около 6 м. Рассматривая ее морфологию, можно заметить, что это не что иное, как перекрытое рыхлыми отложениями палеоруслó древнего водотока. По-видимому, существовавший в свое время водоток при освоении территории был заключен в бетонную трубу и перекрыт насыпью. Такая ситуация, как указывается в [1], благоприятна для возникновения линейной суффозии вдоль засыпанных водотоков. Развитие этого процесса вызывает оседание поверхности земли на локальных участках, сопровождающееся деформированием как наземных, так и подземных коммуникаций, что мы наблюдаем на земляном полотне железной дороги. На представленных фотографиях (рис. 4 А, Б) зафиксированы деформации элементов железобетонной трубы, проложенной под насыпью, и вынос мелкозернистого материала из затрубного пространства, что подтверждает версию о развитии здесь процесса линейной суффозии.

В области крутого борта палеоруслó отмечается зона шириной до 20 м, где значения граничных скоростей попе-

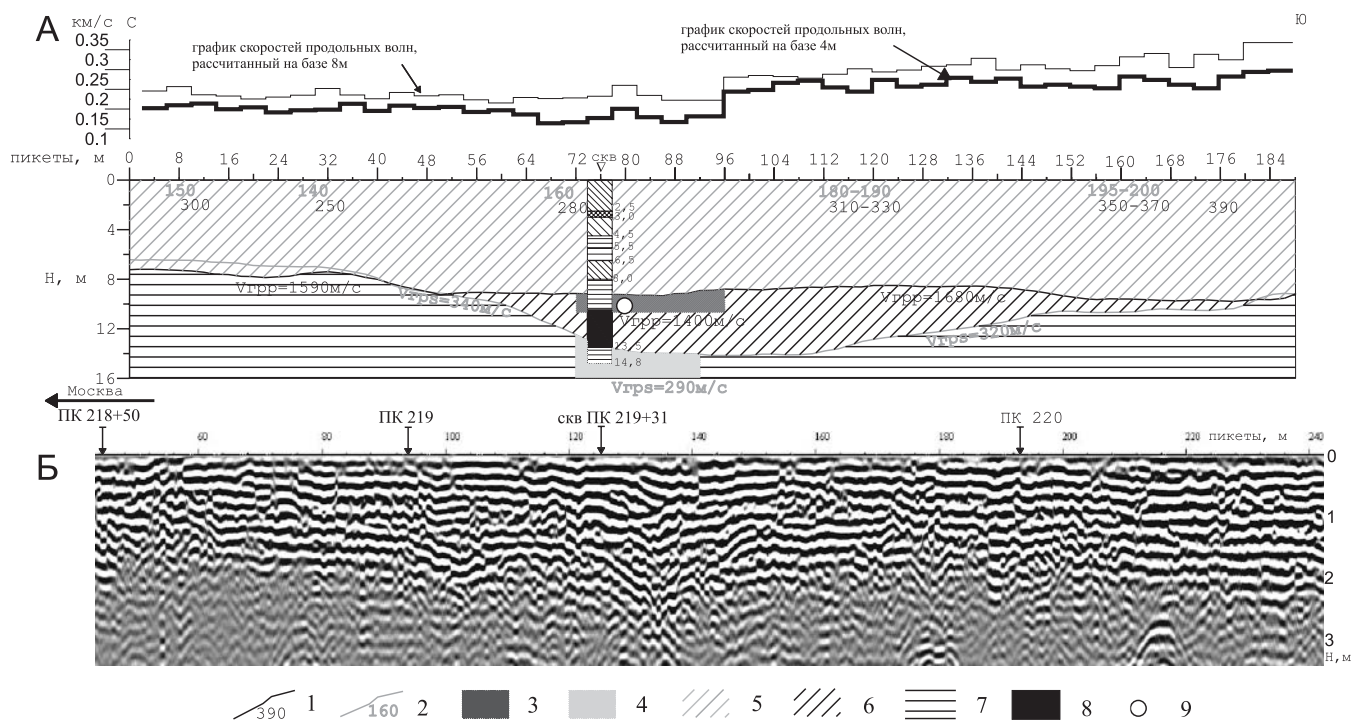
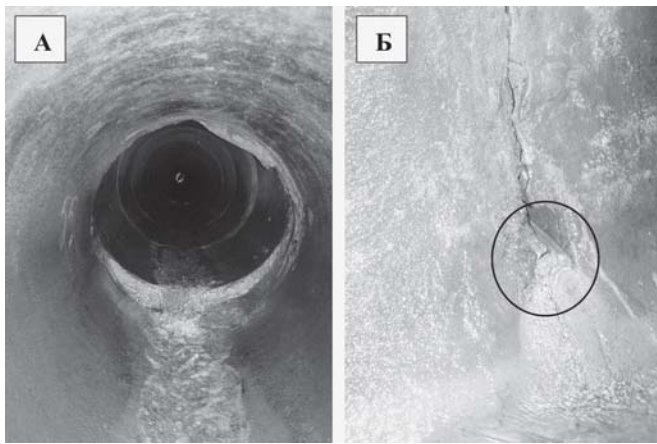


Рис. 3. Разрезы по профилю на земляном полотне (22 км Московской железной дороги): А — сейсмический разрез с графиками скоростей продольных волн, рассчитанных на базах 4 и 8 м; Б — георадиолокационный разрез; 1 — преломляющая граница, построенная по продольным волнам и значения скоростей V<sub>р</sub>, м/с; 2 — преломляющая граница, построенная по поперечным волнам и значения скоростей V<sub>с</sub>, м/с; 3 — зона пониженных значений граничных скоростей V<sub>р</sub>; 4 — зона пониженных значений граничных скоростей V<sub>с</sub>; 5 — суглинки; 6 — обводненные суглинки; 7 — породы основания насыпи, представленные глинами; 8 — суглинки, насыщенные водой; 9 — водоотводная железобетонная труба диаметром 1200 мм





**Рис. 4.** Водопрopusкная труба в основании железнодорожной насыпи: А — деформации водоотводной железобетонной трубы; Б — вынос материала из затрубного пространства

речных волн понижаются с 340–350 до 250–280 м/с. Пониженные значения скоростей упругих волн указывают на нарушение сплошности отложений и на их повышенную проницаемость, что способствует суффозионному процессу. Сейсмическая граница, построенная по продольным волнам с граничной скоростью 1600–1700 м/с, связана с уровнем подземных вод и отображает его поведение. Как видно из рис. 3 А, зеркало грунтовых вод фиксируется гипсометрически выше ложа палеоруслa, испытывая локальное понижение над нарушенной зоной. Такое явление может быть связано с оттоком в проницаемой области. Здесь же наблюдается понижение значений граничных скоростей продольных волн вдоль рассматриваемой сейсмической границы, также указывая на аномальность центральной зоны. Аналогичная картина наблюдается и на параллельных профилях, отработанных справа и слева по основанию насыпи. Анализ информации, полученной по всем профилям, позволил получить пространственную ориентацию выявленных структур и аномальных зон.

Для детального изучения верхней части разреза земляного полотна железной дороги были проведены сейсмические наблюдения по методике профилирования на постоянной базе. Рассчитаны значения скоростей продольных волн на двух базах: 4 и 8 м. Графики распределения этих значений вдоль профиля представлены на рис. 3 А, которые отображают скоростное строение верхней части разреза на глубину около 2 м. Наиболее контрастным является график, рассчитанный на базе 4 м, который характеризует приповерхностный слой. В целом, по скоростным характеристикам на отработанном участке выделяются две области: относительно высокоскоростная с пикета 96 до конца профиля, где скорости (база 4 м) принимают значения 230–280 м/с, и низкоскоростная (пк 0–96) со значениями скоростей 140–180 м/с. В центре профиля (пк 66–96) фиксируется зона с аномально низкими (<150 м/с) значениями скоростей продольных волн, где, собственно, и происходит оседание грунта вместе с опорами контактной сети и рельсовыми нитями. Пониженные значения скоростей в северной части профиля (пк 0–96) связаны, вероятнее всего, с тем, что здесь в грунтах происходит нарушение структурных связей и их разрыхление за счет выноса геологического материала, т.е. вся эта область, достаточно обширная, вовлечена в процесс суффозии, причем наиболее активная область выноса (пк 66–96) ха-

рактеризуется самыми низкими значениями скоростей продольных волн.

Георадиолокационная съемка производилась георадаром серии «ОКО» с различными антенными блоками по профилям, параллельным железнодорожным путям. На разрезе георадиолокационной съемки (см. рис.3 Б) аномальная зона в центре профиля отображается в виде локального погружения отражающих горизонтов с нарушением их сплошности, образуя воронкообразную форму.

Представленные результаты исследований, проведенных в различных инженерно-геологических условиях, на наш взгляд, наглядно демонстрируют широкие возможности и эффективность применения геофизических методов в комплексе с геологическими при изучении геологического строения проблемных участков железных дорог с целью установления причин деформаций земляного полотна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов В.И., Медведев О.П. и др. Москва. Геология и город. — М.: АО «Московские учебники и картолитография», 1997.
2. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. — М.: Недра, 1979.
3. Коншин Г.Г. Вибросейсмическая диагностика эксплуатируемого земляного полотна. — М.: Транспорт, 1994.

© Коллектив авторов, 2005

Зверев Е.О., Клепикова С.М., Монахов В.В. (ООО «НПЦ ГЕОТЕХ»), Большаков Д.К., Модин И.Н. (МГУ)

#### КАРТИРОВАНИЕ ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Разведка и добыча торфа — одна из старейших отраслей в горнодобывающей промышленности как в России, так и в мире. Рождение торфяной промышленности России приурочено к концу 18 в. и связано с началом разработки месторождения в Санкт-Петербурге вблизи Невского монастыря. При этом если в 19 в. торф имел огромное значение в качестве горючего ископаемого, то в настоящее время для нужд аграрной промышленности, фармакологии и косметологии в большей степени используется верховой «живой» торф, богатый минеральными и органическими элементами. Таким образом, возрастает необходимость именно в его разведке. Внедрение современных технологий и методик инженерной геофизики в разведку торфяных месторождений является перспективным с экономической точки зрения. В Московском регионе наиболее продуктивной для разведки и добычи является его восточная часть (Егорьевский, Шатурский и другие районы).

В феврале 2005 г. ООО «НПЦ ГЕОТЕХ» (Москва) была выполнена георадиолокационная съемка в пределах торфяного месторождения в Егорьевском р-не Московской области, проектируемого под разработку верхового торфа (рис. 1). Егорьевский р-н Московской обл. издавна известен своими торфяными месторождениями — в непосредственной близости от обследуемого участка в настоящее время ведется активная разработка торфяных залежей.

Исследуемый участок представляет собой заболоченную пойму р. Поля и имеет вытянутую в плане форму, характерные размеры 4,5×2 км — площадь около 1000 га. На части территории проведена мелиорация. Поскольку ап-



Рис. 1. Рабочий момент георадиолокационной съемки. Георадар «ОКО-2М», антенный блок АБ-250

риорная информация, имеющаяся по обследуемому участку, являлась не релевантной, необходимо было произвести работы с целью выделения перспективных для дальнейшего обследования участков с мощностью продуктивных горизонтов более 1 м и минимальной площадью распространения в плане более 50 Га. Для этого требовалось выявить картировочные признаки торфяных горизонтов, особенности аккумуляции и произвести реконструкцию геологической обстановки.

В связи с тем, что обследуемая область заболочена, работы проводились в зимнее время — в период промерзания верхнего слоя (после промерзания). Съемка проводилась с использованием самоходной техники — снегохода, что значительно увеличило скорость проведения полевых работ. Работы проводились георадаром «ОКО-2М» (ООО «Логис», НИИП им. Тихомирова, г. Жуковский) в комплекте с антенным блоком АБ-250. Измерения выполнялись на постоянной базе в режиме профилирования. На участках с контрастными отражениями в местах скважин были выполнены измерения на переменной базе с разностью до 20 м с целью определения значения скорости по годографу отраженной волны.

Зимний период является наиболее благоприятным для георадиолокационной съемки в связи с тем, что верхний промерзший слой характеризуется минимальным поглощением электромагнитных волн, что создает оптимальные условия для изучения торфяных отложений. А выдержанность свойств верхнего слоя по латерали исключает влияние приповерхностных условий при георадиолокационном профилировании. Привязка профилей производилась при помощи GPS-приемника GARMIN-MAP-76, методом записи трека, параллельно съемке георадарного профиля. Дальнейшая интеграция трека с профилем осуществлена в программе RADEXPLORER. Обработка и интерпретация полученной информации производилась в программных пакетах Geoscan32 (ООО «Логис», г. Жуковский) и RadExplorer (ООО «Деко-Геофизика», Москва).

Задача картирования торфяных месторождений является классической задачей георадиолокации: большой контраст между диэлектрическими проницаемостями торфа ( $\epsilon' = 50-80$ ) и вмещающей породы ( $\epsilon' = 6-30$ ), обеспечивает четкую корреляцию осей синфазности отраженных волн даже в условиях сильного затухания электромагнитной волны. При проведении этих работ были использованы 3 подхода к определению скорости электромагнитной волны:

определение скорости по годографу отраженной волны в точках зондирования;

корреляция отражающих границ с данными бурения; определение скорости по годографу дифрагированной волны.

Хорошо коррелируемый годограф был получен на скв. 22, скорость, полученная по годографу, для торфа составила порядка 5 см/нс (рис. 2). В этой же точке была рассчитана скорость по результатам бурения, значение которой получилось равное 4,95 см/нс (рис. 3). В относительной близости от этого участка по годографу дифрагированной волны были оценены скорости распространения электромагнитной волны в среде. Они лежат в диапазоне от 4 до 5 см/нс, что соответствует диэлектрической проницаемости от 35 до 55.

Подстилающие породы представлены песками и суглинками. Кажущиеся скорости для подстилающих пород были определены по гиперболам дифракции и пересчитаны в истинные по формуле Дикса [2]. На участке в районе скв. 22 по формуле [1]:

$$A_n = A_o \cdot K_{\text{зат}} \cdot K_{\text{расх}} \cdot K_{\text{отр}},$$

где  $K_{\text{отр}} = (\sqrt{\epsilon'_1} - \sqrt{\epsilon'_2}) / (\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2})$ ;  $K_{\text{расх}} = 1/2h$ .

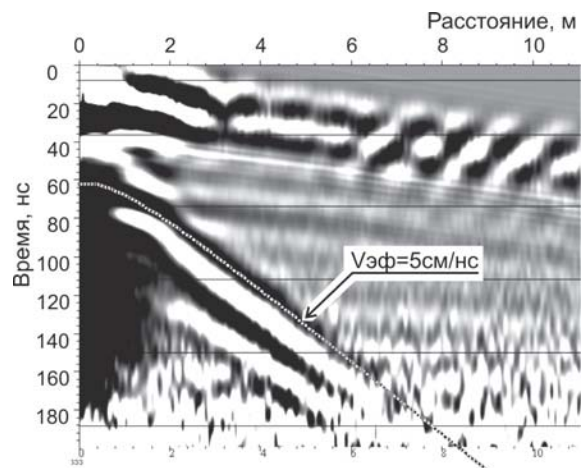


Рис. 2. Годограф отраженной волны, полученный в точке зондирования около скв. 22

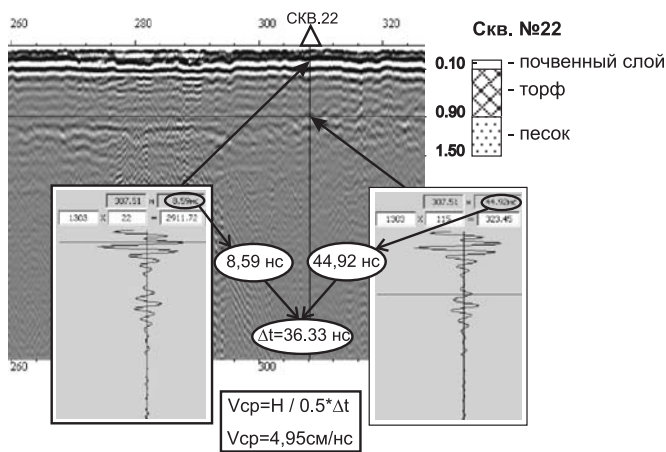


Рис. 3. Определение скорости электромагнитной волны по корреляции результатов георадиолокации и результатов бурения

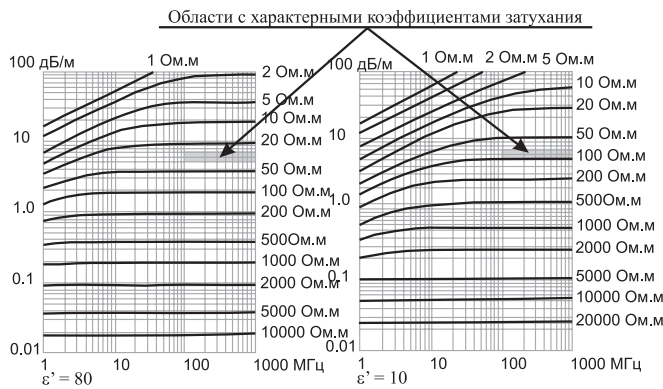


Рис. 4. Зависимости коэффициента затухания от УЭС и частоты для значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon' = 10$  и  $\epsilon' = 80$  [3]

При известных значениях  $A_n = 323$ ,  $A_0 = 2910$ ,  $\epsilon'_1 = 36$ ,  $\epsilon'_2 = 10$ ,  $h = 0,9$  м был оценен коэффициент затухания электромагнитной волны в торфе, он составил 0,56, что соответствует 5 дБ/м. Аналогичные расчеты были произведены еще на нескольких тестовых участках, диапазон по затуханию составил от 4,5 до 5,5 дБ/м.

Важным петрофизическим параметром при исследовании торфа является его удельное электрическое сопротивление (УЭС). Стоит заметить, что УЭС торфа меняется в широком диапазоне значений: так значение УЭС абсолютно сухого торфа составляет  $10^9$  Ом·м, а в естественном залегании это значение может составлять от 20 до 1000 Ом·м. Значение УЭС торфа в большей степени определяется его влажностью. По номограммам зависимости коэффициента затухания от УЭС и частоты [3] была произведена качественная оценка значения УЭС (рис. 4). Для верхового торфа значение УЭС составляет порядка 50 Ом·м. По итогам работ были выявлены следующие картировочные признаки торфяных залежей:

1. При сравнительно высоких коэффициентах затухания и низких значениях УЭС, отражающая граница, соответствующая подошве торфяной залежи, хорошо коррелируется за счет высокого значения  $K_{отр}$ .

2. Частотная характеристика отражающей границы имеет центральную частоту в 2–3 раза меньшую, нежели центральная частота всей записи. При исследовании с антенным блоком АБ-250 (теоретическая частота антенного блока 250 МГц), центральная частота записи составила 160–180 МГц, спектр отраженной волны от подошвы торфа имел центральную частоту 50–80 МГц. Столь сильная дисперсия по частоте характерна для водосодержащих сред.

3. По характеру записи подошва торфяных отложений характеризуется наличием большого количества точек дифракции, что характерно для речных и озерных отложений (рис. 5).

4. По геометрии подошва торфа имеет сильно изрезанную форму, что связано с особенностью гидрогеологической обстановки в области генерации обследуемого месторождения. Залежи торфа приурочены к долине р. Поля — торфяные отложения заполняют палеодолины озер и ручьев, стариц (болота).

Согласно определенным картировочным признакам была выполнена интерпретация по профилям. Построены глубинные разрезы. Из совокупности пикировок подошвы торфа (по результатам интерпретации) построена

карта распространения торфяных залежей мощностью более 1 м (рис. 6). Залежь крайне неоднородна, мощность торфа изменяется от 0 до 6,5 м. В настоящее время в районе продолжается процесс торфообразования, что подтверждено результатами опробования, выполненного на существующих болотинах, рельеф дна которых крайне не ровный, встречаются переуглубления до 8 м.

Так как сетка профилей была нерегулярная, а торфяные месторождения характеризуются сильной изрезанностью подошвы горизонта и существенными перепадами глубин, в пределах перспективных участков необходимо производить доразведку с увеличением густоты сети. Вероятно наличие не менее перспективных участков на

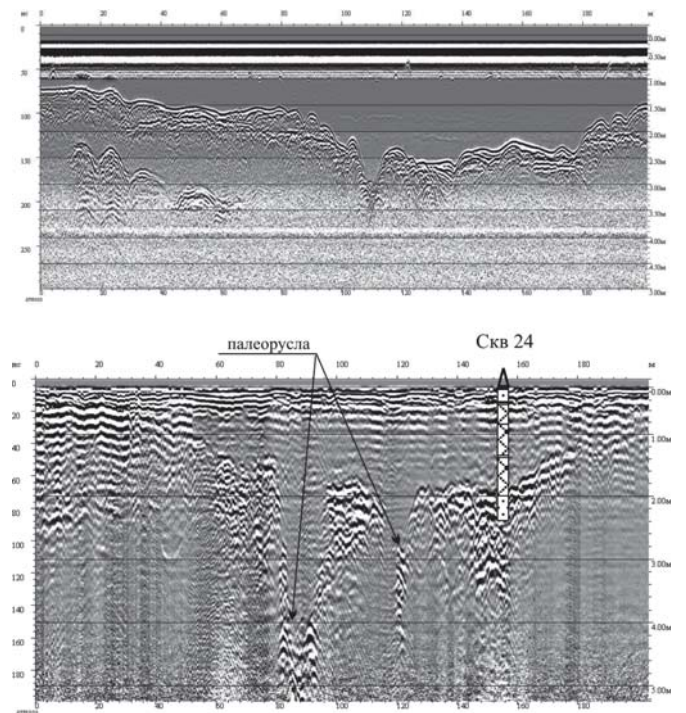


Рис. 5. Современный водоем (вверху) и палеоводоем (внизу), заполненный торфом

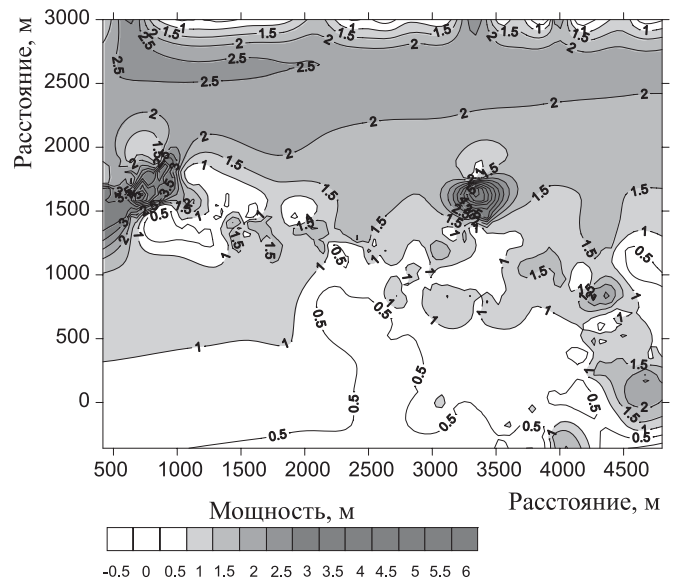


Рис. 6. Карта мощностей торфа

смежных участках (на некотором расстоянии от основного участка, поросшее лесом сухое болото на склоне, пробурена пробная скважина, вскрывшая 2,5 м торфа);

Поставленная перед началом работ задача — проведение рекогносцировочных работ с целью выявления участков, где мощность торфа более 1 м, была успешно решена, и метод георадиолокации обладает большой эффективностью для решения данной задачи. Работы целесообразно проводить в зимний период.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: Учебное пособие — М.: Изд-во МГУ, 2004.
2. Гурвич И.И., Боганик П.Н. Сейсмическая разведка. 3-е изд. — М.: Недра, 1980.
3. Зимин Ю.В. Радиолокационный метод исследований отложенного торфа и сапропеля. Диссертационная работа МГУ им. Ломоносова, Геол. фак-т, каф-ра Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, 1987.

© Бобачев А.А., Горбунов А.А., 2005

Бобачев А.А., Горбунов А.А. (МГУ)

### ДВУМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ: АППАРАТУРА, МЕТОДИКИ, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Электроразведка методом сопротивлений остается одним из основных геофизических методов при малоглубинных исследованиях. Развитие этого метода обусловлено как развитием аппаратуры и вычислительной техники, так и появлением новых технологий полевых работ, обработки данных и интерпретации. Все это привело к появлению новой методики — двумерной электроразведки («2D resistivity», электротомография). В табл. 1 приведено сравнение метода ВЭЗ и двумерной электроразведки.

#### Многоэлектродные зондирования.

2D электроразведка основана на методике многоэлектродных зондирований. Эта методика отличается от «классического» метода ВЭЗ в первую очередь высокой плотностью наблюдений, которая достигается применением соответствующих схем наблюдения, а использование многоэлектродной аппаратуры (рис. 1А) обеспечивает эффективность полевых работ [2, 5, 7]. Другой составляющей двумерной электроразведки является автоматическая двумерная инверсия данных, прежде всего в рамках «гладких» моделей [8]. В целом использование такого подхода позволяет получать удовлетворительные результаты даже при минимальной квалификации пользователя. За последние 15 лет эта методика получила на Западе повсеместное распространение. В России из-за практического отсутствия многоэлектродной аппаратуры внедрение такого подхода только начинается. На сегодняшний день существует только комплекс «Иднакар» на базе измерителя и генератора «ЭРА» [3]. Кроме того, к этой методике близка технология сплошных электрических зондирований, разработанная на кафедре геофизики геологического факультета МГУ [1].

Таблица 2

Качественное сравнение электроразведочных установок применительно к многоэлектродным зондированиям

Установки	Глубинность	Уровень сигнала	Разрешающая способность	Число измерений	Многоканальные измерения	Поддержка в аппаратуре и программах	Проблемы с бесконечностью
Потенциал Веннера	+++	+++	+	+	++	+++	+++
Шлюмберже	+	+++	+	+	нет	+++	нет
Шлюмберже	++	++	++	++	+	++	нет
Дипольная осевая	++	+	+++	++	+++	++	нет
Трехэлектродная	+++	+	+++	+++	+++	+	+

Таблица 1

Сравнение «классического» метода ВЭЗ и 2D электроразведки

Метод ВЭЗ	2D (3D) электроразведка
одноканальная аппаратура	многоэлектродная аппаратура
логарифмический шаг по разностям	линейный шаг по разностям
редкая сеть наблюдений (шаг по профилю сравним с максимальным разнесом)	плотная сеть наблюдений (шаг по профилю равен минимальному разнесу)
установка Шлюмберже или дипольная	произвольная установка, комбинирование установок
1D интерпретация	2D (3D) автоматическая инверсия (Res2dInv, SensInv2D и т.п.)

#### Аппаратура.

Для получения данных, пригодных к двумерной интерпретации, используется многоэлектродная аппаратура. Такая аппаратура производится практически всеми ведущими производителями геофизической аппаратуры. Она обеспечивает:

повышение производительности и качества полевых наблюдений;

возможность двумерной интерпретации данных;

применимость для задач мониторинга и межскважинных наблюдений;

возможность проведения работ в дождь.

Конечно, за эти возможности приходится платить:

большой вес (~ 100 кг) за счет кабелей и электродов и малая мобильность;

ограниченный диапазон разнесов;

слабая помехозащищенность из-за высокой скорости измерений;

относительно высокая стоимость аппаратуры (>25000 долл.).

В последнее время стала активно применяться многоканальная многоэлектродная аппаратура: 10-канальная Syscal-Pro (Iris Instruments), 4-канальная SAS4000 (ABEM) и др. Такие измерители позволяют за один цикл измерения получать значения разности потенциалов на нескольких приемных диполях (рис. 1Б). За счет этого удалось в несколько раз увеличить скорость полевых наблюдений, что всегда было принципиальным ограничением геофизики на постоянном токе. При многоэлектродных зондированиях при одном положении установки проводят сотни и тысячи измерений. Поэтому скорость наблюдений играет очень важную роль. Кроме того, быстрые измерения открывают новые возможности для использования электроразведки при мониторинге различных геологических и технических процессов.

#### Методики наблюдений в двумерной электроразведке.

Большое внимание уделяется выбору оптимальной методики наблюдений [6]. Сравнение различных методик пока-

зало, что качество получаемых результатов зависит не только от точности измерений, но и от выбранной методики. В табл. 2 дается оценка возможностей основных установок.

Основным путем повышения эффективности полевых наблюдений является комбинированная съемка с несколькими установками с последующей совместной инверсией

всех полученных данных. Наиболее эффективным является использование комбинированной трехэлектродной установке. К сожалению, она плохо поддерживается производителями аппаратуры и программного обеспечения. Альтернативой этой установке является использование дипольной установки совместно с установкой Шлюмберже или Веннера [11].

Максимальное число электродов в одной расстановке — от 48 до 96. Малое число разносов ограничивает максимальный разнос, большое — увеличивает стоимость и габариты аппаратуры. Расстояние между электродами обычно составляет 2 — 10 м. Оно определяет интервал изучаемых глубин и детальность наблюдений. В табл. 3 приведены параметры типичных многоэлектродных систем наблюдений.

**Двумерная автоматическая инверсия и другое программное обеспечение.**

Первые версии программ автоматической двумерной инверсии данных работали в рамках «гладких» моделей [8]. Это наиболее простой способ регуляризации обратной задачи часто приводит к появлению ложных аномалий в результирующем разрезе. Поэтому стали использоваться другие алгоритмы регуляризации (рис. 2). Кроме того, стала очевидной необходимость учета априорных данных при инверсии через введение некоторых границ и закрепления сопротивлений блоков.

Опыт практического применения многоэлектродных зондирований показал, что сама по себе высокая плотность наблюдений недостаточна для получения качественных результатов инверсии. Поэтому перед использованием программ автоматических инверсий необходимо проводить обработку полевых данных для подавления различных помех и методических ошибок [4].

Особое внимание приходится уделять подавлению искажений от приповерхностных неоднородностей. Обычно это необходимо при одномерной интерпретации [10]. Однако такая обработка существенно улучшает результаты и для двумерной инверсии, особенно для глубинной части разреза [9]. Для подавления эффектов приповерхностных неоднородностей могут применяться статистические методы — метод главных компонент или медианная полировка.

**Таблица 3**  
Производственные характеристики многоэлектродных зондирований

Число электродов	Расстояние между электродами	Длина профиля	Интервал разносов	Примерное время подготовки	Число измерений	Время измерений	
						Одноканальная станция	10-канальная станция
48	2	94	3 - 47	40 мин	300 - 1000	30 мин - 1.5 ч	6 - 20 мин
	10	470	15 - 235				
96	2	190	3 - 95	1.5 ч	1000 - 3000	1.5 - 4.5 ч	30 мин - 1.5 ч
	10	950	15 - 475				

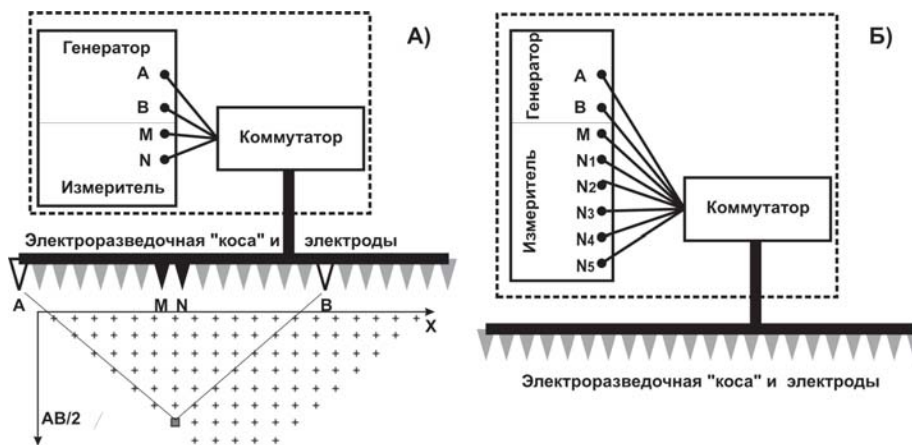


Рис. 1. Схемы многоэлектродной (А) и многоканальной (Б) аппаратуры

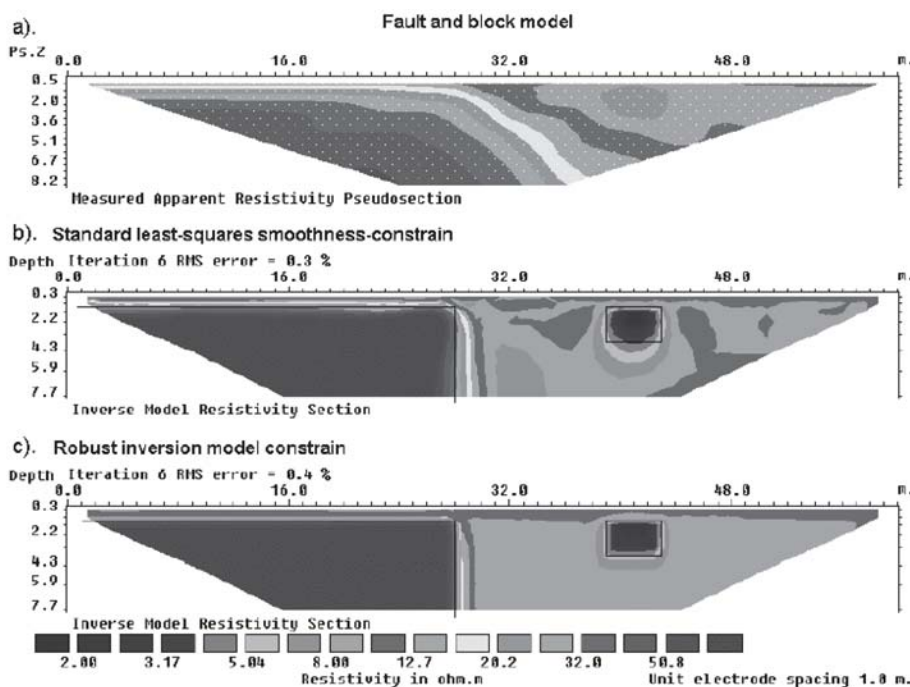
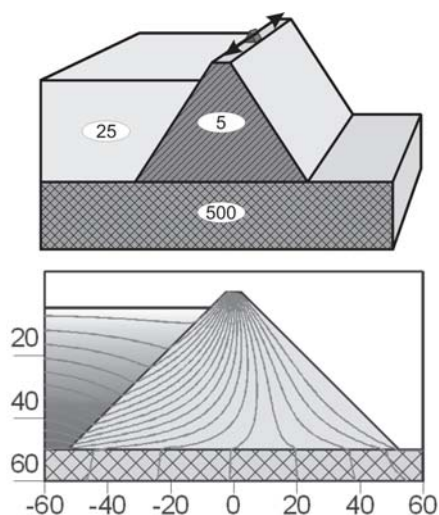


Рис. 2. Модель контакта и блока: разрез кажущегося сопротивления (а); результаты инверсии в рамках гладких (б) и контрастных моделей (с). Из инструкции к программе Res2Dinv (Loke)

**Таблица 4.**  
Некоторые программы для двумерной электроразведки

ПРОГРАММА	НАЗНАЧЕНИЕ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬ
Res2dInv	Стандарт de facto для 2D инверсии, Geotomo, Малазия
SensInv2D	2D инверсия, Geotomographie, Германия
ZondRes2D	2D инверсия, СПбГУ, Санкт-Петербург, РФ
x2ipi	Подготовка, обработка, визуализация данных, МГУ, Москва, РФ
Res2dMod	2D прямая задача, Geotomo, Малазия
IE2DP1, TOK_LINE	2D прямая задача, расчет токовых линий МГУ, Москва, РФ



**Рис. 3.** Объемная модель земляной плотины (вверху) и токовые линии постоянного тока по результатам расчетов (ТОК-LINE)

При анализе результатов двумерной электроразведки и их геологической интерпретации, кроме автоматической двумерной инверсии данных, как таковой, полезно использование решения двумерной прямой задачи и других средств анализа геоэлектрических моделей (рис. 3). В табл. 4 перечислены некоторые программы, используемые в двумерной электроразведке.

#### Практическое применение двумерной электроразведки.

В нашей стране использование двумерной электроразведки рекомендовано Госстроем России (СП 11-105-97). Применение двумерной электроразведки целесообразно при всех детальных (масштаб 1:2000 и крупнее) геофизических исследованиях — при инженерно-геологических и гидрогеологических изысканиях, изучении геологического разреза на малых и средних глубинах при поисках и разведке полезных ископаемых, а также в менее традиционных областях применения малоглубинной геофизики — изучении археологических памятников, решении геоэкологических и других задач.

Двумерная электроразведка необходима при исследовании разрезов, значительно отличающихся от горизонтально-слоистой модели среды — в условиях крутопадающих слоев, при наличии тектонических нарушений, на оползнях, многолетнемерзлых породах, а также при работах в зонах городской застройки.

Таким образом, многоэлектродные зондирования, нацеленные на изучение двумерно- и трехмерно-неоднород-

ных разрезов, значительно расширяют область применения метода сопротивлений. Актуальной задачей является внедрение таких методик и соответствующей аппаратуры в повседневную практику производственных организаций. Это требует как материальных затрат на приобретение необходимой аппаратуры и обучение персонала, так и организационных мероприятий по дальнейшему нормативно-обеспечению этих методик.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н. и др. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. // Физика Земли. — 1995. — № 12. — С.79–90.
2. Бобачев А.А., Модин И.Н., Пervaго Е.В., Шевнин В.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред. // Разведочная геофизика. Обзор. Вып. 2. — М., 1996.
3. Журбин И.В., Грудев Д.В. Многоэлектродная аппаратура и программное обеспечение для малоглубинной электроразведки в археологии. // Разведка и охрана недр. — 2004 — № 12 — С. 37–38.
4. Dahlin T., 2000. Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. Geophysical Prospecting, 48, 181–187.
5. Dahlin T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences 27, 1019–1029.
6. Dahlin T., Zhou B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. Geophysical Prospecting, 52(3), 379–398.
7. Griffiths D.H., Barker R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. J. Appl. Geophysics 29, 211–226.
8. Loke M.H., Barker R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting 44, 131–152.
9. Ritz M., Robain H., Pervaго E. et al., 1999. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. Geophysical Prospecting 47 (2): 85–101.
10. Shevнин V.A., Bobachev A.A., Modin I.N., Pervaго E.V., 1999 Interpretation of resistivity sounding data, distorted by geological noise. Proceedings of EAGE 61th Conference, 2, 27.
11. Stummer P., Maurer H., Green A.G., 2004. Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. Geophysics 69 (1), 120–139.

© Коллектив авторов, 2005

Большаков Д.К., Иванова С.В., Марченко М.Н., Модин И.Н. (МГУ)

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕРЗЛОТЫХ УСЛОВИЙ ВДОЛЬ ТРАССЫ ПРОЕКТИРУЕМОГО ТРУБОПРОВОДА В ЗАПОЛЯРЬЕ

По трассе проектируемого трубопровода выполнены вертикальные электрические зондирования и электропрофилирование. Основная задача исследований заключалась в том, чтобы по результатам электроразведочных измерений дать детальную характеристику мерзлотных условий на участке перехода (70 км) от тундровой зоны с массивной мерзлотой к лесной зоне с тальми породами. При этом наибольшее разнообразие мерзлотных условий встречается на промежуточном отрезке трассы, соответствующем лесотундровой зоне.

Практический опыт применения геофизических исследований в северных районах [1] показывает высокую эффективность применения методов сопротивлений при ре-



Рис. 1. Схема расположения профиля работ

шении геокриологических задач. В основе успешного применения электроразведки лежит высокий контраст электрических свойств талых и мерзлых пород [2]. Особенно noteworthy выполненными исследованиями является изучение мерзлых пород с разными температурами, в частности, таких грунтов, температура которых не опускается ниже  $-2^{\circ}\text{C}$ .

На проведение геофизических работ сильно влияли ландшафтные условия. Весь профиль наблюдений можно разделить на три зоны (рис. 1): 1) северная тундровая зона (пк 0–220) со среднегодовыми температурами воздуха около  $-3^{\circ}\text{C}$ ; 2) центральная лесотундровая зона (пк 220–380) ( $t \sim -1^{\circ}\div -2^{\circ}\text{C}$ ); 3) южная лесная зона (пк 380–700) ( $t \sim -0,5^{\circ}\div +0,5^{\circ}\text{C}$ ).

Разнообразие микрорельефа равнинной части участка работ порождает разнообразие мерзлотно-геологических условий. Одной из важных особенностей является заметное изменение глубины снежного покрова вдоль профиля наблюдений. Встречается большое число локальных понижений, которые способствуют накоплению снега мощностью в среднем более 60–70 см и образованию таликов. В частности: 1) в *северной тундровой зоне* пространство на приподнятых участках покрыто слоем плотного наста мощностью до 15–20 см, под которым расположен рыхлый снег глубиной от 20–30 до 50 см. Глубина снежного покрова резко возрастает в оврагах и достигает местами 1,5–2 м; 2) в *центральной лесотундровой зоне густой лес* (74 % длины трассы) характеризуется рыхлым снежным покровом глубиной 50–80 см с резким нарастанием глубины снега вблизи молодых елей и берез высотой до 1 м с образованием на глубине воздушных ям, *редколесье* (13 % длины трассы) — плотный снег, мощностью до 50–60 см, *тундровые участки* — (13 % длины трассы) наст, рыхлый снег; 3) в *южной лесной зоне* — на участках с густым подлеском в виде кустарников и молодых деревьев мощность рыхлого снега с большим количеством воздушных ям (например, пк 610–620) достигает 1 м, на заболоченных участках (пк 560 и 580) мощность снега сокращается менее 20 см, интенсивное развитие бугров пучения (гряды вы-

сотой до 3–4 м). Таким образом, разнообразие ландшафтных условий порождает разнообразие мерзлотно-геологических условий.

**Аппаратура и методика измерений.** Измерения проводились с аппаратурой «ЭРА» (фирма «ЭРА», г. Санкт-Петербург), на частоте 625 Гц. Средняя температура, при которой проводились изыскания, составляла около  $-35^{\circ}\text{C}$ . При этом ни одна электроразведочная аппаратура в мире не предназначена для эксплуатации в таких условиях, поэтому для каждого полевого прибора был изготовлен специальный термоизолирующий контейнер с подогревом, что обеспечивало работоспособность прибора на протяжении 12 ч.

**Электрические зондирования** выполнялись по методике осевого дипольного зондирования. В качестве питающей линии АВ применялся заземляемый диполь длиной 2 м, сила тока 0,01–15 мА. Роль приемной линии MN выполняла электрическая антенна с эффективной длиной 1 м, которая удерживалась в воздухе (диапазон сигналов 1,5 мкВ–2000 мВ). Действующие разности: 2,5, 3,5, 5, 7,5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 м. Примеры полевых данных в виде разрезов кажущегося сопротивления представлены на рис. 2.

**Электрическое профилирование** выполнялось с дипольной осевой установкой на двух разносах (10 и 30 м). В качестве питающей линии АВ = 2 м применялся бесконтактный емкостной диполь (сила тока 1 мА), а в качестве приемной линии MN электрическая антенна с эффективной длиной 1 м, которая удерживалась в воздухе (диапазон сигналов 50–500 мкВ). Примеры полевых данных представлены на рис. 3 в виде графиков кажущегося сопротивления для двух разносов.

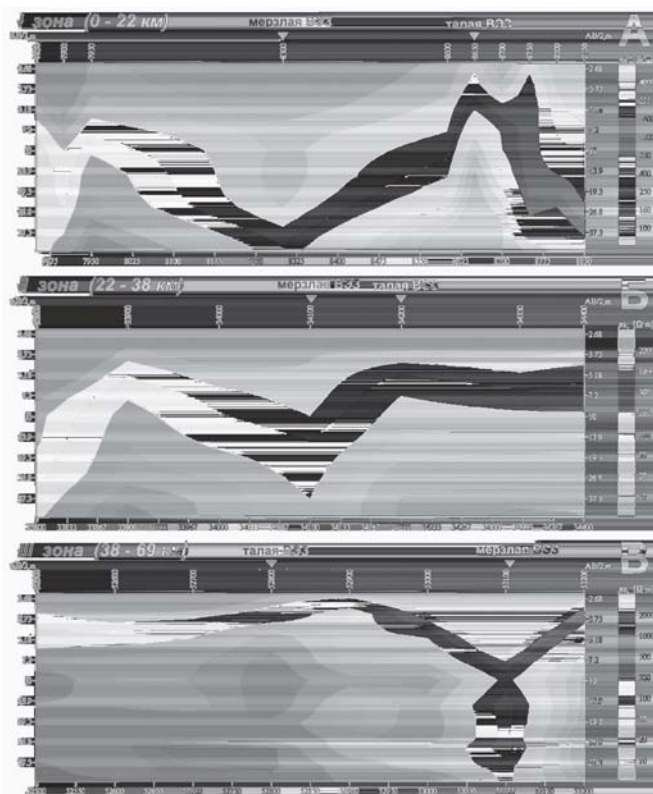
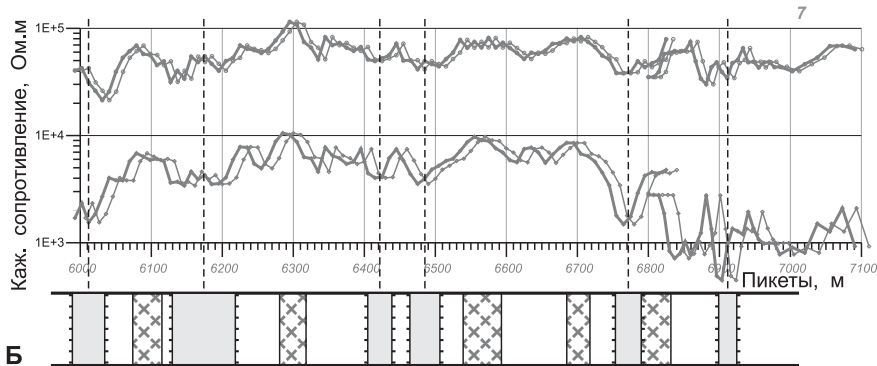
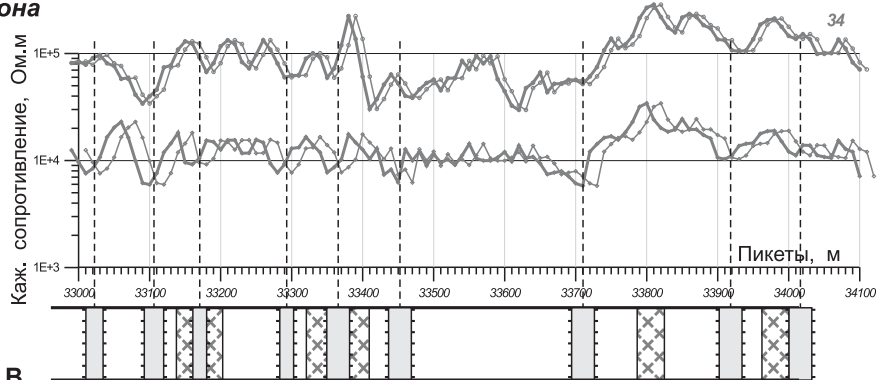


Рис. 2. Примеры полевых разрезов кажущегося сопротивления для участков трассы трубопровода: А — для северной тундровой зоны; Б — для центральной лесотундровая зоны; В — для южной лесной зоны

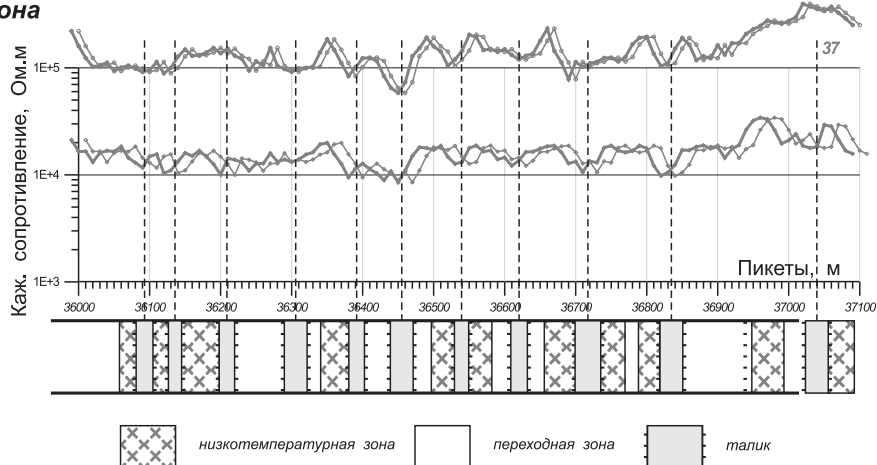
**А**  
**I зона**



**Б**  
**II зона**



**В**  
**II зона**



**Рис. 3. Примеры графиков электропрофилеирования и результаты предварительной интерпретации:** А — северная тундровая зона, 7 км; Б — центральная лесотундровая зона, 34 км; В — центральная лесотундровая зона, 37 км

Все полевые работы были выполнены за 28 рабочих дней (с 8 февраля по 7 марта 2001 г.) двумя отрядами по три человека, при этом четыре дня в пределах указанного срока температура воздуха была ниже сорока градусов мороза, и работы в поле были отменены. За время полевых работ выполнено: *747 вертикальных электрических зондирования* (на 70 км трассы) со средним шагом по профилю 100 м, а на участках со сложным геологическим строением шаг между точками сгущался до 25–50 м; в первой зоне на участках развития таликов, в третьей — на участках развития островной мерзлоты; *4000 точек двухразностного электропрофилеирования* (на 40 км трассы) с шагом по профилю 10 м.

Точность измерений (в среднем около 4 %) зависела от уровня промышленных помех от наземных и подземных

коммуникаций, приуроченных к автомобильной дороге Харьяга-Усинск, в непосредственной близости от которой расположена проектируемая трасса трубопровода. Например, в районе сорокового км (пк 400) на расстоянии не более 50 м от проектируемой трассы располагается ЛЭП. Вблизи ЛЭП существует сильная синфазная электромагнитная наводка, которая дает устойчивый сигнал 10–15 мкВ. На разносах 10–50 м этот шум практически не изменяется. Поэтому результаты измерений на этом участке были забракованы, и измерения вблизи ЛЭП не производились. При удалении на 100–200 м картина шумов меняется. На фоне, как правило, импульсной помехи проявляется полезный сигнал, который отслеживался по минимальным отсчетам на индикаторе прибора.

**Расчеты электрического поля для обобщенных моделей среды.** Для выбора методики измерений, определения подхода к интерпретации полевых материалов, учета явлений искажений кривых ВЭЗ были выполнены расчеты электрического поля над двумерными моделями таликовых зон. Таликовые зоны характеризуются значительно более низкими значениями удельного электрического сопротивления по сравнению с окружающими мерзлыми породами. Размеры таких зон по простиранию существенно превосходят их размер по латерали, а также глубину залегания нижней кромки. При полевых измерениях с целью выявления таликов линия наблюдений располагается, как правило, вкрест предполагаемого их простирания. Таким образом, объект исследования можно полагать в целом двумерным.

Источники же тока и приемные электроды являются точечными (трехмерными). В практике электроразведки такая ситуация, когда задача является трехмерной по структуре поля и двумерной по объекту исследования, называется «двух-с-половиной-мерной» (2,5D). Для моделирования 2,5D задач использовалась программа IE2DP1 (каф. геофизики Геологического ф-та МГУ, 1988–2000).

Результаты моделирования использовались при выборе параметров электроразведочных установок и выявлении методических особенностей измерений, при интерпретации полевых данных и построении геолого-геофизических разрезов. В частности, результаты моделирования ВЭЗ для четырехслойного разреза (сопротивления: 15 200, 1670, 790, 270 Ом·м; мощности: 1,2, 4,8, 12,1 м) показывают уменьшение глубинности и контрастности кривых кажущейся



шего сопротивления для используемой дипольной установки при увеличении расстояния измерительной электрической антенны от поверхности земли. Так для разноса 5 м поднятие антенны от поверхности земли на 0,7 и 1,5 м приводит к потере глубинности в 1,5 и 2 раза, соответственно. При увеличении действующего разноса это соотношение уменьшается. При учете глубины снега методически допустимая высота антенны над поверхностью земли составляет на больших разносах (более 10 м) около

1,2–1,5 м. На малых разносах антенна удерживалась на минимально возможной высоте над поверхностью снега.

Для определения подхода к интерпретации полевых материалов проведено математическое моделирование электрометрических наблюдений в условиях распространения таликовых зон в многолетнемерзлых породах в зимних условиях. Рассмотрен ряд моделей, характеризующих типичные положения таликовых зон в мерзлых породах. Во всех моделях мерзлые породы представлены однородным полупространством с

удельным сопротивлением 1000 Ом·м. Мерзлая толща перекрыта слоем с удельным сопротивлением 10 000 Ом·м мощностью 2 м, который представляет высокотемпературный низкотемпературный слой сезонного промерзания; такой слой присутствует в зимнее время над мерзлотным разрезом. Таликовая зона представлена в виде прямоугольного пласта вертикального падения с удельным сопротивлением 50 Ом·м и мощностью 50 м, что соответствует типичным параметрам таких объектов. Модели различаются, главным образом, геометрией границ.

Промоделированы работы по методикам зондирования и профилирования с установками и параметрами системы наблюдений, описанными выше. По результатам моделирования: сделан вывод о возможности проведения измерений с целью изучения свойств и геометрии среды, соответствующей модельным представлениям; выбрана методика наблюдений, соответствующая условиям проведения работ и особенностям исследуемой среды; получены качественные и количественные представления об изменениях электрического поля, обусловленных изменениями свойств и геометрии модели среды; сделаны выводы о возможности интерпретации данных, полученных по выбранной методике. В частности, сделан вывод о том, что все кривые зондирования в пределах таликовой зоны являются искаженными. Следовательно, интерпретация данных в рамках горизонтально-слоистой модели является в значительной

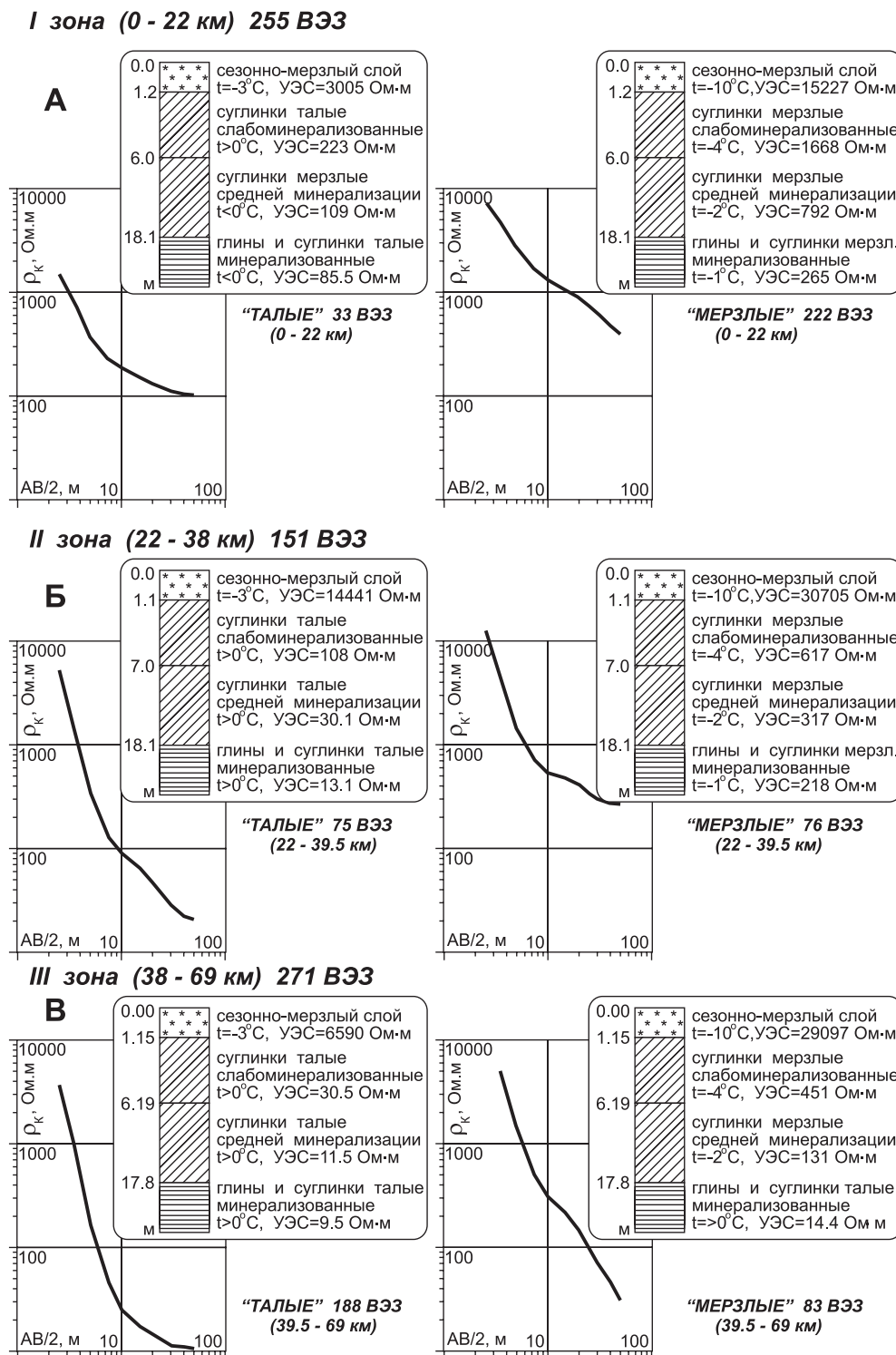


Рис. 4. Средние «талые» и «мерзлые» кривые кажущегося сопротивления и результаты их интерпретации: А — северная тундровая зона; Б — центральная лесотундровая зона; В — южная лесная зона

степени формальной, и проявляющиеся в электрическом поле эффекты, связанные с двухмерностью изучаемой среды, необходимо учитывать. Необходимо отметить, что искажения кривых зондирования сами по себе могут служить картировочным признаком. Одним из важных результатов анализа модельных кривых является выявление особенностей искажений кривых, соответствующих различным зонам: подхода к талику, пересечения ближней границы талика, середине талика (с шириной равной максимальному разному установки), пересечения дальней границы талика. Искажения, полученные при моделировании, наблюдаются на полевых кривых зондирования.

**Качественный и количественный анализы результатов зондирования.** Для определения общей картины, которая складывается из большого фактического материала, было выполнено разделение всех данных по трем физико-географическим зонам. В каждой из зон («тундра», «переходная зона», «лес») были рассчитаны средние кривые ВЭЗ (рис. 4). При этом разделение кривых ВЭЗ на «талые» и «мерзлые» было сделано двумя способами. Цель подобного разделения — выделение в каждой из трех зон участков с различными мерзлотными условиями и различным состоянием пород.

Первый способ (качественного) разделения кривых электрических зондирования по уровню кажущегося сопротивления дал следующие результаты (см. рис. 4): *первая зона* («тундра», 255 кривых ВЭЗ) «талых» — 13 %, «мерзлых» — 87 %; *вторая зона* («переходная», 151 кривая ВЭЗ) «талых» — 50 %, «мерзлых» — 50%; *третья зона* («лес», 271 кривая ВЭЗ) «талых» — 70 %, «мерзлых» — 30 %.

Второй способ (количественного) разделения кривых электрических зондирования на «талые» и «мерзлые» основан на анализе формы гистограмм суммарной проводимости геоэлектрического разреза (S). Фактически использовались не полевые кривые ВЭЗ, а результаты их интерпретации. Следовательно, разделение выполнено не для измеренного поля (кажущееся сопротивление), а для оценок свойства пород (проводимость). Сетка пикетов, неравномерная вдоль профиля, была пересчитана на равномерный шаг по профилю, равный 25 м. На основе результатов интерпретации кривых ВЭЗ для каждой из зон были получены гистограммы S до глубины 15 м (рис. 5). Интересно отметить, что форма гистограмм (в особенности во второй и третьей зонах) имеет четкий минимум, отделяющий «талые» породы от «мерзлых». Результаты применения второго способа: *первая зона* «талые» породы ( $0,7 \text{ См} > S > 0,15 \text{ См}$ ) составляют 22 % профиля трассы, «мерзлые» породы ( $0,15 \text{ См} > S > 0,004 \text{ См}$ ) составляют 78 % профиля трассы; *вторая зона* «талые» породы ( $4 \text{ См} > S > 0,15 \text{ См}$ ) — 58 %, «мерзлые» породы ( $0,15 \text{ См} > S > 0,008 \text{ См}$ ) — 42 %; *третья зона* «та-

лые» породы ( $300 \text{ См} > S > 0,2 \text{ См}$ ) — 90 %, «мерзлые» породы ( $0,2 \text{ См} > S > 0,04 \text{ См}$ ) — 10 %.

Результаты разделения пород вдоль профиля на «талые» и «мерзлые» по суммарной проводимости (второй способ) в целом совпадают с результатами разделения кривых ВЭЗ по уровню кажущегося сопротивления (первый способ).

Все кривые ВЭЗ имеют форму кривых типа Q. С небольшими поправками все средние кривые ВЭЗ геометрически укладываются в одну модель:  $h_1=1,1-1,2 \text{ м}$ ,  $h_2=4,8-5,9 \text{ м}$ ,  $h_3=11-12 \text{ м}$ . Однако по удельному сопротивлению наблюдаются значительные расхождения. Кривые ВЭЗ на таликах в целом на порядок смещены вниз относительно мерзлых кривых. Талые кривые более растянуты по оси кажущегося сопротивления. Одной из причин является большой контраст сопротивлений (на талых участках по сравнению с мерзлыми) между верхним сезонно-мерзлым слоем и нижними тальми горизонтами. Другая причина «растяжения» кривых ВЭЗ вдоль оси сопротивлений — уменьшение минерализации поровой влаги в верхней части разреза из-за влияния талых маломинерализованных вод. Таким образом, температурное влияние и влияние минерализации увеличивают различие в свойствах пород, причем в данной ситуации, усиливая воздействие друг друга. Результаты одномерной интерпретации приведены на рис. 6.

В соответствии с полученными результатами можно ввести *классификацию талых и мерзлых грунтов по их электрическим свойствам*. Необходимо отметить, что в нашем случае электрические свойства грунтов, с одной стороны, зависят от глубины залегания (изменения свойств пород связаны с изменением температуры по глубине), а с другой стороны — значительные изменения свойств пород связаны с географическим фактором (постепенное продвижение на юг приводит к уменьшению сопротивления грунтов за счет более активного водообмена между ниж-

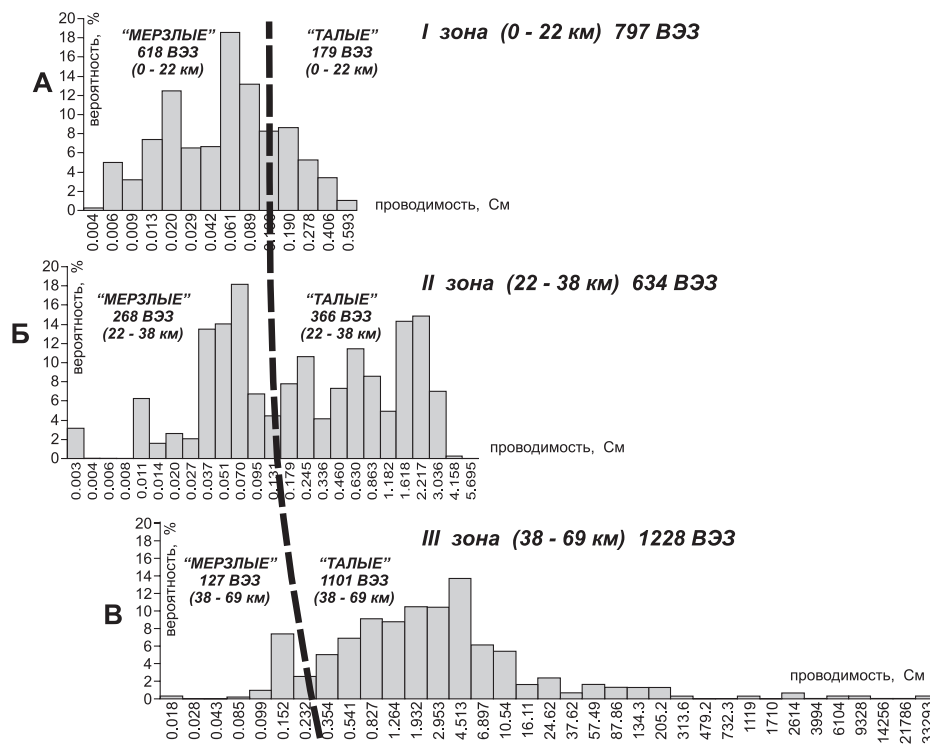


Рис. 5. Разделение на «талые» и «мерзлые» кривые кажущегося сопротивления по гистограммам суммарной продольной проводимости моделей: А — северная тундровая зона; Б — центральная лесотундровая зона; В — южная лесная зона

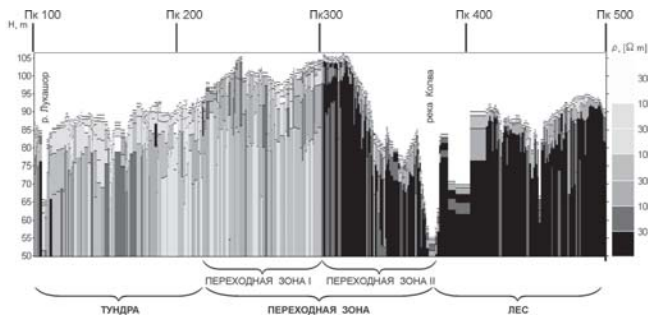


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю наблюдений с 10 по 50 км трассы трубопровода

ними и верхними горизонтами). На севере, в зоне развития сплошной мерзлоты активный водообмен между нижними и верхним горизонтами отсутствует, и все сопротивления в верхней части разреза получаются завышенными, так как даже на талых зонах ниже 5–6 м залегают многолетнемерзлые породы. На юге в основном развиты талые породы, и существует водообмен между нижними и верхним горизонтами.

В целом геологический разрез вдоль профиля наблюдений представлен суглинками и глинами. Глины залегают на глубинах больше 10–15 м. Суглинки — выше, в верхней части разреза. Талые суглинки имеют сопротивление порядка 30 Ом·м (глубина около 10 м), 100 Ом·м (глубина 3–4 м) в переходной, лесной зоне и около 200 Ом·м на севере (глубина 3–4 м). Сопротивление глин зависит от их криологического состояния: талые глины 9,5–14 Ом·м и мерзлые 85–265 Ом·м, что объясняется наличием шпировой структуры глин, которая приводит к резкому изменению электрического сопротивления при изменении температуры. При этом в талых зонах шпиров меньше, и сопротивление глин может достигать порядка 100 Ом·м. В мерзлых зонах их гораздо больше, и поэтому сопротивление мерзлых глин в 2–2,5 раза выше талых. Таким образом, разделение грунтов на талые и мерзлые производится с учетом величины удельного сопротивления и глубины залегания.

**Электрические сопротивления и характеристика состояния пород.** Для основания разреза (преимущественно глины) значения удельного электрического сопротивления изменяются в зависимости от состояния пород. В первой зоне глины в основании разреза имеют сопротивления от 85 до 265 Ом·м, что соответствует мерзлому состоянию пород в пределах всей северной тундровой зоны. Во второй зоне удельное электрическое сопротивление глин в основании разреза 220 Ом·м (мерзлые) и 13 Ом·м (талые). В третьей зоне удельное сопротивление глин около 10 Ом·м, что соответствует талому состоянию пород в пределах всей южной лесной зоны.

По этим результатам сформулированы следующие положения. В пределах *первой зоны* (тундра) основание разреза представлено только мерзлыми породами, это означает, что талики на этом участке профиля, по-видимому, не являются сквозными. Наличие в пределах *третьей зоны* (лес) в основании разреза только талых пород указывает на то, что мерзлые породы на этом участке профиля могут располагаться, по-видимому, только в средней и верхней частях разреза. В пределах *второй (переходной) зоны* породы основания находятся как в мерзлом, так и в талом состоянии, следовательно, на этом участке профиля мерзлые и талые породы по глубине могут распространяться

на всю исследуемую глубину. На основании результатов интерпретации, с учетом этих положений, сделан практический вывод: в первой и третьей зонах мерзлые и талые разрезы наиболее сильно отличаются в верхней части, а во второй зоне эти отличия существуют на всех глубинах (от поверхности земли до глубины 20–30 м) и во всех грунтах.

По результатам интерпретации данных ВЭЗ с учетом имеющейся геологической информации для каждой зоны получены обобщенные модели талых и мерзлых разрезов. Общим для всех моделей является наличие четырех слоев со следующей геометрией границ: кровля основания ( $h_3$ ) располагается на глубинах около 18 м (17–18 м), кровля третьего слоя ( $h_2$ ) расположена на 6–7 м от поверхности земли, кровля второго слоя ( $h_1$ ), являющаяся также подошвой первого сезонно-мерзлого слоя имеет глубину залегания около 1 м (1,1–1,2 м). В целом, во всех моделях соответствующие слои представлены одними и теми же породами. Основанием моделей является слой минерализованных глин и суглинков. Выше по разрезу залегают суглинки со средней минерализацией (третий слой) и суглинки со слабой минерализацией (второй слой). Суглинки перекрыты слоем покровных отложений (первый слой). Обобщенные модели разрезов отличаются удельными электрическими сопротивлениями слоев. Эти отличия связаны с отличающимися температурами пород и с изменением их минерализации.

Геометрия и свойства моделей, температура пород представлены в табл. 1 и 2. Значения сопротивлений пород в мерзлом состоянии даны на сером фоне. Для всех трех зон (тундра, переходная зона, лес) породы первого, сезонно-мерзлого слоя находятся в мерзлом состоянии во всех моделях до глубины 1 м. Удельное электрическое сопротивление верхнего сезонно-мерзлого слоя на мерзлых и талых участках в пределах каждой из трех ландшафтных зон различается не более чем в 2–5 раз.

В *первой зоне* средние удельные электрические сопротивления слоев для модели талого разреза следующие (последовательно с первого по четвертый слой, Ом·м): 3000, 220, 110, 85. Для модели мерзлого разреза: 15 500, 1700, 800, 260. Талые участки в этой зоне характеризуются талыми породами до глубины 6 м. Ниже залегают мерзлые грунты. Мерзлые участки в первой зоне представлены мерзлыми породами.

Во *второй зоне* средние удельные электрические сопротивления слоев для модели талого разреза следующие (последовательно с первого по четвертый слой, Ом·м): 14 400, 110, 30, 13. Для модели мерзлого разреза: 30 700, 620, 320, 220. Талые участки на всю исследуемую глубину представлены талыми породами, а мерзлые участки на всю исследуемую глубину мерзлыми породами.

В *третьей зоне* средние удельные электрические сопротивления слоев для модели талого разреза следующие (последовательно с первого по четвертый слой, Ом·м): 6600, 30, 12, 9. Для модели мерзлого разреза: 29 100, 450, 130, 14.

Таблица 1  
Обобщенные модели талых разрезов

Слой, №	Глубина подошвы, м	Температура, °С	Удельное сопротивление, Ом·м		
			1 зона	2 зона	3 зона
1	1	-3	3000	14400	6600
2	6	>0	220	110	30
3	18	<0; >0	110	30	12
4	–	<0; >0	85	13	9

Таблица 2

Обобщенные модели мерзлых разрезов

Слой, №	Глубина подошвы, м	Температура, °С	Удельное сопротивление, Ом·м		
			1 зона	2 зона	3 зона
1	1	-10	15500	30700	29100
2	6	-4	1700	620	450
3	18	-2	800	320	130
4	—	-1; >0	260	220	14

Талые участки в третьей зоне представлены тальми породами на всю исследуемую глубину. Мерзлые участки представлены мерзлыми грунтами только до глубины 15–20 м, ниже залегают талые породы.

По результатам выполненных геофизических исследований на основе имеющейся информации сделаны следующие общие выводы.

1. Первая зона (пк 0–220) — тундровый участок проектируемой трассы — характеризуется массивной мерзлотой. В верхней части разреза встречаются несквозные талики максимальной мощностью до 5–6 м, главным образом приуроченные к локальным понижениям рельефа.

2. Вторая зона (пк 220–380) — переходная между тундрой и лесом — разделена на две подзоны:

северная подзона I «южная граница тундры — водораздел» (пк 220–300) — частое чередование таликов и мерзлых зон, до исследуемой глубины 15–20 м залегают мерзлые породы;

южная подзона II «водораздел — р. Колва» (пк 300–380) — преимущественно талые породы, нижняя часть разреза талая, в верхней части встречаются фрагменты островной мерзлоты.

3. Третья зона (пк 380–700) — лесной участок проектируемой трассы — представлена практически полностью тальми породами, изредка встречается островная мерзлота.

Таким образом, на участке перехода проектируемой трассы трубопровода от тундровой зоны с массивной мерзлотой к лесной зоне с тальми породами по результатам геофизических исследований получена детальная характеристика мерзлотных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебное пособие. — М.: Изд-во МГУ, 1999.  
 2. Электрическое зондирование геологической среды. Ч. II. / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина: Учебн. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 1992.

© Мельцев С.И., Примак П.Н., Рогачев М.В., 2005

Мельцев С.И., Примак П.Н., Рогачев М.В. (ЗАО «ПИРС», Омск)

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НАПРАВЛЕННОМ БУРЕНИИ**

Речная долина обычно представляет собой глубокий врез в ложе коренных пород, заполненный аллювиальными осадками. И часто таким средам в инженерно-геологическом отношении назначается высшая категория сложности. Высшая категория сложности предполагает комплексный подход к подбору геофизических методов.

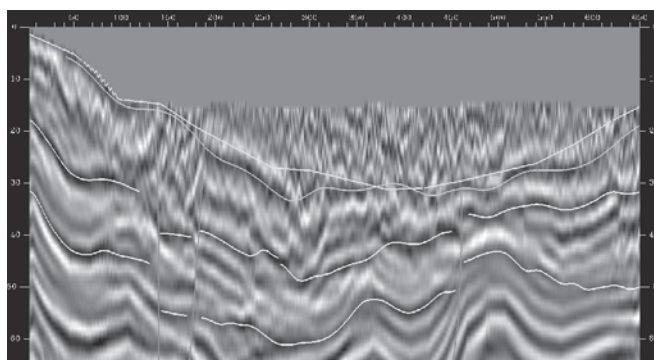


Рис. 1 Сейсмическое изображение долины горной реки с интерпретацией

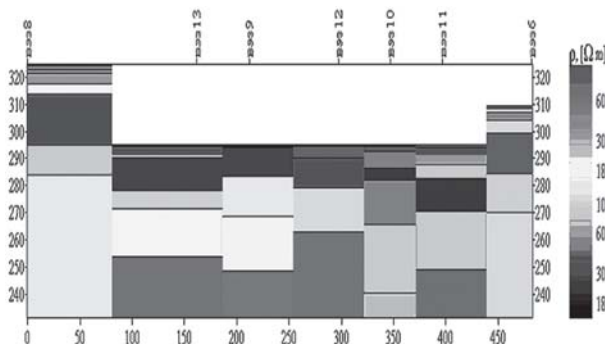


Рис. 2 Геоэлектрическое изображение строения долины

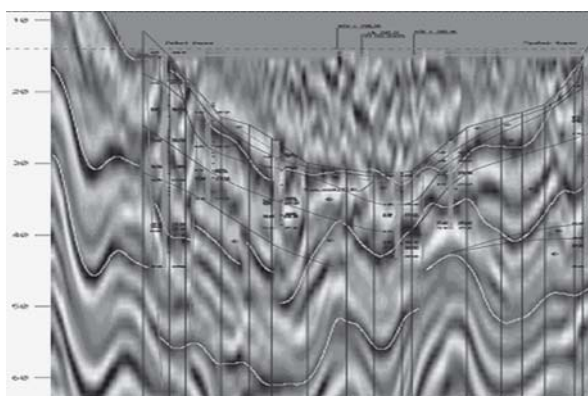


Рис. 3 Совмещение сейсмического и геологического изображений

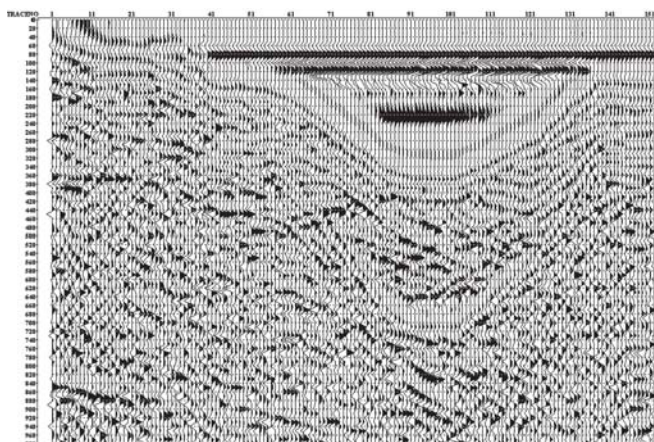


Рис. 4 Радарное изображение русла реки

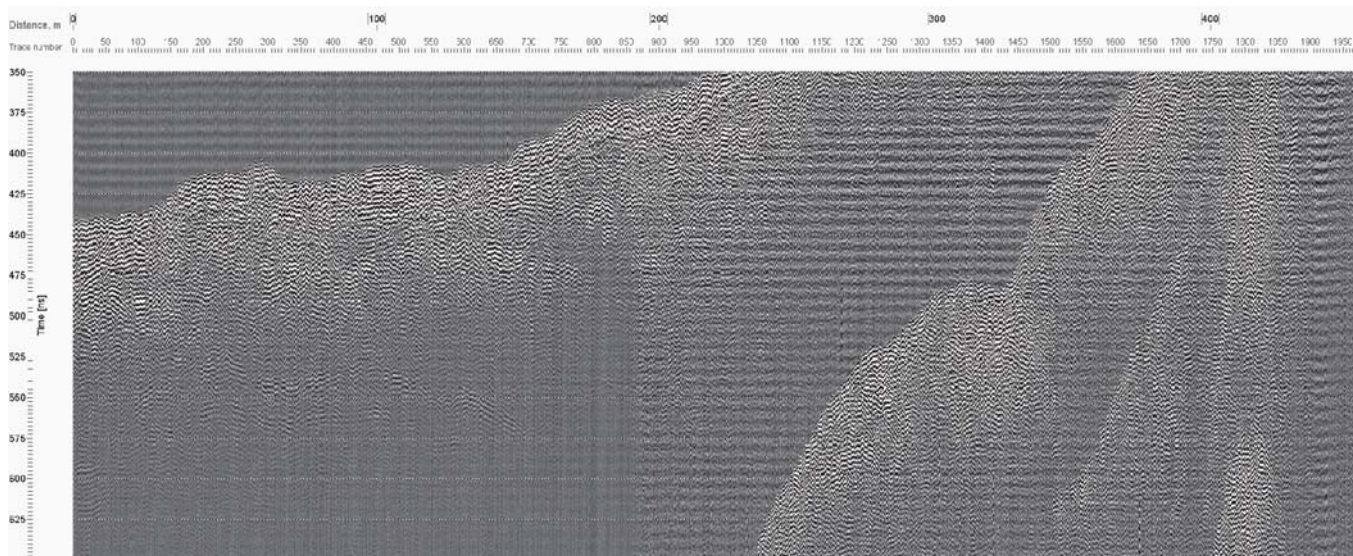


Рис. 5 Сейсмofации русловой части реки. НСП

Примеры, приведенные на рис. 1–5, говорят нам о неравноценной информативности отдельно взятых методов, проводимых в комплексе изысканий. Так, например, традиционная электроразведка ВЭЗ из-за интегрального выделения «толстых» слоев не может служить надежной методикой, когда требуется изучение тонкослоистой структуры, но для изучения опорных горизонтов ВЭЗ необходимы. Георадарная технология по причине недостаточной глубины изучения разреза (8–12 м вместо требуемых 30–40 м от дна реки) так же имеет ограничения по применению. Но для небольших рек с траншейным способом укладки трубопроводов георадарное профилирование подходит.

Для изучения разреза со слоями любой мощности по акватории реки и приурезных частей (транзитные зоны) наилучшим образом подходят сейсмо- и сейсмоакустические методики в комплексе с бурением опорных параметрических скважин. Эти методы на продольных и поперечных волнах позволяют кроме изучения тонкослоистого разреза выдавать проектировщику с различной степенью надежности также и геотехнические показатели:

- модуль деформации (модуль Юнга);
- коэффициент Пуассона;
- модуль сдвига;
- модуль сжатия;
- акустическая жесткость слоя.

Это означает приоритет волновых и, прежде всего, сейсмических технологий геофизической разведки при изучении речных долин под задачи проектирования горизонтально-направленного бурения и микротоннелирования. Приобретение дорогостоящих технологий для сбора данных и их обработки требует применения высококвалифицированного инженерного труда, так как только умелое их сочетание в едином инженерно-геологическом комплексе позволяет получать надежные результаты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сведения и рекомендации относительно планирования, выполнения и документации проектов горизонтального направленного бурения (HDD) / Техн. директивы Ассоциации буровых подрядчиков. Charlottenburger Alle 39 52068 Aachen. — 2000.
2. СНиП 11-02-96 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

3. СП 11-105-97. Ч. 1. Общие правила производства работ.
4. Спектор Ю.И., Мустафин Ф.М., Лаврентьев А.Е. Строительство подводных переходов трубопроводов способом горизонтально-направленного бурения / Уч. пособие. — Уфа, 2001.

© Коллектив авторов, 2005

Вознесенский Е.А., Фуникова В.В., Кушнарева Е.С., Коваленко В.Г. (МГУ)

#### СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЗЖИЖЕНИЕ ГРУНТОВ: МЕХАНИЗМ, ПОСЛЕДСТВИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ

**Механизмы сейсмического разжижения грунтов и формы его проявления.** Под разжижением грунта следует понимать его переход в текучее состояние вне зависимости от причины такой трансформации и величины последующих деформаций: это может быть действие как статической, так и динамической нагрузки, а также подъем уровня грунтовых вод или возникновение значительных градиентов напора. Здесь этот термин употребляется в объеме понятия «динамического разжижения» — перехода грунта в текучее состояние в результате потери прочности при разрушении структурных связей динамической нагрузкой. Сейсмическое разжижение грунта является частным случаем динамического разжижения и обусловлено разрушением структурных связей водонасыщенных дисперсных грунтов под действием сейсмических волн разного типа. Механизм и феноменология разжижения грунтов при землетрясениях определяются характером структурных связей и строением массива грунтов, рельефом участка и типом имеющихся на нем инженерных сооружений. Можно выделить два основных механизма сейсмического разжижения дисперсных грунтов.

1. Разжижение вызывается стремлением рыхлой системы к сокращению объема при прохождении волн напряжений и «взвешиванием» частиц в воде с резким падением эффективных напряжений вплоть до их исчезновения

( $\sigma' = 0$ ). Такой механизм характерен для несвязных и слабо-связных грунтов, обладающих очень слабым сцеплением. Процесс разжижения в этом случае включает разрушение структурных связей, собственно разжижение и уплотнение грунта, сопровождающееся отжатием воды из пор.

2. Разжижение вызывается резким снижением сопротивления связного грунта в результате а) падения эффективных напряжений и б) разрушения коагуляционной структурной сетки при прохождении сейсмической волны. В результате развиваются огромные деформации, внешне проявляющиеся как течение грунтовой массы. В этом случае может не происходить заметного уплотнения грунта с отжатием влаги. Необходимыми условиями возможности сейсмического разжижения грунта являются:

неустойчивость структурных связей грунта к сейсмической нагрузке (с учетом резонанса, локального усиления колебаний определенных частот, длительности сотрясений);

стремление грунта к уплотнению при сдвиговом деформировании — т.е. проявление отрицательной дилатансии; полное или близкое к нему водонасыщение грунта;

невозможность быстрой диссипации избыточного порового давления, что может быть обусловлено: а) быстрым — лавинообразным — разрушением структурных связей даже в хорошо проницаемых грунтах, б) недостаточно высокой проницаемостью грунта, в) наличием перекрывающих слабопроницаемых слоев (в т.ч. и подошвы сплошного фундамента).

Факторы, в той или иной мере влияющие на разжижаемость грунтов при землетрясениях, весьма многочисленны, а многие из них и взаимосвязаны. Их можно подразделить на общие — определяющие разжижаемость любых дисперсных грунтов и специфические — в большей степени существенные для отдельных их групп или разновидностей. На втором уровне все эти факторы — и общие, и специфические логично группируются в три категории: а) параметры сейсмической нагрузки, б) характеристики состава, строения и состояния грунта и в) особенности строения массива, включающего потенциально разжижаемые грунты.

**Потенциально разжижаемые грунты.** Выделение всей совокупности потенциально разжижаемых грунтов невозможно, поскольку их разжижаемость определяется рядом в значительной мере взаимообусловленных факторов и в каждой ситуации должна оцениваться специально. Однако можно утверждать, что при достаточной для разрушения структурных связей грунта энергии сейсмических колебаний разжижение может происходить в водонасыщенных дисперсных грунтах среднеплейстоцен-голоценового возраста, проявляющих тенденцию к уплотнению при сдвиге, и при невозможности быстрой диссипации порового давления. На практике отмечены и отдельные случаи разжижения крупнообломочных грунтов при сильных землетрясениях с  $M > 7$ : при высоком содержании пылевато-песчаного заполнителя или при наличии перекрывающего слабопроницаемого слоя. Однако можно выделить три группы наиболее легко разжижаемых грунтов, которым следует уделять особое внимание в целях сейсмического микрорайонирования.

1. Пески мелкие и средней крупности со степенью уплотнения  $I_D \leq 45$ . Более плотные разновидности, как правило, не способны к динамическому разжижению без инверсии знака напряжений.

2. Связные грунты, имеющие метастабильные структуры и низкую физико-химическую активность твердой компоненты (типа «пльвинных» глин).

3. Все слабосвязные грунты указанного возрастного диапазона в водонасыщенном состоянии (существенно пылеватые пески, супеси и легкие суглинки с удельной поверхностью менее  $30 \text{ м}^2/\text{г}$ , в т.ч. увлажненные лессовые грунты, золы уноса). Это обусловлено особенностями их смешанной по своему типу структуры — кулоновское трение меньше, чем в чистых песках, а коагуляционная сетка слабая и прерывистая. Низкая водопроницаемость затрудняет диссипацию порового давления и облегчает быстрое разжижение грунта.

**Инженерная оценка сейсмической разжижаемости грунтов.** Можно сформулировать следующие общие требования к оценке сейсмической разжижаемости грунтов для целей сейсмического микрорайонирования: 1) оценка сейсмической разжижаемости грунтов должна основываться на четких количественных критериях, определяемых экспериментально либо по надежным корреляционным зависимостям; 2) используемые показатели разжижаемости должны отчетливо соотноситься с параметрами сейсмического воздействия для расчета приращений сейсмической интенсивности по сравнению с эталонными грунтами; 3) эти показатели должны быть применимы для всего спектра потенциально разжижаемых грунтов. Всем этим условиям удовлетворяют только энергетические критерии, информативность которых обоснована в ряде работ [1, 4, 5].

*Оценка разжижаемости грунтов с помощью энергетических критериев.* Энергетический подход представляет собой новое слово в современной динамике грунтов. Энергетические критерии основаны на прямом экспериментальном определении энергии динамического воздействия, рассеянной самим грунтом. Они непосредственно связаны с энергией сейсмического воздействия и представляют собой прямые характеристики изучаемых процессов; независимы от формы волны нагружения; энергия — скалярная величина, что упрощает ее использование по сравнению с ускорением — вектором, одна из компонент которого обычно игнорируется в ущерб надежности результата; энергетические критерии не зависят от типа эксперимента, конструкции установки и применимы к любым грунтам.

С позиций энергетики процесса динамического нагружения грунта естественной мерой его сейсморазжижаемости является суммарная величина энергии, рассеянная единицей объема грунта во всех циклах воздействия к моменту разжижения, и чем выше эта величина, тем более динамически устойчив грунт. Такой критерий привлекателен и тем, что как показано в ряде работ [3, 6, 9, 10] общее количество рассеянной грунтом сейсмической энергии может быть рассчитано как часть энергии, выделившейся при землетрясении, в т.ч. и по частотным спектрам зарегистрированных или «проектных» толчков. Следовательно, исходя из магнитуды ожидаемого толчка, эпицентрального расстояния и характеристик затухания грунтов, и рассчитав суммарную величину рассеянной ими энергии ( $\Delta W_S$ ) можно перейти к определению их разжижаемости. Для этого надо определить критическую величину энергии, рассеянной грунтом на единицу его объема к моменту разжижения ( $\Delta W_L$ , кДж/м<sup>3</sup>), которая для всей совокупности циклов воздействия, например, для условий динамического трехосного сжатия выразится как

$$\Delta W_L = \sum_{i=1}^{n-1} 0.5(\sigma_{i+1} + \sigma_i)(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i), \quad (1)$$

где  $\sigma$  — приращение девиатора напряжений относительно исходного уровня;  $\varepsilon$  — осевая деформация;  $n$  — число зарегистрированных  $i$ -ых значений в процессе нагружения.

Фактор устойчивости, характеризующий потенциал разжижения грунта, выразится в энергетических терминах следующим образом:

$$F_L = \frac{\Delta W_L}{\Delta W_S}, \quad (2)$$

Для сравнения чувствительности разных грунтов к сейсмической нагрузке по набору неоднородных данных, в котором разные значения  $\Delta W$  характеризуют и разный уровень накопленных деформаций, вводится модуль энергоемкости деформирования, равный энергии, рассеянной грунтом на единицу относительной деформации, при заданном числе циклов  $N$ :

$$g_N = \frac{\Delta W_N}{\varepsilon_N}. \quad (3)$$

На основе абсолютных значений энергетических критериев все дисперсные грунты можно подразделить по разжижаемости следующим образом:

1. Легко разжижаемые — критические значения удельной рассеянной энергии разжижения  $\Delta W_L$  не превышают 10 кДж/м<sup>3</sup>.

2. Потенциально разжижаемые — грунты, разжижающиеся при наиболее сильных или длительных сотрясениях и характеризующиеся значениями  $\Delta W_L$  свыше 10 кДж/м<sup>3</sup> и модулем энергоемкости деформирования в первых десятках циклов 50–100 кДж/м<sup>3</sup>.

3. Практически неразжижаемые — имеющие модуль энергоемкости деформирования в первых десятках циклов в диапазоне более 100 кДж/м<sup>3</sup> (до 450–600 кДж/м<sup>3</sup>).

*Локализация потенциально разжижаемых грунтов и районирование территории.* Локализация потенциально разжижаемых грунтов на площади в порядке повышения детальности работ может проводиться а) по геолого-геоморфологическим критериям, б) по последствиям прошлых землетрясений, в) по результатам прямых определений разжижаемости грунтов с помощью полевых зондировочных методов.

Геолого-геоморфологические критерии могут использоваться для предварительной локализации потенциально разжижаемых грунтов при работах среднего и мелкого масштаба (не крупнее 1:50 000). Основу такого подхода составляют представления о том, что среди сравнительно рыхлых потенциально уплотняющихся грунтов встречаются в основном отложения определенного генезиса (прежде всего эолового и водного), но вероятность их сейсмического разжижения падает с возрастом по мере уплотнения и упрочнения структурных связей. Среди основных геологических критериев обычно учитываются генетический тип отложений, вероятность присутствия в разрезе несвязных разностей, возраст пород (менее 500 лет, голоценовый, др.). Геоморфологические критерии включают принадлежность к определенным геоморфологическим уровням и их элементам, углы наклона поверхности, расчлененность, специфические формы рельефа.

Составленные таким образом предварительные материалы на следующем этапе должны уточняться на основе сведений о разжижении грунтов и их последствиях при землетрясениях в прошлом. При этом могут учитываться как исторические сведения за сотни лет, так и материалы наблюдений при землетрясениях последних десятилетий (аэрофотоснимки, случаи аварий сооружений, результаты обследования сооружений и их оснований, следы оползней внезапного разжижения на склонах, наличие песчаных грифонов и т.д.). Обобщение этой информации проводится в масштабах от 1:100 000 до 1:10 000.

В дальнейшем в ходе изысканий (обычно в масштабах 1:25 000–1:5000) на этой основе проводится локализация разжижаемых грунтов по результатам комплексирования лабораторных и полевых опытных работ, а получаемые материалы служат основой карт районирования территории по возможности сейсмического разжижения грунтов. Такое районирование, в свою очередь, может выполняться на основе разных критериев, в т.ч.: а) по ожидаемой интенсивности толчков, б) по зависимости между магнитудой и эпицентральной расстоянием, в) по показателю опасности разжижения. Районирование территории по возможности разжижения, исходя из ожидаемой интенсивности толчков, основывается на результатах наблюдений за поведением грунтов в разных точках при землетрясениях разной силы в прошлом. Опыт показывает [8], что разжижение можно ожидать при интенсивности толчка более VII баллов по шкале MSK или MM, а, приняв одну из возможных зависимостей спада интенсивности с расстоянием от потенциального эпицентра, можно определить и максимальный размер зоны проявления разжижения грунтов.

Близким к этому способу по смыслу является районирование территории по возможности разжижения на основе эмпирической зависимости между магнитудой и эпицентральной (или гипоцентральной) расстоянием, которое сводится к определению наиболее удаленной от эпицентра точки, где возможно разжижение потенциально неустойчивых грунтов при толчке заданной магнитуды. Предложены различные зависимости вида  $R=f(M)$ , основанные на использовании разных магнитудных шкал, данных по разному числу произошедших землетрясений и для различных геолого-структурных зон [2, 11]. Заметим, что размеры зон разжижения, рассчитанные по выражениям разных авторов, могут различаться втрое.

Для количественной обобщенной оценки последствий возможного разжижения грунтов предлагается проводить районирование территории по показателю опасности разжижения (LSI) [12], который определяется как максимальное латеральное смещение грунта при разжижении в мм, деленное на 25 (число мм в дюйме). В случаях аномально больших смещений ( $LSI > 100$ ) этот показатель не определяется. Для представления всей этой площадной или объемной информации в целях сейсмического микрорайонирования должны составляться карты распространения потенциально разжижаемых грунтов. На разных стадиях работ они могут быть реализованы в виде:

1) геолого-геоморфологической карты с показом участков развития потенциально разжижаемых грунтов с поверхности;

2) карты грунтовых толщ с выделением толщ, содержащих потенциально разжижаемые слои;

3) инвентарных карт участков различных проявлений разжижения грунтов при прошлых землетрясениях;

4) карт районирования по риску сейсмического разжижения грунтов, показывающих зоны распространения грунтов с потенциалом разжижения  $F_L \leq 1$  при землетрясениях разной силы.

Последняя карта является основной и получается в результате наложения инвентарной карты и данных опытных (лабораторных и полевых) исследований на одну из первых двух карт-основ. Возможны и другие варианты представления такой информации.

*Оценка возможных последствий сейсмического разжижения грунтов.* Последствия сейсмического разжижения грунтов с позиций возможных повреждений инженерных сооружений и сельскохозяйственных земель определяются тремя основными факторами: потенциалом разжижения пласта и его мощностью, углом склона и наличием неразжижающегося слоя поверх разжижаемого.

Если мощность верхнего неразжижающегося слоя  $H_1$  больше мощности подстилающих разжижающихся грунтов  $H_2$ , то расположенные на поверхности массива сооружения не испытают значительных повреждений. И чем больше отношение  $H_1/H_2$ , тем меньше ожидаемый ущерб. В случае однородной толщи величина  $H_1$  должна приниматься равной глубине уровня грунтовых вод. Ожидаемый ущерб при прочих равных условиях возрастает с понижением потенциала разжижения грунтов, увеличением их мощности и углов наклона рельефа. Количественная оценка степени ожидаемых повреждений сооружений и коммуникаций может выполняться на основе обобщенного потенциала разжижения [7]

(5)

где  $z$  — глубина, м;  $F(z)$  — функция потенциала разжижения  $F_L$ :  $F(z)=1-F_L$ , но при  $F_L > 1$   $F(z)=0$ ;  $w(z)=10-0,5z$ . Величина  $P_L$  может варьировать от 0 до 100. Наибольший ущерб сооружениям наносится при обобщенном потенциале разжижения более 15, а при  $P_L < 5$  последствия незначительны.

*Оптимизация принятия инженерных решений при оценке сейсмического разжижения грунтов для целей сейсмического микрорайонирования.* Выбор оптимальных методов и критериев оценки возможности сейсмического разжижения грунтов должен определяться классом возводимых на исследуемой территории сооружений и ее фоновой сейсмичностью. При сейсмичности участка выше 6 баллов и для сооружений класса А и Б следует использовать прямые методы определения потенциала разжижения грунтов в комплексе с косвенными полевыми методами для их последующей локализации на площади. Для остальных сооружений, а также при фоновой сейсмичности менее 6 можно использовать косвенные методы оценки разжижаемости грунтов. В случае применения прямых лабораторных методов целесообразно оценивать возможность сейсмического разжижения грунтов с помощью энергетических критериев. Методы динамического и вибрационного зондирования могут быть модифицированы применительно к энергетическому подходу на основе корреляции с данными лабораторных испытаний.

При определении приращения сейсмической балльности для микрорайонирования по разжижаемости грунтов следует руководствоваться следующими принципами.

1. Приращение балльности на наличие разжижаемых грунтов следует вводить для участков с фоновой сейсмичностью не ниже 7.

2. Определение приращения сейсмической балльности следует проводить по величине обобщенного потенциала разжижения грунтов и с учетом угла наклона поверхности массива.

3. Итоговая величина приращения балльности  $\Delta I_L$  определяется как сумма приращений по обобщенному потенциалу разжижения  $\Delta I_p$  и по углу склона  $\Delta I_\alpha$ :

$$\Delta I_L = \Delta I_p + \Delta I_\alpha \quad (6)$$

Значения соответствующих поправок приведены в таблице.

Обобщенный потенциал разжижения	$\Delta I_p$	Угол склона, град	$\Delta I_\alpha$
$0 < P_L \leq 5$	1,0	$0 \leq \alpha \leq 0,3^\circ$	0
$5 < P_L \leq 15$	2,0	$0,3^\circ < \alpha \leq 3^\circ$	0,5
$P_L > 15$	3,0	$\alpha > 3^\circ$	1,0

Таким образом, в особо неблагоприятных с точки зрения возможных последствий разжижения условиях балльность участка с учетом сейсмического микрорайонирования превысит 9, что может исключить строительство в таком месте без предварительного улучшения свойств грунтов.

Итак, учет возможности разжижения грунтов для целей сейсмического микрорайонирования должен основываться на результатах специализированных работ, проводимых в несколько стадий.

1. Локализация потенциально разжижаемых грунтов в виде соответствующей геолого-геоморфологической карты или карты грунтовых толщ; при необходимости может быть также составлена инвентарная карта проявления разжижения грунтов.

2. Экспериментальное определение потенциала разжижения этих грунтов путем прямых лабораторных испытаний.

3. Детализированная локализация потенциально разжижаемых грунтов на площади с применением динамического или статического зондирования на основе полученных корреляционных зависимостей.

4. Составление карты микрорайонирования территории по риску сейсмического разжижения грунтов.

5. Определение приращения сейсмической балльности по величине обобщенного потенциала разжижения грунтов и угла склона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. — М.: УПСС Эдиториал, 1999.
2. Ambraseys N.N. Engineering seismology // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. — 1988. — Vol. 17. — P. 1–105.
3. Berrill J.B.; Davis R.O. Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: revised model // Soils and Foundations. — 1985. — V. 25, № 2. — P. 106–118.
4. Cao, Y.L. & Law, K.T. Energy dissipation and dynamic behaviour of clay under cyclic loading // Canadian Geotechnical Journal. — 1992. — № 29. — P. 103–111.
5. Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liang L. & Dahisaria, N.M. Evaluation of Soil Liquefaction by Energy Principles // Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE. — 1994. — № 120. — P. 1554–1569.
6. Hasegawa H.S., Basham P.W., & Berry M.J. Attenuation relations for strong seismic ground motion in Canada // Bull. Seismological Society of America. — 1981. — № 71. — P. 1943–1962.
7. Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S., Sato H. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods / Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. On Microzonation. Seattle. — 1982. — Vol. 3. — P. 1319–1330.



8. *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards / Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. — TC4, ISSMFE. — 1993.*
9. *Nuttli O.W.* The relation of sustained maximum ground acceleration and velocity to earthquake intensity and magnitude // *US Army Engineer Waterways Experiment Station. — 1979. — Misc. Paper S-76-1. — Rep. 16, 74.*
10. *Trifunac, M.D.* Empirical criteria for liquefaction in sands via standard penetration tests and seismic wave energy // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 1995. — № 14. — P. 419–426.*
11. *Wakamatsu K.* Maps for historic liquefaction sites in Japan. — Tokai University Press, 1991 (in Japanese).
12. *Youd T.L., Perkins D.M.* Mapping of liquefaction severity index // *J. GED, ASCE. — 1987. — Vol. 113, № 11. — P. 1374–1392.*

© Быков А.П., Кулеш В.П., Москалик Л.М., 2005

Быков А.П., Кулеш В.П., Москалик Л.М. (ОАО «Завод НефтеКИП»)

### ЛАЗЕРНЫЙ ГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ГРАВИМЕТР

В гравиметрической геологоразведке наиболее распространенными являются пружинные гравиметры, в которых силу притяжения  $Mg$  пробной массы  $M$  уравновешивают силой упругой деформации  $Ku$  упругой системы (пружины) с жесткостью  $K$  и измеряют величину деформации  $u$  упругой системы [2]. Зная пробную массу и жесткость упругой системы, ускорение земного тяготения  $g$  определяют по формуле

$$g = \frac{K \cdot y}{M} \cdot 14 \quad (1)$$

Измерение полной деформации упругой системы с высокой точностью является сложной технической задачей. Поэтому обычно создаются относительные пружинные гравиметры, предназначенные для измерений изменений силы притяжения в сравнительно узком диапазоне. В них упругая система постоянно находится в нагруженном состоянии, и при измерении регистрируют приращения величины упругой деформации, вызванные изменениями силы притяжения. При таком методе необходимо производить начальный отсчет в опорной точке, в которой ускорение земного притяжения известно или считается неизменным, контрольным. В данной работе предложено измерять величину деформации упругой системы с помощью лазерного гетеродинного измерителя перемещений, обладающего практически неограниченным диапазоном непрерывного измерения при сохранении постоянной высокой разрешающей способности [1]. При этом появляется возможность построения не только относительно, но и полнодиапазонного пружинного гравиметра.

Лазерный гетеродинный измеритель перемещений содержит одночастотный стабилизированный лазер, электрооптический частотный модулятор (ЭОЧМ) [3], интерферометр, включающий подвижную и неподвижную части, взаимное перемещение которых измеряется, фотоэлектрический преобразователь и фазоцифровой преобразователь. В интерферометре с помощью ЭОЧМ смещают оптическую частоту одной из двух волн света, отразившихся от подвижной или неподвижной частей интерферометра, на величину, принадлежащую радиочастотному диапазону. На выходе интерферометра осуществляют фотоэлектри-

ческое преобразование проинтерферировавшего света в электрический радиочастотный сигнал, переменная составляющая которого имеет частоту, равную упомянутой величине смещения оптической частоты волны света.

С помощью фазоцифрового преобразователя измеряют фазу переменной составляющей полученного электрического сигнала и по измеренному приращению фазы и известной длине волны света лазера определяют величину деформации упругой системы. Высокая разрешающая способность в измерении перемещений обусловлена высоким разрешением измерения дробной части набега фазы, а практически неограниченный диапазон обеспечивается путем кумулятивного счета числа целых циклов набега фазы [4].

Оптическая схема лазерного интерферометра обеспечивает чувствительность, при которой одному периоду изменения фазы соответствует перемещение подвижной части интерферометра на величину, равную одной четверти длины волны лазера. Для гелий-неонового лазера длина волны в воздухе при нормальных условиях равна  $\lambda=0,6328$  мкм, поэтому одному периоду измерения фазы соответствует перемещение  $\Delta x_f=158,5$  нм. Дифференциальная оптическая схема удваивает чувствительность интерференционного измерителя перемещений, тогда  $\Delta x_f=79,25$  нм.

Принцип оптического гетеродинирования обеспечивает измерение в дробной части периода фазы с разрешением до  $1/1000$ . В итоге предел разрешения лазерного гетеродинного интерференционного измерителя перемещений составляет около  $0,08$  нм при практически неограниченном динамическом диапазоне. Это значит, что относительный предел разрешения лазерного гравиметра  $10$  мГал ( $1 \cdot 10^{-8}$  g) может быть достигнут при полной деформации упругого элемента, равной  $8$  мм.

Практически неограниченный динамический диапазон лазерного гетеродинного интерференционного измерителя перемещений реализуется, когда осуществляется непрерывное измерение перемещений (например, для гравиметра в режиме мониторинга). Статический диапазон измерения, т.е. та часть показаний, которая восстанавливается без потерь информации при выключении-включении прибора, в рассмотренном примере составляет примерно  $10$  мГал. Для расширения статического диапазона необходимо принимать дополнительные меры. Вот некоторые из них:

1. Проведение регулярных или эпизодических циклов полного разгрузки-нагрузки упругого элемента в каждом сеансе измерений. При этом восстанавливается полное число целых периодов изменения фазы, и диапазон измерения расширяется на всю измеряемую величину. Недостаток такого варианта в том, что в результатах измерений максимально проявляются кратковременные несовершенства и нестабильность характеристик упругости материала.

2. Проведение регулярных или эпизодических циклов частичного разгрузки-нагрузки упругого элемента до фиксированной известной величины деформации, например, до ограничителя. Величина частичного разгрузки может составлять доли процента от полной деформации, тогда в той же пропорции уменьшается и диапазон измерений, и влияние кратковременных несовершенств и нестабильности характеристик упругости.

3. Введение дополнительных «грубого» канала измерений деформации, позволяющего расчетным путем восстановить полное число целых периодов изменения фазы.

Статический диапазон прибора в этом случае будет определяться диапазоном «грубого» канала.

Основными источниками погрешности лазерного гравиметра, как ожидается, могут стать несовершенства упругости материала упругого элемента и механическая нестабильность конструкции. Справочные данные по зависимости модуля упругости материала от внешних факторов (температуры, магнитного поля и др.), а также нестабильности характеристик упругого и неупругого последствия, не имеют достаточной точности и полноты. Кроме того, эти характеристики могут значительно различаться в разных партиях одного и того же материала, а также сильно зависят от режимов термообработки и старения. Поэтому оценка влияния характеристик упругости материала может быть осуществлена только экспериментальным путем. Поэтому, дополнительной целью данной работы являлось создание прецизионной экспериментальной установки для исследований несовершенств упругости материалов для упругих элементов гравиметров.

Принцип работы полнодиапазонного гравиметра заключается в том, что при каждом измерении гравитации с помощью пробной массы осуществляют полное нагружение линейной не астазированной упругой системы, лазерным измерителем измеряют величину полной деформации этой упругой системы и по формуле (1) определяют полную величину ускорения земного тяготения  $g$ . В гравитационной геологической разведке при этом отпадает необходимость возвращаться к исходному опорному пункту маршрута, что может значительно сократить и упростить полевые работы.

Для достижения заданной точности измерения гравитации выполняют серию циклов, включающих операции нагружения, выдерживания заданное время в нагруженном состоянии, разгрузки и выдерживания заданное время в разгруженном состоянии, регистрируют значения величины деформации упругой системы на полочках в нагруженном и разгруженном состояниях, определяют разность значений величины деформации в нагруженном и разгруженном состояниях и по величине полученной разности и известным значениям пробной массы и коэффициента жесткости упругой системы определяют значение гравитации.

При таком методе определения гравитации упругая система в исходном, нерабочем состоянии находится в разгруженном состоянии, что многократно уменьшает проявления долговременных несовершенств упругости материала, уменьшает процессы текучести, старения и усталости материала и улучшает условия работы упругой системы. Более того, уменьшаются или исключаются вовсе влияния на упругую систему общих помех измерениям, одинаковых в разгруженном и нагруженном состояниях, таких, например, как влияния магнитного поля земли, усталости и нестабильности конструкции прибора и др. Это также способствует увеличению точности определения гравитации.

На рис. 1 изображена принципиальная структурная схема лазерного гетеродинного полнодиапазонного гравиметра. На схеме показаны: упругая система 1, имеющая неподвижную часть 1.1, жестко закрепленную на основании прибора, и подвижную часть 1.2, на которую установлена пробная масса (груз), 2 — устройство циклического нагружения 3 — включающее направляющий механизм 3.1, и приводной узел 3.2. Лазерный гетеродинный измеритель перемещений содержит лазер 4 со стабилизированной длиной волны излучения, двухплечий интерферометр 5, вклю-

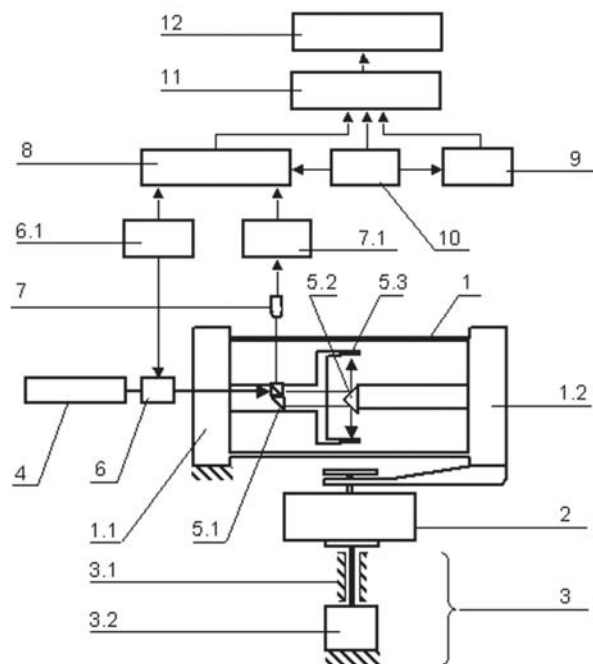


Рис. 1. Принципиальная структурная схема лазерного гетеродинного полнодиапазонного гравиметра

чающий поляризационный светоделитель 5.1, призму 5.2 подвижной части интерферометра и отражательные элементы 5.3 неподвижной ее части, электрооптический частотный модулятор 6 с генератором 6.1, фотоэлектрический преобразователь оптического сигнала в электрический 7, с усилителем 7.1, фазоцифровой преобразователь с реверсивным счетом целого числа набего интерференционных полос 8, таймер 9, систему синхронизации 10, устройство регистрации данных 11 и персональный компьютер 12. Призма 5.2 подвижной части интерферометра жестко связана с подвижной частью упругой системы, а отражатели 5.3 — с ее неподвижной частью.

Интерферометр, упругая система 1, груз 2 и устройство циклического нагружения 3 помещены в термостатированную герметичную камеру. Упругая система выполнена в виде упругого параллелограмма, максимально проста, без использования схемной температурной компенсации. Применение точного двухступенчатого термостата и специальной конструкции термостатированной камеры обеспечивает постоянство температуры внутри камеры не хуже  $3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ . Поправка на оставшиеся малые изменения температуры вводится программным путем с использованием нескольких прецизионных температурных каналов.

Фазоцифровой преобразователь (фазометр) позволяет измерять сдвиг фазы между входным сигналом, поступающим от фотоприемника после усиления, и внутренним опорным сигналом несущей частоты, получаемой от тактового генератора после деления его частоты в  $2^n$  раз  $n$ -разрядным двоичным счетчиком [4]. При этом обеспечивается измерение фазы в пределах периода с разрешением  $1/2^n$  часть периода и реверсивный счет целых циклов набего фазы, если фазовый сдвиг выходит за пределы периода. Структурная схема фазометра приведена на рис. 2. Генератор Г формирует последовательность тактовых импульсов, поступающих на вход  $n$ -разрядного двоичного счетчика Сч. На выходе старшего  $n$ -го разряда этого счетчика Сч образуется сигнал несущей частоты, которая

в 2<sup>n</sup> раз ниже частоты тактовых импульсов. С помощью логических узлов SIN и COS и двух цифроаналоговых преобразователей ЦАП1 и ЦАП2 формируются синусоидальное и косинусоидальное напряжения несущей частоты, поступающие на электрооптический частотный модулятор.

Электрический сигнал несущей частоты с выхода фотоприемника ФП усиливается усилителем-компаратором УК и поступает на вход формирователя Ф1. По нулевому переходу этого сигнала формируется короткий импульс, поступающий на вход записи регистра Rr1. На информационные входы этого регистра подаются данные разрядов счетчика Сч. Эти данные, зафиксированные в момент нулевого перехода в регистре Rr1, представляют собой измеряемый фазовый сдвиг в пределах периода.

Для реверсивного счета целых фазовых циклов служат формирователи Ф2 и Ф3, элемент «исключающее ИЛИ» XOR, элементы И1 и И2 и реверсивный счетчик РС. На вход сложения «+» реверсивного счетчика РС поступает импульс от формирователя Ф2 в тот момент, когда два старших разряда регистра Rr1 переходят из состояния 11 в состояние 00. Если произошел переход этих разрядов из состояния 00 в состояние 11, то импульс от формирователя Ф3 поступает на вход вычитания «-» реверсивного счетчика. Коды с реверсивного счетчика РС и регистра Rr1 поступают на информационные входы регистра Rr2 в качестве целочисленной и дробной части выходного слова результата измерения фазы. Выходы Rr2 подключаются к шине персонального компьютера ПК. Запись данных в Rr2 происходит постоянно с частотой тактового генератора (через элемент &) и прерывается на время передачи данных из Rr2 в компьютер. В момент включения лазерного интерферометра реверсивный счетчик целого числа периодов набега фазы находится в нулевом состоянии. В процессе работы лазерный интерферометр регистрирует дробную часть фазы и число целых периодов изменений фазы с момента включения прибора.

На этом принципе разработано несколько вариантов фазометров: одноканальный, одноканальный интегрирующий, двухканальный, двухканальный интегрирующий и дифференциальный интегрирующий. Схемы фазометров реализованы на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) на плате шины ISA персонального компьютера.

Система циклических нагружений электрогидравлического типа содержит две части, задающую и исполнительную. Задающая часть расположена вне герметичной камеры, а исполнительная — внутри нее. Обе части имеют одинаковые гидроцилиндры, соединенные гидротрассой. Перемещение поршня задающего гидроцилиндра обеспечивается с помощью шагового двигателя, управляемого от персонального компьютера. Поршень исполнительного гидроцилиндра связан с грузом. Исполнительная часть

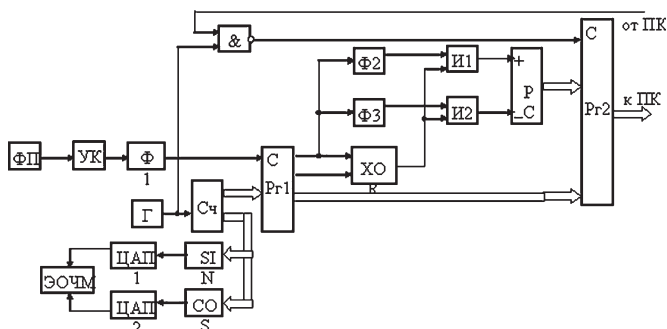


Рис. 2. Структурная схема фазоцифрового преобразователя

имеет шарнирный параллелограмм, геометрически подобный упругому параллелограмму, и обеспечивающий параллельность движения груза и подвижной части упругой системы и уменьшающий тем самым контактные возмущения при наложении груза на упругую систему и снятии его.

Максимальная скорость движения груза — 2 мм/с. Однако при нагружении и разгрузке упругой системы целесообразно к моменту выхода на полочку уменьшать скорость движения груза (притормаживать) до величины, меньшей виброскорости установившихся под действием внешних возмущений (микросейсмике) колебаний.

Вследствие того, что из-за необратимых составляющих несовершенства упругости материала последствия при нагружении и разгрузке упругой системы имеют разные кривые временного хода, при измерении деформации могут набегать неучтенные смещения результатов определения гравитации. Поэтому целесообразно последовательно выполнять, по меньшей мере, два цикла, включающих операции, нагружения, выдерживания в нагруженном состоянии, разгрузки и выдерживания в разгруженном состоянии; определять разности значений деформации стабилизации материала в нагруженном и разгруженном состояниях как при нагружении упругой системы, так и при ее разгрузке; а значение гравитации определять с учетом обеих полученных разностей значений деформации стабилизации материала. При этом лучшие результаты в определении гравитации могут быть достигнуты, если периодически повторять циклы нагружения и разгрузки в течение длительного времени. В упрощенном варианте узкодиапазонного гравиметра система циклических нагружений отсутствует, и упругая система находится в нагруженном состоянии постоянно.

**1. Работа гравиметра.** При поступлении на ЭОЧМ управляющего квадратурного электрического сигнала ( $\sin(\Omega t)$  и  $\cos(\Omega t)$ ) на его оптическом выходе образуются две коллинеарные волны света, имеющие ортогональные поляризации и отличающиеся по частоте на величину  $\Omega$ . На входе интерферометра установлен поляризационный светоделитель 5.1, разделяющий указанные компоненты света с разными частотами на два отдельных луча. Эти лучи призма 5.2 подвижной части интерферометра направляет в противоположные (по вертикали) стороны на одинаковые отражатели 5.3 неподвижной части. Отраженные ими лучи возвращаются по своему же пути в светоделитель, в котором вновь объединяются и, интерферируя, поступают на фотоприемник 7, преобразующий оптический сигнал в электрический, имеющий частоту  $\Omega$  и фазу  $\varphi$ , пропорциональную оптической разности хода лучей в интерферометре. Когда призма подвижной части находится строго посередине между отражателями неподвижной части, оптические длины путей света в плечах интерферометра равны, и фаза соответствующего электрического сигнала принимается за нуль. Смещение призмы подвижной части на величину  $y$  в ту или иную сторону приводит к изменению измеряемой фазы сигнала соответствующего знака. При этом фазоцифровой преобразователь регистрирует набег фазы, включающий целое число периодов  $N$  и дробную ее часть  $\varphi$  в соответствии с формулой

$$N + \varphi = \frac{4}{\lambda} \cdot y, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны света лазера;  $\varphi$  — выражена в долях периода.

В исходном состоянии, когда упругая система разгружена, регистрируется начальное показание фазоцифрового преобразователя  $N_0 + \varphi_0$ . После завершения нагружения регистрируется конечное показание фазоцифрового преобразователя  $N + \varphi$ . Величину деформации упругой системы определяют по формуле

$$y = \frac{\lambda}{4} \cdot (N - N_0 + \varphi - \varphi_0),$$

после чего искомую величину гравитационного ускорения  $g$  определяют по формуле (1).

При выключении-включении прибора информация о целом числе периодов приращения фазы  $N$  теряется. Поэтому статический диапазон прибора определяется соотношениями

$$\Delta y = \frac{\lambda}{4} \quad \text{и} \quad \Delta g = \frac{K \cdot \Delta y}{M}.$$

**2. Предварительные результаты.** Экспериментальные исследования полнодиапазонного гравиметра проводились с упругими элементами из сплавов Д16Т, В95, БрБ2 и плавленого кварца. Установлено, что основным источником погрешности являются не устраненные и некомпенсированные кратковременные составляющие несовершенств упругости материалов. Лучшие результаты получены с упругим элементом из плавленого кварца. Относительная повторяемость измерений с осреднением за 5 мин составила  $\pm 0,3$  мГал. Градуировка полного диапазона гравиметра не проводилась. Фрагмент записи результатов измерений полнодиапазонным гравиметром с кварцевым упругим элементом показан на рис. 3.

Экспериментальные исследования узкодиапазонного гравиметра со статическим диапазоном проводились с упругими элементами из легированной стали и плавленого кварца. Оба упругих элемента показали близкие по точности результаты. Относительная повторяемость измерений с осреднением за 5 мин составила  $\pm 0,01 \dots 0,03$  мГал. Однако металлический упругий элемент представляется более предпочтительным из-за меньшей температурной чувствительности (менее 35 мГал/°С против 180 мГал/°С у кварца) и большей механической прочности и надежности. Фрагмент записи результатов измерений узкодиапазонным гравиметром с упругим элементом из легированной стали показан на рис. 4. Основным источником погреш-



Рис. 3. Результаты измерений полнодиапазонным гравиметром с кварцевым упругим элементом

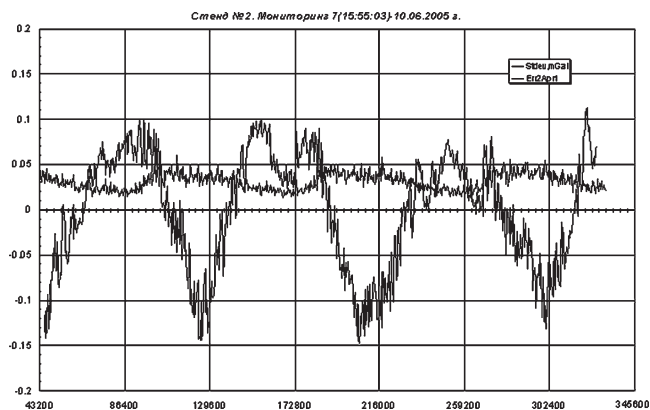


Рис. 4. Результаты 3-суточного мониторинга узкодиапазонным гравиметром с упругим элементом из легированной стали

ности, как позволяют предположить исследования, являются жесткость и температурная неустойчивость основания лазерного гетеродинного интерферометра и крепления узлов прибора, т.е. зависимость их взаимного положения от внешних условий.

Итак, результаты исследований по разработке гравиметра с лазерным гетеродинным измерителем перемещений в качестве чувствительного элемента деформации упругой системы показали, что в полнодиапазонном режиме работы его относительная погрешность составила  $\pm 0,3$  мГал. Установлено, что в этом режиме основной причиной погрешности являются некомпенсированные кратковременные несовершенства упругости материала упругой системы. Погрешность гравиметра в узкодиапазонном режиме на порядок ниже (менее  $\pm 0,03$  мГал). В этом случае точность прибора ограничивается механической жесткостью и температурной неустойчивостью основания и элементов крепления, т.е. его конструктивными и особенностями технологии изготовления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Быков А.П., Кулеш В.П., Москалик Л.М., Орлов А.А. Применение лазерных измерителей перемещений при создании высокоточных силоизмерительных приборов / В сб.: Датчики систем измерения, контроля и управления. — Пенза: ППИ, 1985. — С. 67–71.
2. Веселов К.Е. Гравиметрическая съемка. — М.: Недра, 1986.
3. Кулеш В.П. Анализ работы электрооптического частотного модулятора в качестве оптического гетеродина // Измерительная техника. — 1986. — № 12. — С. 33–35.
4. Кулеш В.П., Москалик В.Л., Москалик Л.М. Устройство для счета интерференционных полос / А.с №1598610, 1988.

© Щеголькова Н.М., 2005

Щеголькова Н.М. (МГУП «Мосводоканал»)

#### НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. МОСКВЫ

В условиях, когда муниципальные очищенные воды по расходу становятся соизмеримы с расходом рек-водоприемников, роль станций очистки сточных вод в биогеохимических циклах урбоэкосистем все возрастает [4, 5, 8]. Водная среда Московского мегаполиса уникальна. Выпуски биологически очищенных вод (БОВ) Курьяновской станции аэрации (КСА) и Люберецкой станции аэрации

(ЛСА) составляют около 55 % стока реки ниже города. Тяжелые металлы являются одними из самых распространенных консервативных загрязнителей р. Москвы. Работа выполнялась в рамках экологического производственного мониторинга по оценке воздействия БОВ КСА и ЛСА на р. Москву в МГУП «Мосводоканал».

**Целью работы** являлось изучение закономерностей распределения тяжелых металлов в донных отложениях на участке р. Москвы в районе выпуска КСА. Проводилась оценка пространственной и временной динамики факторов формирования химического состава воды и донных отложений, а также оценка особенностей влияния БОВ на формирование донных отложений в отличие от других поверхностных вод города.

**Объекты исследования.** Структура поступления загрязняющих веществ в черте города была представлена ранее в работе [2]. Анализ гидрохимических данных показывает, что влияние БОВ сказывается в основном по таким показателям, как биоокисляемое органическое вещество и биогенные элементы. Большая часть железа и ТМ попадает в реку с городским стоком. Исследования донных отложений проводилось на участке реки от 152 до 90 км судового хода [1] — на участке р. Москвы, на котором расположены выпуски КСА (144,5 км судового хода) и ЛСА (107 км судового хода). Пробоотбор осуществлялся по фарватеру реки пробоотборником Экмана с глубины 0–10 см. Выполнены анализы донных отложений: определение содержания органического вещества по потере при прокаливании (ППП), определение валового содержания фосфора, азота, валового содержания металлов (эмиссионно-спектроскопический анализ), подвижных форм металлов (ацетатно-аммонийная вытяжка, 1 — нормальная азотнокислотная вытяжка, атомно-абсорбционный метод), гранулометрический анализ донных отложений, определение содержания растворенного кислорода на исследуемом участке: по руслу реки и по глубинам (0,5 м; 1 м; далее через 1 м, последнее измерение — в 5 см от дна) кислородным датчиком Oгion-830.

**Результаты исследования.** Для оценки процессов перераспределения ТМ крайне важно оценить гидрологические особенности реки, которые связаны с гранулометрическим и композиционным составом взвешенных веществ

(ВВ) и донных отложений (ДО). Антропогенные изменения русла реки в городской черте в течение XIX–XX вв. (спрямление, углубление, расширение) привели к тому, что русло представляет собой чередование стремнинных участков со скоростью течения в межень 0,15–0,25 м/с и зон с увеличением площади сечения, где скорость снижается до 0,01–0,05 м/с. Участки расширения русла: Южный порт, Братеево, Бесединский, Лыткаринский, Островецкая лука. Глубина реки в расширениях меняется от 4 до 7 м. Участки русла, где увеличение площади сечения происходит за счет углубления реки (до 15 м и более): Перервинская (ниже плотины) и Сабуровская ямы. В зонах ловушек образуются скопления органогенных илов мощностью более 0,6 м. Потеря при прокаливании донных отложений в районах зон-ловушек более 8 %. По результатам гранулометрического анализа здесь наблюдалось максимальное содержание частиц менее 0,001 мм (8–32%).

Оценка качества взвеси произведена по данным экомониторинга за период с 1970 г. в створах выше КСА, выпуска КСА, Беседы (10 км ниже выпуска) и Заозерье (34 км ниже выпуска). Проанализировано содержание органического вещества во взвешенных веществах по данным потери при прокаливании, выраженное в % (рис. 1). Этот показатель, известный в литературе как взвешенное органическое вещество (ВОВ) очень важен, так как характеризует происхождение взвешенных веществ. Значения средних достоверно различаются для всех четырех створов. Средние значения ППП показывают, что наибольшее содержание (ВОВ) несет воды выпуска КСА (59 %). ВОВ реки выше выпуска почти на 10 % более «минеральные», наименьшее значение ВОВ присуще створу Заозерье (ППП=21%). На расстоянии 34 км от выпуска КСА взвешенные вещества КСА практически полностью трансформируются. ППП ВВ снижается более чем вдвое. В створе Заозерье минеральная и органоминеральная взвесь наблюдается гораздо чаще, чем органогенная.

Взвесь городского участка является преимущественно органогенной уже выше выпуска КСА. Выпуск КСА меняет соотношение мертвого и живого вещества во взвеси, добавляя заметную часть бактериопланктона [7]. К физико-химическому процессу сорбции загрязнителей на взвеси добав-

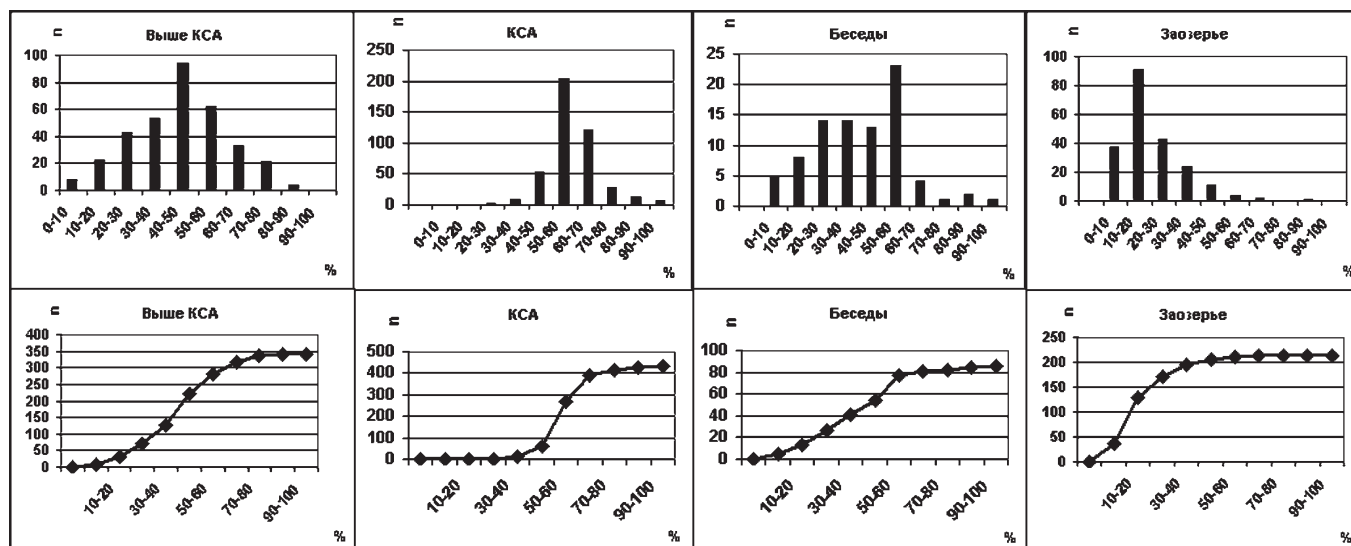


Рис. 1. Диаграммы характера распределения значений ВОВ (%) в четырех выборках

ляются процессы биологические, связанные с ассимиляцией загрязнителей клетками планктонных организмов.

Органические частицы, выпадающие как на стремлине, так и в зонах-ловушках, сорбируют на себе значительное количество ТМ. Учитывая, что зоны-ловушки имеют заметно большие запасы органического вещества, их сорбционная емкость за счет этого выше.

Трансформация соединений железа также может оказывать влияние на перераспределение ТМ в ДО. Качество очищенных вод и речных различается. Значимо различается содержание железа и фосфатов. Если для речной воды в среднем характерны концентрации железа общего 0,2–0,4 мг/л, то для очищенной — 0,05–0,15 мг/л. При этом содержание фосфатов в очищенной воде превышает содержание фосфатов в речной в несколько раз. В речной воде — 0,05–0,1 мг/л (по Р), в очищенной — 1,2–1,3 мг/л. Учитывая, что растворенное железо от общего для р. Москвы составляет, как правило, около 20 %, можно утверждать, с большой долей вероятности, что в месте смешения очищенных вод и речных происходит осаждение фосфатов железа. Содержание железа как растворенного, так и общего в месте смешения вод в несколько раз меньше содержания фосфатов (в мольном выражении). А это значит, что свободно-ионное железо в речной воде может быть связано в виде нерастворимых фосфатов. Аэробная обстановка данного участка реки благоприятствует прохождению этой реакции, содержание кислорода в месте смешения всегда более 4 мг/л. Подтверждением тому, что в местах выпусков происходит осаждение фосфатов железа служит исследование валового содержания железа и фосфора по руслу реки (рис. 2). Выявлено, что ниже выпуска КСА содержание фосфора в ДО возрастает в 2–3 раза и держится на этом уровне около 40 км ниже по течению. При этом отмечается максимальное увеличение содержания фосфора в первых зонах-ловушках ниже выпусков московских станций аэрации: для КСА — в Сабуровской яме, для ЛСА — в Островцевой луке. Здесь содержание фосфора увеличивалось в 7–8 раз (до 3,5 %). Увеличение содержания фосфора в донных отложениях ниже выпусков муниципальных сточных вод отмечалась и для других европейских рек [9].

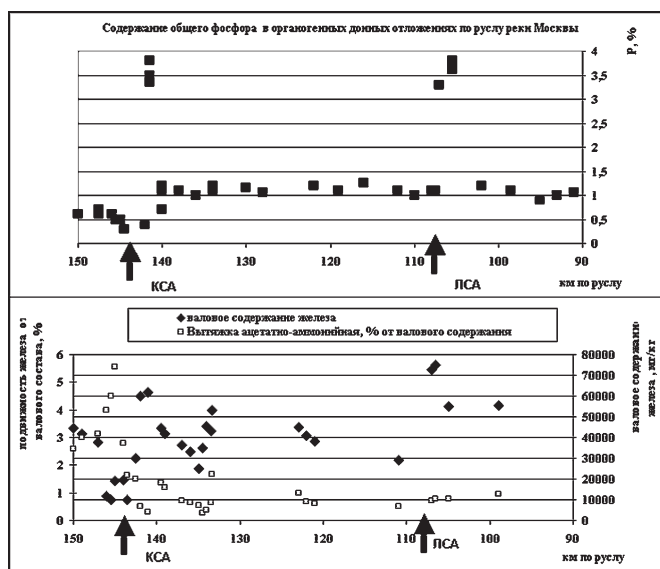


Рис. 2. Изменение содержания общего фосфора и железа и подвижности железа в ацетатно-аммонийной вытяжке в среднем течении р. Москвы

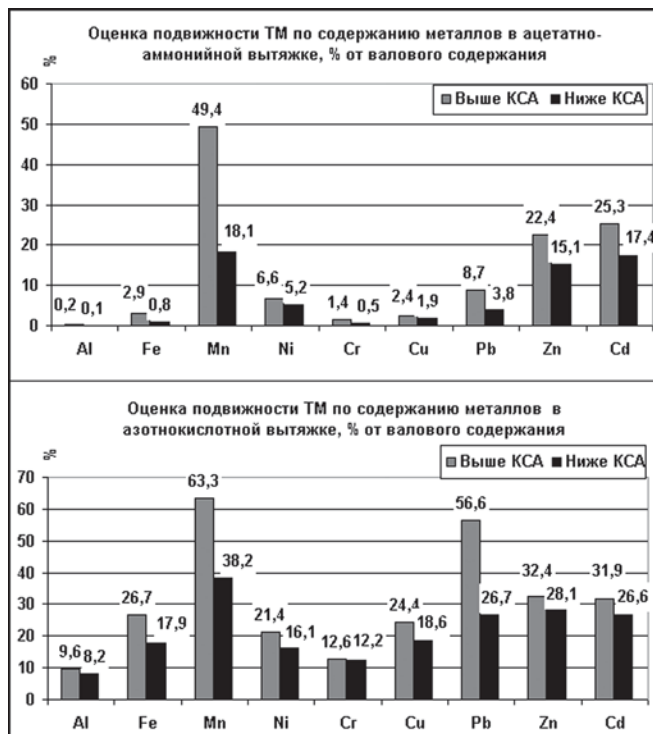


Рис. 3. Изменение подвижности металлов в донных отложениях ниже выпуска КСА (по средним данным)

Первые после выпусков зоны-ловушки являются зонами с повышенным содержанием железа и ТМ. При этом подвижность металлов в этих зонах, определяемая ацетатно-аммонийной вытяжкой, ниже в 3–5 раз, чем подвижность металлов в других пунктах наблюдения (рис. 2, 3). Это свидетельствует об изменении здесь форм нахождения металлов, что может являться следствием осаждения фосфатов ТМ и соосаждения их с фосфатом железа. [6].

Таким образом, очищенные воды выступают в качестве сорбционного и химического барьера для ТМ, переносимых речными водами с вышерасположенного участка реки. Ранее было описано, что в р. Москве выделены зоны со стратификацией кислорода по глубине [6]. Заметное снижение содержания кислорода в придонном слое (до значений менее 1 мг/л) было характерно для зон-ловушек, где происходит максимальное накопление донных органических осадков. Позже было зафиксировано сезонное изменение глубины уровня снижения кислорода (колебания от 6–7 м в летний период до 9–11 м в весенне-осенний). Поскольку наиболее типичными движущими силами обменных процессов в системе «донные отложения — поровый раствор» является градиент изменения окислительно-восстановительных условий, то можно предположить, что внутригодовое изменение окислительно-восстановительных условий влечет за собой изменение в ДО сульфат-сульфидного равновесия, которое сводится либо к образованию сероводорода за счет процессов сульфатредукции, либо к его окислению [3], а, следовательно, к накоплению ТМ в виде нерастворимых сульфидов при анаэробных условиях летне-осеннего сезона и высвобождению их в поровую воду при окислении в зимне-весеннее время года.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карта реки Москва. От поселка Рублево до устья. ПО «Канал имени Москвы». — М., 1991.

2. Криксунов Е.А., Лобырев Ф.С., Бурменский В.А. и др. Оценка состояния ихтиофауны реки Москвы в зоне влияния станций аэрации. // Вода и экология. Проблемы и решения. — 2005. — № 2 (23). — С.42–52.
3. Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода — взвешенное вещество — донные отложения речных экосистем. / Аналит. Обзор / ГПНТБ СО РАН; ИВЭП СО РАН. — Новосибирск, 2001.
4. Храменков С.В., Пахомов А.Н., Данилович Д.А. и др. Влияние очищенных вод московских станций аэрации на качество воды реки Москвы. // Водоснабжение и санитарная техника. — 2004. — № 12. — С. 9–16.
5. Щеголькова Н.М., Аджиенко В.Е., Данилович Д.А., Козлов М.Н. Роль станций аэрации в перераспределении веществ в условиях московской урбоэкосистемы. / Междунар. симпозиум «Функции почв в системе геосфера-биосфера» — М., 26–29 августа 2001 г. — С. 334–335.
6. Щеголькова Н.М., Козлов М.Н. Исследование донных отложений в среднем течении р. Москвы. / Развитие московской канализации. — М., 2003. — С. 298–312.
7. Щеголькова Н.М., Пушкарь В.Я. Эволюция планктонных сообществ в зоне влияния биологически очищенных вод по данным лабораторного моделирования / 4-й съезд Гидроэкологического общества Украины. — Феодосия, 2005.
8. Jansson H, Stintzing A. R., Vinneres B and Salomon E, 2004. Guidelines on the Use of Urine and Faeces in Crop Production. Stockholm Environment Institute. [www.ecosanres.org](http://www.ecosanres.org).
9. Philip N. Owens, Desmond E. Walling. The phosphorus content of fluvial sediment in rural and industrialized river basins. Water Research № 36, 2002, 685–701.

© Коллектив авторов, 2005.

Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Тихомирова Г.И., Соловьева Л.В., Шапошникова Е.Ю. (РГУ нефти и газа)

### ЛИТОЛОГО-ФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РИФЕЙ-ВЕНДСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ИРКИНЕЕВО-ЧАДОБЕЦКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

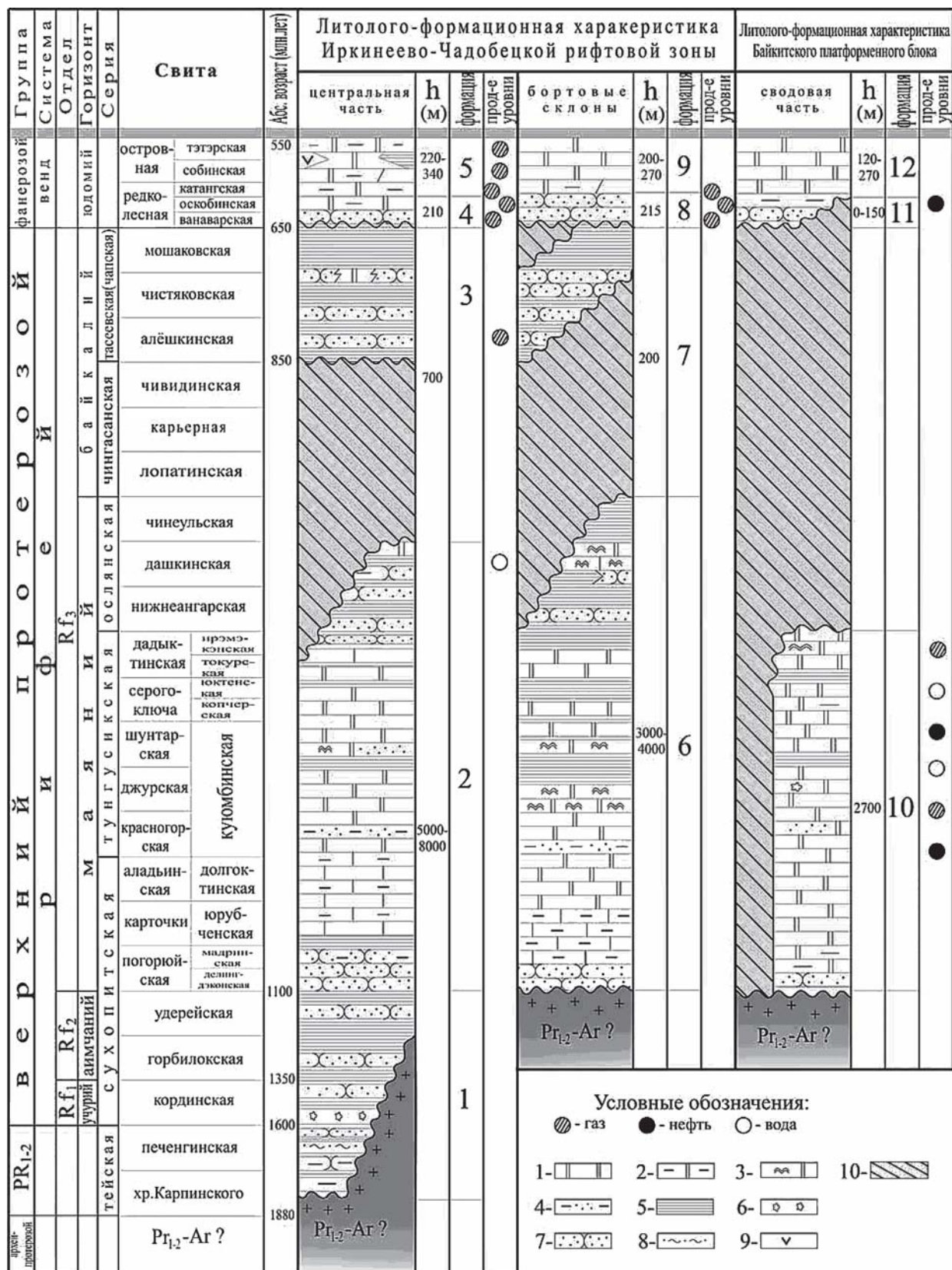
Рифейские бассейны Сибирской платформы — фрагменты природной геосистемы, сформированной в процессе эволюции Палеоазиатского океана\*, деятельность которого определила масштабы трансгрессий и контуры распространения различных отложений осадочного чехла. Охлаждение континентальной коры в катархее и ее последующая деструкция послужили началом формирования планетарного рифтового пояса, ветви которого в виде окраинно-континентальных и внутриконтинентальных рифтовых систем сформировали границы Сибирского континента и определили контуры распространения первых осадочных бассейнов запада Сибирской платформы. Разломные системы рифтогенной природы контролируют границы блоков фундамента и формирующиеся в их пределах автономно развивающиеся седиментационные бассейны, а также являются основными каналами движения и разгрузки мантийных флюидных систем, перемещающих при своем движении УВ. В результате геодинамических процессов в рифейское время произошло формирование сложнейшей геоморфологической поверхности дна Палеоазиатского океана, обусловившей крайне неравномерное накопление рифейских формационных комплексов, отражающих различия климатических, палеогеографических, палеогеодинамических условий в различных его частях.

\* Хаин В.Е. Урало-Монгольский пояс М.В. Муратова: происхождение и соотношение со смежными подвижными поясами. / БМОИП, отд. геолог. — 1998. — Т. 73. — Вып. 5.

Таким образом, в разных геодинамических зонах происходило формирование различных литогеодинамических комплексов, содержащих различные типы природных резервуаров.

Разработка литолого-формационной модели Иркинево-Чадобецкой рифтовой зоны основывается на детальном изучении литологического состава пород, условий их образований, результатов палеогеографических реконструкций, геодинамических режимов структурных элементов. Установив вертикальные формационные ряды для отдельных геодинамических зон Иркинево-Чадобецкой рифтовой зоны (платформенный блок, центральная часть и борта рифта), можно представить литолого-формационную модель в целом для этой структурной зоны, имеющей очень древнюю историю. Вертикальные формационные ряды выделенных структурно-палеогеодинамических зон ИЧРЗ различаются по стратиграфическому объему, литологическому составу и мощности образующих их отложений. Формации среднего и верхнего рифея (до отложений байкалия) относятся к морскому гумидному типу, формации байкалия — нивальная молассовая, а формации венда — аридные, морские, прибрежно-морские. Это свидетельствует о том, что на протяжении этих отрезков времени структурно-геодинамические зоны рифей-вендских седиментационных бассейнов развивались унаследовано. Вертикальные изменения формационных рядов обусловлены не только тектоническими, но и климатическими факторами, что зафиксировано в смене гумидных формаций на нивальные, а затем аридные. Этапы стабилизации и активизации тектонических режимов фиксируются накоплением определенного вида формаций. Стабилизации соответствует формации карбонатной платформы, а активизации — молассовая формация. Начальной стадии развития рифтогенного бассейна соответствует образование вулканогенной формации (тейская серия), а заключительным стадиям — соленосно-карбонатные формации. Тектоническая активность рифтовой зоны по сравнению с платформенным блоком зафиксирована в накоплении молассовой формации байкалия, распространение которой четко контролируется расположением разломов, ограничивающих тектонические блоки. К границам тектонических блоков приурочены зоны развития рифейских рифтогенных формаций, обрамляющих бортовые части ИЧРЗ.

В настоящее время промышленная нефтегазоносность доказана в бортовых частях рифтовой зоны и на платформенном блоке, однако и центральная часть рифта обладает определенными перспективами. Базальные члены формационного ряда центральной части рифтовой зоны: вулканогенно-терригенная формация тейской серии и гумидная терригенная формация сухопитской серии могут содержать породы-коллекторы и флюидоупоры, но на современном технологическом уровне эти отложения недоступны для вскрытия скважинами глубокого бурения. Перспективными здесь являются отложения гумидной терригенно-карбонатной формации глубоководного шельфа, где уровни развития пород-коллекторов будут приурочены к базальным песчаникам погоруйской свиты, известково-доломитовым отложениям шунтарской, джурской свит. Уровни развития флюидоупоров приурочены к глинисто-карбонатным отложениям аладьинской свиты, серого ключа, нижнеангарской. Отдельные уровни развития пород-коллекторов прогнозируются в дашкин-



**Литолого-формационная—модель Иркинево-Чадобецкой рифтовой зоны:** 1 — доломиты; 2 — доломиты глинистые; 3 — доломиты биогермные; 4 — песчаники; 5 — алевролиты; 6 — песчано-глинистые породы; 7 — глины; 8 — конгломераты; 9 — каменная соль; 10 — отсутствие отложений. Формации: 1 — гумидная, терригенная, глубоководного шельфа; 2 — гумидная, терригенно-карбонатная, глубоководного шельфа; 3 — нивальная, терригенная, молассовая; 4 — аридная, терригенно-карбонатная, глубоководного шельфа; 5 — аридная, соленосно-карбонатная, глубоководного шельфа; 6 — гумидная, терригенно-карбонатная, рифогенная, края карбонатной платформы; 7 — нивальная, терригенная, молассовая; 8 — аридная, терригенно-карбонатная, мелководного шельфа; 9 — аридная, соленосно-карбонатная, карбонатной платформы; 10 — гумидная, терригенно-карбонатная, центральной части карбонатной платформы; 11 — аридная, терригенно-карбонатная, прибрежно-морская; 12 — аридная, соленосно-карбонатная, карбонатной платформы



### АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА: ВОЗМОЖНОСТИ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

ской свите, косвенным доказательством наличия которых является получение притока воды дебитом 200 м<sup>3</sup>/сут в скв. № 180 Имбинского месторождения. В дашкинской свите верхнего рифея развитие коллекторов может быть обусловлено карстовыми процессами, связанными с процессами регионального перерыва. Нижележащие карбонатные коллектора, вероятно, будут трещинного и трещинно-кавернового типа. Поровый и порово-трещинный тип пустотного пространства следует ожидать в породах-коллекторах погорюйской свиты. Наиболее перспективной формацией с доказанной нефтегазоносностью является нивальная терригенная молассовая формация байкалия, в которой развиты гранулярные коллектора с поровым типом пустотного пространства. В качестве пород-флюидоупоров служат глинистые и глинисто-карбонатные отложения мошакской, чистяковской свит, а также глинисто-карбонатные отложения венда (катангская свита) и соленосные отложения нижнего кембрия (усольская свита). В центральной части ИЧРЗ прогнозируется структурный тип ловушек с элементами тектонического экранирования дизъюнктивами, а также литолого-стратиграфический. В бортовой части ИЧРЗ промышленная нефтегазоносность доказана открытием Ильбокичского, Оморинского месторождений. Скопления газа приурочены к молассовой формации тасеевской серии и к аридной терригенно-карбонатной формации мелководного шельфа (ванаварская, оскобинская свиты). Уровни развития пород-коллекторов будут приурочены к базальным песчаным горизонтам гумидной терригенно-карбонатной рифейной формации края карбонатной платформы. Наиболее перспективными являются рифогенные отложения джурской и шунтарской свит, где будут широко развиты каверно-порово-трещинные карбонатные коллекторы. В качестве флюидоупоров могут служить глинисто-карбонатные отложения нижеангарской и дашкинской свит, в которых можно ожидать развитие отдельных рифогенных сооружений. Выше по разрезу уровни флюидоупоров приурочены к глинистым отложениям молассовой формации байкалия, глинисто-карбонатным и соленосным отложениям аридно-соленосно-карбонатной формации венда (катангская, усольская свиты). В бортовой зоне прогнозируется литолого-стратиграфический и структурно-литологический типы ловушек, связанные с рифогенными сооружениями рифея, зонами выклинивания терригенных отложений байкалия и венда, а также с поверхностью размыва карбонатных рифейских отложений.

Нефтегазоносность осадочного чехла Байкитского платформенного блока связана с гумидной терригенно-карбонатной рифейской формацией центральной части карбонатной платформы, а также с аридной терригенно-карбонатной прибрежно-морской формацией венда, в которых были открыты Юрубчен-Тохомское и Терское газонефтяные месторождения. Продуктивными являются каверново-трещинные доломиты верхней эродированной в предвендское время части рифея и кварцевые песчаники ванаварской свиты венда. Отдельные притоки УВ были получены из коры выветривания фундамента. Основными флюидоупорами в разрезе являются глинисто-карбонатные и соленосные отложения аридной соленосно-карбонатной формации карбонатной платформы (катангская и усольская свиты). Открытый и прогнозируемый тип ловушек — структурно-литологический и литолого-стратиграфический.

Одним из важнейших геофизических методов в задачах рудной, поисковой геологии является электроразведка, которая идеально подходит для поисков многих типов рудных месторождений. В частности, в настоящее время аэроэлектромагнитные методы (АЭМ) приобрели статус неотъемлемого и важнейшего этапа геологического изучения и открытий месторождений во многих горнорудных районах мира.

Аэроэлектроразведка сегодня обладает множеством особенностей и модификаций, без знания которых невозможно ее эффективное использование. В данной статье представлены наиболее эффективные и широко применяемые, так называемые активные (индуктивные), аэроэлектромагнитные методы, которые базируются на принципе индуцирования вихревых токов в электропроводящих геологических образованиях посредством искусственно создаваемого переменного магнитного поля. Магнитное поле вторичных вихревых токов (отклик) фиксируется очень чувствительными приемными катушками.

Существует два способа возбуждения и приема электромагнитных полей в аэроэлектроразведке — частотный и временной (переходный). По типу летательного аппарата различают самолетную и вертолетную съемки. Самолетные системы предполагают крепление питающих контуров на крыльях самолета (fixed-wings), независимо от способа возбуждения и приема ЭМ поля.

#### Принцип частотного (frequency domain) метода.

Метод основан на возбуждении геологической среды гармонически изменяющимся полем от питающей петли и регистрации суммарного поля (вторичного индукционного вихревого поля и искаженного первичного) (рис. 1, вкл.).

Основными техническими факторами частотных систем, определяющими качество получаемых материалов, являются частотный диапазон, который обычно лежит в пределах 300 Гц до нескольких десятков тыс. Гц; количество измеряемых компонент (расположение приемных катушек); ориентировка системы источник-приемник и расстояние между ними; электронная чувствительность и стабильность (отношение сигнал/шум, дрейф, калибровка).

От абсолютной величины частот в общем виде зависит глубина исследований, которая при постоянной электропроводности среды, является функцией, обратной квадратному корню частоты. Это означает, что проникновение ЭМ волн в 2 раза глубже, если частота в 4 раза ниже. Максимальная чувствительность системы по отношению к глубине залегания аномалиеобразующего объекта также в общем виде пропорциональна обратной величине квадратного корня частоты. Отсюда и следуют требования к частотному диапазону системы: чем он шире, тем система обладает большей чувствительностью в более широком диапазоне глубин и сопротивлений.

#### История развития частотных систем.

Первые аэроэлектромагнитные системы были частотными и разрабатывались в Канаде и Скандинавии с целью поисков электрически проводящих сульфидных рудных тел. Датой рождения АЭМ считается июль 1948 г., когда в Канаде (North Bay) компанией Stanmac-McPhar

успешно были проведены испытания самолетной одночастотной электроразведочной системы [7]. Но известно также, что в 1946 г. в Канаде Хансом Лундбергом на вертолете была установлена первая электромагнитная система [8]. Но в дальнейшем Davidson, McPhar, INCO, а также Lundberg предпочли самолетные системы.

Первые коммерческие аэроэлектроразведочные съемки проводились в конце 1940-х годов INCO Limited с целью поисков никелевых месторождений (Dowsett, 1970). Уже в 1954 г. в результате проведения съемки в районе New Brunswick было обнаружено месторождение Heath Steel. В 1956 г. в результате заверки аномалий электропроводности открыто медно-никелевое месторождение Thomson. А в 1959 г. с помощью частотной, но уже вертолетной системы в США компанией Texas Gulf Sulphur было открыто месторождение мирового масштаба Kidd Crick. Все это определило дальнейшее развитие аэроэлектроразведки и поиски новых прикладных задач ее использования.

Непрерывно развиваясь, частотные системы приобрели наибольшее распространение. В 1970 г. появилась первая DIGHEM вертолетная с жесткой базой (Fraser, 1972), а в 1977 г. трехчастотная самолетная TRIDEM. Впервые в 1976 г. Aerodat Ltd. увеличила жесткость своей частотной системы, используя в качестве материала для изготовления гондолы кевлар, что позволило значительно снизить уровень шума. В 1980-х годах в основном были сделаны усовершенствования в направлении увеличения рабочих частот, количества катушек, мощности систем, а с началом эры цифровой электроники добились значительного улучшения отношения сигнал/шум\*. В России («Аэрогеофизика») с начала 1970-х годов применялся самолетный трехчастотный метод ДИП-А, и усовершенствованный четырехчастотный ДИП-4 используется сегодня с буксируемой гондолой приемных катушек.

#### **Современные частотные системы.**

Примерами современных частотных вертолетных систем являются DIGHEM<sup>V</sup> (DIGital Helicopter ElectroMagnetics), ImpulseEM, Hummingbird, RESOLVE [9]. К 1990-м годам эти системы приобрели тот облик, в котором они используются в настоящее время. Объединяет их жесткая база (гондола) длиной 6–12 м, включающая генераторные и приемные катушки. Максимальный предел глубины исследований этих систем обычно принимается 150 м. Системы многочастотные. Например, стандартная DIGHEM<sup>V</sup> (1991 г.) обладает частотами 900, 7200, 56000 Гц с взаимно перпендикулярными системами катушек (рис. 2, вкл.). А конфигурация DIGHEM<sup>VRES</sup> (1998 г.), разработанная специально для картирования в условиях горизонтально-слоистой среды, имеет 5 частот: 380, 1400, 6200, 25000 и 101000 Гц и только с копланарным расположением катушек. Вертолетная система DIGHEM в настоящее время — это продукт развития в течение более чем 30-летнего периода, с которой выполнено более чем 1.5 млн. км съемки по всему миру. Но в DIGHEM, имеющей пять пар (генератор-измеритель) катушек, существуют трудности взаимной калибровки всех пяти частот. Эта проблема часто оказывается критичной для количественного анализа данных.

Это препятствие было преодолено в 1997 г., когда была введена в производство работ качественно иная вертолет-

ная многочастотная система ImpulseEM (Aeroquest Ltd., Канада). Существенной особенностью этой системы является наличие всего лишь одной пары катушек для всех используемых частот. Это основной фактор снижения взаимовлияния катушек, а значит, снижения шума и повышения чувствительности. Типовые рабочие частоты 870, 4350, 21750 Гц для коаксиальной катушки и 930, 4650, 23250 Гц для копланарной. Кроме того, генераторные катушки системы отличаются повышенным дипольным моментом, что обеспечивает относительно большую глубину исследований. Эта система была единственная в своем роде вплоть до 2002 г., когда Geophex Ltd представила свою GEM-2A, также имеющую одну установку катушек для всех частот [18].

Что касается пространственного разрешения, т.е. способности локализации объектов, то вертолетные частотные системы благодаря небольшой базе генератор-приемник обладают лучшими параметрами, чем аналогичные самолетные системы, где разнос генераторной петли и приемных катушек составляет несколько десятков метров.

Наверное, единственным представителем частотной самолетной системы с жестко расположенными на крыльях генераторных и приемных катушек, является система HAWK (Geotech Airborne), работающая в широком диапазоне частот (200 Гц — 12.5 кГц).

Самолетные частотные системы с нежесткой базой в мире практически сейчас не используются из-за низкой пространственной разрешаемой способности, высокого уровня шумов и относительной нестабильности измерений. Хотя недавний пример использования на одном из рудных районов Дальнего Востока России системы DIP-4 [11] весьма показателен в решении целого ряда геологических задач на подготовительной стадии оценки рудоносности территории. При этом доказана высокая степень достоверности получаемых материалов.

#### **Принцип метода переходных процессов (time domain, TDEM).**

Метод основан на изучении затухания магнитного поля вихревых токов, возникающих в электропроводных средах при изменении постоянного магнитного поля (первичного, питающего поля). Первичное магнитное поле создается пропусканием по замкнутой незаземленной петле импульсов тока длительностью, достаточной для установления постоянного магнитного поля. В классическом варианте метод предполагает измерения полезного сигнала после выключения питающего тока. Именно эта особенность обеспечивает методу преимущество относительно частотного режима измерений в отношении сигнал/шум. Измерения спада сигнала (dB/dt) производятся на определенных задержках времени после выключения питающего тока вплоть до начала нового импульса. В общем виде от объекта, находящегося на большей глубине, сигнал приходит в более позднее время. Поэтому системы с меньшей базовой частотой обладают большей глубиной исследований. Различают самолетные (рис. 3, вкл.) и вертолетные (рис. 4, вкл.) TDEM системы.

#### **История развития TDEM систем.**

Только в начале 1960-х годов появилась самолетная система, работающая в режиме **переходных процессов** и выгодно отличающаяся от частотного принципа измерений отсутствием первичного поля во время измерений вторичного и, так называемой, мешающей области «малого параметра» при измерениях полезного сигнала. Это была

\* Шум в электроразведке складывается из двух составляющих — приборный или аппаратный и сигнал от геологической среды, не представляющей интереса или мешающий фиксации сигнала от искомого объекта. В данном случае имеется в виду аппаратный шум.

аналоговая система INPUT (INduced PUlse Transient System) с полусинусоидальной формой питающего сигнала, с регистрацией горизонтальной X-составляющей, первые испытания которой были проведены Barringer Research в 1959 г. С этих пор при использовании самолетных систем отдавали предпочтение именно TDEM режиму измерений.

INPUT система пережила свое второе рождение в 1985 г., превратившись в уже цифровую GEOTEM, работающую на частотах 12,5, 15, 25 и 30 Гц. К 1997 г. на рынке аэрогеофизических услуг использовались четыре самолетных системы, основанные на принципе переходных процессов: GEOTEM (Geotrex-Dighem, Канада, теперь Fugro Airborne), SALTMAP и QUESTEM (World Geoscience Corporation, Австралия, теперь Fugro Airborne), а также SPECTREM (1989, Anglo American Corporation, Южная Африка).

Впервые с вертолетной системой TDEM проведены эксперименты только в 1980 г. Это была Helicopter INPUT система, разработанная Questor Surveys Ltd. и используемая в течение 5 лет. В этой системе приемная катушка также находилась в буксируемой гондole, а питающая петля — непосредственно на корпусе летательного аппарата, подобно самолетному варианту INPUT (Hood, 1986). Кроме этого, в разработке и опытных образцах были SIRITEM, монтируемые на дирижабле, и оригинальные многокомпонентные вертолетные системы Truth (1985—1997) и HeliTEM (1995—1997) компании Aerodat с двумя, вертикальной и горизонтальной, питающими кольцами. HeliTEM уже имела возможность измерений в режиме пропускания питающего тока, и приемные катушки находились в середине пространства питающих петель. В гибридной системе FLAIRTEM использовалась большая питающая петля на земле и измерительная катушка в воздухе.

#### **Современные TDEM системы.**

Представителями *самолетных* TDEM систем, использующихся в настоящее время, являются MEGATEM, GEOTEM, TEMPEST (Fugro Airborne Surveys). Одними из недостатков этих систем в силу большого разнеса генератор-приемник является низкая пространственная разрешаемая способность, а также присущая всем самолетным системам асимметричность получаемых данных. Из-за относительно высокой скорости и большой высоты полета эти системы обладают ограниченными возможностями фиксации локальных проводящих объектов. Еще один неблагоприятный фактор, который не всегда принимают во внимание, это потеря части энергии генераторной петлей из-за ее близкого расположения к металлическому корпусу самолета.

Новый виток развития с конца 1990-х годов получили *вертолетные* системы с режимом измерений метода переходных процессов (TDEM), которые в силу очевидных преимуществ, прежде всего по глубинности исследований, постепенно начали вытеснять вертолетные частотные и по пространственной разрешающей способности — самолетные TDEM.

Своим новым качеством этот принцип измерения обязан революционным изменениям в электронной базе и схемотехнике. В частности, это выразилось в значительном снижении уровня регистрируемых шумов. С конца 1960-х годов до конца 1990-х он уменьшился почти на два порядка, что привело к увеличению глубинности исследований почти в 5 раз [15].

Вертолетные системы TDEM режима измерений развивались для различных целей, и каждая имеет свои осо-

бенности. Имея базовую частоту 25/30 Гц, система VTEM (Geotech Ltd., Канада) предназначена для поисков только высокопроводящих медно-никелевых руд, а также хорошо приспособлена для работы в условиях вышележащих экранирующих горизонтов.

В AeroTEM (Aeroquest Ltd., Канада) системе эти же возможности достигнуты путем измерений во время пропускания питающего тока, наряду с режимом измерений после его выключения. При этом не теряются возможности фиксации слабых проводников. По сути, это упрощенная версия HeliTEM, но технически более отточенная благодаря громадному объему опытных и производственных практических работ в разнообразных геологических и геоморфологических условиях.

NewTEM (Newmont Mining Corp., США) разрабатывалась Newmont Mining Corp. (USA) в течение 1995—2001 гг. в основном для целей поисковых работ на золото как в проводящей, так и высокоомной среде. Так же, как и AeroTEM, она обладает широким диапазоном измеряемых сопротивлений.

SkyTEM (Дания) разрабатывалась и использовалась пока для решения гидрогеологических задач с оценкой мощностей водоносных горизонтов и слоев глин, при поисках погребенных русел, а также при исследованиях проникновения морской воды [10].

Кроме того, существуют оригинальная вертолетная HoisTEM (GPX, Австралия) и THEM (THEM Geophysics Inc., Канада) с выносной приемной системой относительно питающей установки и также монтируемая на вертолете.

#### **Области применения TDEM систем.**

В настоящее время одной из главнейших областей применения аэроэлектроразведочных систем TDEM являются поиски пирротин-пентландитовых медно-никелевых рудных образований, часто сопровождающихся минерализацией платиновой группы металлов. Причиной этого является установление того факта, что электропроводность большей части магматических рудных никелевых образований выходит за пределы эффективного диапазона измеряемых сопротивлений всех без исключения частотных систем.

Но мнение о том, что метод переходных процессов предназначен исключительно для обнаружения проводящих объектов, соответствующих массивным сульфидам, давно уже не соответствует действительности [4]. В AeroTEM и NewTEM достигнуто значительное расширение диапазона измеряемых сопротивлений как в сторону супер проводящих объектов (сотни сименсов), так и плохо проводящих (5000 Ом м и более). Первая возможность достигнута использованием on-time режима измерений переходных процессов, т.е. во время пропускания нестационарного питающего тока, а вторая — благодаря сохранению относительно высокой базовой частоты. Отсюда следует и широкая область применения метода: золото, кимберлиты, минералы платиновой группы, полиметаллы, уголь, железо, общая геологическая картография, картография латеритов и сапролитов, поиски грунтовых вод и изучение явлений солевых загрязнений, измерения глубин (батиметрия), а также различные исследования окружающей среды.

Например, система NewTEM успешно использовалась для картирования сопротивлений в Андах (Перу), причем в дополнение к важной извлеченной информации о литологии и структурных особенностях территории зафиксированы проявления золоторудных месторождений с раз-

личной степенью сульфидизации, а также закартированы зоны порфиритов и скарнов [5]. Горнодобывающая компания Newmont (США), эксплуатируя систему NewTEM, опирается на ее высокую фокусирующую способность в решении задач поисков золоторудных месторождений в карбонатных породах (Карлинский тип), связанных с кварцевыми жилами (бонанца и/или слабо сульфидизированные), или в окварцованных горизонтах вулканических пород (с высокой степенью сульфидизации). При этом выбор пал на систему, работающую в режиме переходных процессов, а не ставшую уже традиционной вертолетную частотную систему, т.к. «она гипотетически полезна в этом применении, но на практике обладает недостаточными диапазоном измеряемых сопротивлений, дипольным моментом и глубиной исследований» [5].

Самолетная система GEOTEM успешно применялась на северо-западных территориях Канады при поисках кимберлитов. Особенно полезной она оказалась в случаях отсутствия проявления искомым геологическим образованиям в магнитном поле [13]. Но пространственное разрешение самолетных TDEM систем все же значительно уступает вертолетным, основанным на том же принципе измерений (рис.5, вкл.).

Наконец, еще одна особенность, присущая аэроэлектроразведке в модификации переходных процессов, это фиксация сигнала вызванной поляризации, но в том случае, если этот сигнал сильнее ЭМ сигнала [13]. На практике это явление встречается довольно часто. Последние примеры — проявление ряда кимберлитовых трубок при производстве съемок системой AeroTEM [12]. Причем для проявления слабо проводящих, но поляризующихся источников наиболее подходящими являются установки с геометрически совмещенными питающей и приемной катушками [6]. Эта особенность, по сути, является прорывом на пути к методу аэро ВП [3].

#### **Факторы качества аэроЭМ систем и способы их достижения.**

Основными показателями эффективности аэроэлектроразведочного метода являются:

глубина исследований, на которую оказывают влияние дипольный момент питающего элемента электроразведочной платформы, высота полета, чувствительность, отношение сигнал/шум;

пространственное разрешение;

диапазон измеряемых сопротивлений, в котором часто наиболее важную роль играет нижний предел;

способность к уменьшению влияния перекрывающихся, экранирующих электропроводных слоев.

Некоторые из этих показателей, с первого взгляда, являются взаимоисключающими. А именно, эффективная **глубина исследований и пространственное разрешение**. Одним из факторов глубины исследований является «разнос», т.е. расстояние между питающей и приемной катушками. В этом отношении самолетные системы с выносными приемными катушками являются наиболее «глубинными» (например, MEGATEM, GEOTEM в переходном режиме и DIP — в частотном). Но достижение относительно большой глубины исследований таким путем ведет к потере пространственного разрешения системы.

На первый взгляд, кажется, что распределение возбуждающего поля на большем пространстве изучаемой среды более выгодно для геофизических исследований. Но фактически это не так. Возбуждая большой объем пространства, возможность «зарядить» и обнаружить дискретные

объекты на самом деле ухудшается. Практические сравнительные данные подтверждают это. На рис. 6 (вкл.) представлены результаты съемок с помощью самолетной «fixed wings» системой (а) и AeroTEM (б) над Mesamax месторождением (Ni-Cu-Co-Pt-Pd-Au), приуроченного к южному поясу ультраосновных пород Raglan тренда. Здесь были проведены опытно-методические съемки по трем линиям профилей на расстоянии 100 м друг от друга. При этом самолетная система зафиксировала рудные тела месторождения только на двух профилях, а система AeroTEM — на всех трех.

Вопрос целесообразности и эффективности детализации, т.е. сгущения линий полета, также связан с величиной объема среды возбуждения. Электроразведочные системы фиксируют интегральный отклик от того объема среды возбуждения, который они захватывают. И если размеры площади возбуждения превышают расстояние между линиями полетов, то дальнейшее сгущение их становится малоэффективным, и локальные рудные тела в случае наличия какого-либо отклика от вмещающей или перекрывающей среды зафиксированы не будут в результате малой величины отношения «сигнал-шум», где «шум» является откликом от вмещающего объема пород. В случае сближенного расположения интересующих объектов они не могут быть разделены в аномальном поле, причем при любой степени детализации. На графиках рис. 6 (вкл.) имеют место оба случая неудачного использования самолетной системы: с левой стороны на контактах ультраосновных тел находятся два сближенных проводящих объекта, которые отражаются одной аномалией; и справа — сигнал от объекта, находящегося в относительно проводящей среде вмещающих пород, практически не зафиксирован.

Что касается **пространственного разрешения в вертикальной плоскости**, т.е. в разрезе, то на практике, например, одна из конфигураций DIGHEM записывает только пять дискретных частот от 400 Гц до 56 кГц, тогда как TDEM системы записывают до 100 каналов в переходном режиме, соответствующие частотам между 495 Гц и 50 кГц (SALTMAR). Конечно, на фоне такого ограничения частотных систем TDEM системы обладают значительными потенциальными возможностями дискретизации разреза.

Возвращаясь к проблеме эффективной **глубины исследований**, отметим, что во всех системах, кроме всего прочего, она обеспечивается величиной дипольного момента питающей петли\* — 1100 тыс. А·м<sup>2</sup> для MEGATEM; 500–700 тыс. А·м<sup>2</sup> для GEOTEM; 56 тыс. А·м<sup>2</sup> для TEMPEST; в различных вертолетных системах TDEM она составляет величину 20–1000 тыс. А·м<sup>2</sup>. Естественно, дипольный момент различных систем и его роль в эффективной глубине исследований необходимо рассматривать с учетом высоты питающей петли (или катушки) над поверхностью земли. Если самолетные системы с питающей петлей, закрепленной на крыльях, находятся на высоте не менее 120 м, то вертолетные — лишь на высоте первых десятков метров. Например, питающая петля AeroTEM-II с 40 тыс. А·м<sup>2</sup>, находящаяся на высоте 30 м, на уровне земли продуцирует сигнал 300 нТ, а самолетная система, обладающая моментом 500 тыс. А·м<sup>2</sup>, — всего лишь 55 нТ [1].

Кроме того, глубинность исследований ЭМ систем определяется еще и конфигурацией установки. В частности, в самолетных системах используется классическая

\* Дипольный момент зависит от величины тока, пропускаемого в питающей петле, количества витков кабеля в ней, и ее площади.

дипольная установка, где глубинность определяется расстоянием источник-приемник Tx-Rx, которая составляет многие десятки метров для TDEM систем, а для частотных — 5–10 м.

Но, как показал Duckworth (1993), существует всего два варианта самой оптимальной геометрии установки: 1) размер диполя Tx-Rx составляет 0.6 от глубины залегания искомого объекта; 2) совмещенная геометрия питающей петли и приемной катушки. Так как априори мы не знаем положение искомого объекта в разрезе и подобрать оптимальное 0.6 невозможно заранее, то логично использовать более универсальную конфигурацию с точки зрения глубинности исследований. Совмещенная геометрия установки в настоящее время используется большинством вертолетных систем TDEM (AeroTEM, VTEM, SkyTEM, NewTEM).

Еще одной немаловажной характеристикой АЭМ систем является **диапазон измеряемых сопротивлений**. В технических спецификациях часто приводят информацию о количестве порядков измеряемых сопротивлений. Но этого недостаточно для решения вопроса о применимости той или иной системы для решения поставленной геологической задачи.

Отклик от проводящего ток объекта является функцией электропроводности его и базовой частоты системы. Как видно из рис. 7а, объекты, обладающие электропроводностью в несколько десятков сименсов, с определенного порога своей проводимости резко снижают отклик, т.е. имеет место ослабление отклика с увеличением проводимости объектов.

Именно поэтому частотные системы, использующие питающее поле в несколько сотен Гц, и TDEM системы, работающие только в режиме отключения питающего поля с базовой частотой более 100 Гц, не могут распознать такие проводники. А это рудные тела массивных сульфидов и особенно никельсодержащие объекты.

Во многих TDEM системах проблема решается путем снижения базовой частоты измерений вплоть до 25–30 Гц, что позволяет сместить максимум отклика в более высокие значения проводимостей. Т.к. базовая частота и кривая проводимости линейно взаимосвязаны, то падение базовой частоты на 50% будет означать удвоение значения проводимости, при которой ЭМ система показывает ее максимальный отклик. Например, если базовая частота будет снижена со 150 до 30 Гц, то произойдет пятикратное увеличение значения проводимости, на которую будет приходиться максимальное значение отклика. Но при этом смещается и нижний предел проводимости, который может быть зафиксирован, т.е. система будет «терять» отклики от, например, прожилково-вкрапленных рудных образований. По этой причине электромагнитные системы, которые работают на низкой базовой частоте, не пригодны для общих поисков, а могут быть эффективны только для обнаружения объектов с проводимостью более чем 100 См или в условиях перекрытия искомого тела электропроводным слоем.

Измерения неустановившегося поля (dB/dt) во время прохождения питающего тока (on-time) позволяют значительно сместить верхний порог электропроводности, который может быть зафиксирован [16]. Из рис. 7б следует, что отклик в режиме on-time имеет существенно другой характер для объектов с высокой проводимостью. Сочетание двух режимов измерений (off- и on-time) позволяет:

фиксировать отклик от объектов с высокой проводимостью (десятки и сотни См);

разделять объекты с низкой и высокой проводимостью; существенно (до 70%) снижать эффект экранирования (см. ниже).

Эта возможность реализована в системе AeroTEM, для чего и используется треугольная форма питающего импульса (рис. 8, вкл.) [2].

Таким образом, сохраняя относительно высокую базовую частоту (150 Гц), система способна зафиксировать слабые проводники, а наличие on-time режима измерений неустановившегося поля обеспечивает получение аномалий от весьма проводящих объектов (рис. 9, вкл.).

Одной из самых основных проблем электроразведки является **эффект экранирования** нижележащих объектов электропроводящими слоями или вмещающими породами, которые, как правило, не являются предметом поисков, но делают невозможным получение информации о разрезе.

Три вышеназванные технические особенности AeroTEM обеспечивают возможность эффективной работы в присутствии перекрывающих электропроводящих горизонтов — высокое значение питающего поля, совокупность двух режимов измерений (on-time и off-time), геометрическое совмещение петли генератора и приемных катушек.

Из рис. 7 а, б следует, что проводники, обладающие электропроводностью приблизительно до 7–10 См обеспечивают

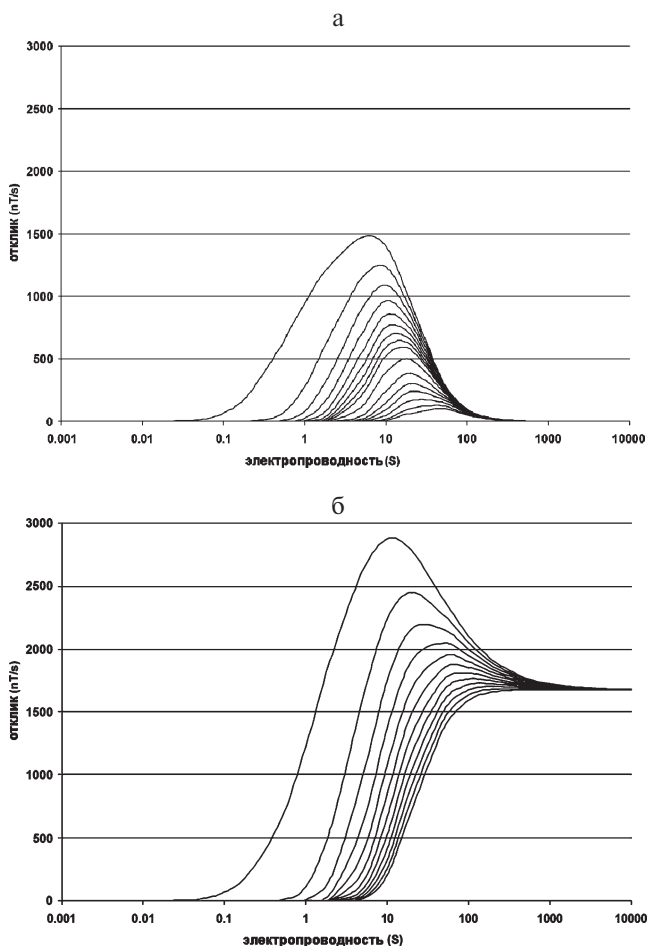


Рис. 7. Номограмма отклика измерительной системы (при 150 Гц) от проводников с различной электропроводностью: а — в режиме off-time; б — в режиме on-time. Каждая кривая — кривая времени, от раннего (слева) до позднего (справа)

одинаковую амплитуду отклика во время включения тока и после его выключения. Именно свойство эквивалентности отклика от средне проводящих объектов в on-time и off-time режимах обеспечивает значительное уменьшение мешающего сигнала от них при усилении отклика от объектов, находящихся под этим слоем.

Кроме того, постоянная времени ( $t$ ) характеризует спад отклика от проводника — более высокое значение этой константы характеризует более проводящий объект. В on-time и off-time режимах AeroTEM система обеспечивает оценку двух констант времени.

И, наконец, в силу особенностей геометрии платформы и взаимного расположения питающей и приемной катушек системы TDEM обладают слабой чувствительностью к пластовым формам электропроводного объекта, даже если он находится на меньшей глубине, чем локальный проводник (рис.10).

Как следствие всех вышеназванных технических решений, данные, получаемые с помощью вертолетных TDEM систем, наверное, впервые в истории аэроэлектроразведки стали пригодны для корректной **количественной интерпретации**.

Например, в системе AeroTEM используются разноориентированные измерительные катушки. Катушка Z вертикальной оси ориентирована параллельно генераторной петле, а катушка X оси расположена под прямым углом к

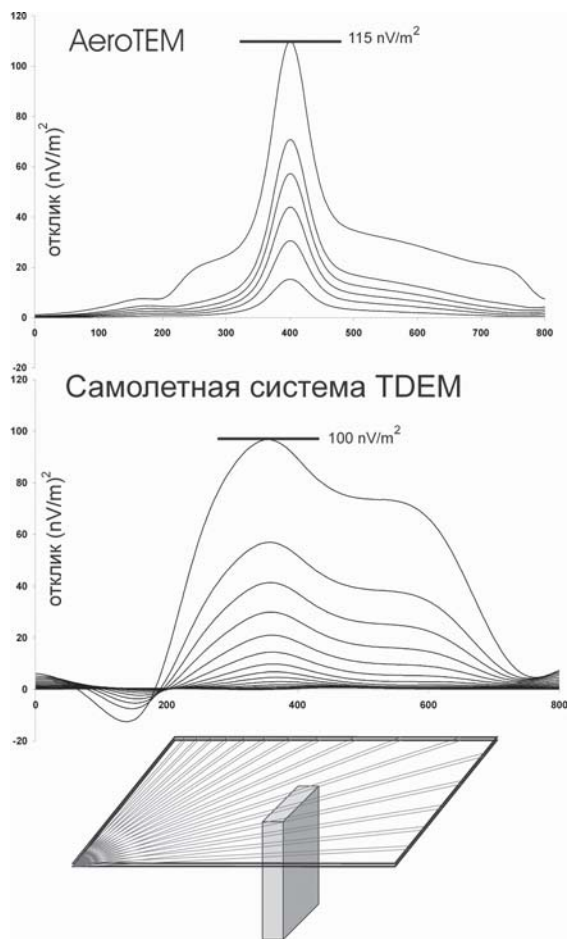


Рис.10. Отклик от модели локального проводника, перекрытого экранирующим горизонтом, полученный с помощью самолетной системы TDEM и системы AeroTEM. Проводящий слой 600х600 м, глубина 25 м, объект 300х150х25 м глубина 50 м

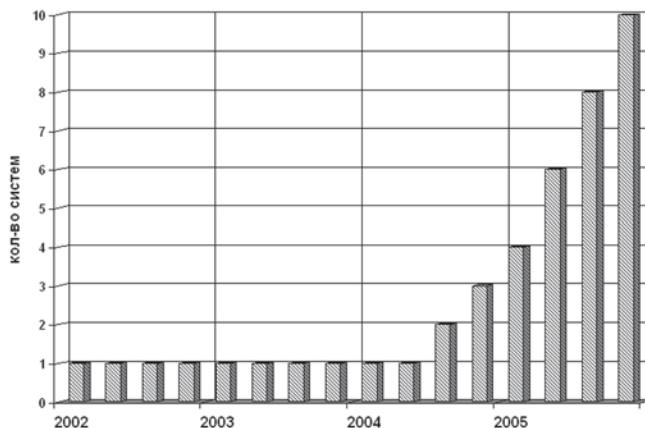


Рис. 12. Количество систем AeroTEM, используемых компанией Aeroquest Ltd. на производственных работах в разные годы

генераторной петле и ориентирована вдоль линии полета. Эта катушка обеспечивает информацией об ориентации проводящего объекта и его мощности. А комбинация из двух катушек обеспечивает важной информацией о положении, ориентировке, глубине и мощности проводника, которая не может быть получена традиционной геометрией измерительной системы других вертолетных и самолетных ЭМ платформ. Аномалии, регистрируемые подобными измерительными системами, свободны от геометрического эффекта, являются локальными и могут легко сопоставляться с модельными кривыми в большинстве случаев. Другими словами, такие данные очень легко интерпретируемы при высокой степени однозначности.

На рис. 11 (вкл.) показаны практические аномалии, полученные системой и системой AeroTEM. Как видно из этих материалов, данные, полученные AeroTEM, характеризуются не вызывающим сомнений уровнем фона, четкой и локальной аномалией, которая корректно и строго может быть подвержена количественной интерпретации методом подбора. Уровень сигнала в несколько раз выше, чем полученный с помощью вертолетной частотной системой. Специально для этих целей, в том числе применительно к геометрической системе AeroTEM, была разработана программа Multiloop для операционной системы Macintosh (Lamontagne Geophysics), которая позволяет работать с любым набором аномалиеобразующих объектов любой сложности в двух- и трехмерном пространствах.

Казалось бы, что существующие сегодня индуктивные системы, с которыми выполняется основной объем аэроэлектроразведки в мире, имея в основе своей одни и те же физические принципы, должны продуцировать подобные данные. Но на практике в силу различных возможностей технической реализации, специфики используемого воздушного судна, способы значительно отличаются, причем при явном превосходстве одного над другими.

Возрастающая потребность в результатах метода переходного режима измерений на вертолетной подвеске иллюстрируется следующим фактом. За первые 6 мес. 2003 г. в Канаде только по проектам поисков драгоценных металлов одной лишь компанией Aeroquest Ltd. с помощью системы AeroTEM было выполнено более чем 30 000 км съемки, тогда как мировой лидер по производству аэрогеофизических съемок Fugro Airborne surveys за весь 2002 г. с помощью частотной вертолетной системы по аналогичным проектам выполнил 34 000 км съемки [9]. На рис.12

показана динамика роста количества систем AeroTEM, вовлеченных в производственные работы.

Многие специалисты прогнозируют смену частотных систем на мировом рынке аэрогеофизических услуг TDEM вертолетными системами в ближайшее время. Кроме того, как показывает практика последних лет, многие горнодобывающие компании после проведения съемок вертолетных TDEM уже не проводят предварительно перед буровыми заверочными работами детализационные наземные электроразведочные исследования. В данном случае последние уже не улучшают полученную информацию по площади проведения съемок.

Сейчас можно с уверенностью сказать, что аэроэлектроразведка наряду с аэромагниторазведкой превратилась из метода первого регионального этапа исследований территорий с целью последующих поисков МПИ в инструмент, позволяющий выполнять непосредственные, детальные поиски рудных образований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Balch S.J., Boyko W.P., Black G. and Pedersen R.N. Mineral Exploration with the AeroTEM System. SEG Int'l Exposition and 72<sup>nd</sup> Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, October 6–11, 2002.
2. Balch S.J., Boyko W.P., Paterson N.R. The AeroTEM airborne electromagnetic system. The Leading Edge, June, 2003. — P. 562–566.
3. Boyko W., Paterson N.R., Kwan K. AeroTEM characteristics and field results. The Leading Edge, October, 2001. — P. 1130–1138.
4. Eaton P., Anderson B., Nilsson B. et al. NEWTEM — A novel time-domain helicopter electromagnetic system for resistivity mapping. 72<sup>nd</sup> Annual Int'l Meeting of the Soc of Exp Geop, SLC, Utah, 2002, October. — P.6–11.
5. Eaton P., Anderson B., Lubbe B. NEWTEM — Adventures in thin air. 74<sup>th</sup> Annual Int'l Meeting of the Soc of Exp Geop, 2004.

6. Flis M.F., Gregory A., Newmani G.A. and Hohmann G.W. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements. Geophysics, vol. 54, No. 4 (April 1989). — P. 516–523.
7. Fountain D. Airborne electromagnetic systems — 50 years of development. Exploration Geophysics, 1998, 29. — P. 1–11.
8. Icarus, The Newsletter of R&D for Mining Geophysics, January 2000, vol. 1, No. 1. Special Feature Time Domain Helicopter EM Systems. 1980–2000.
9. Killeen P.G. Back in the match. Airborne Electromagnetic Surveying. Exploration trends and Developments 2004, March 2005. — P. 10–12.
10. Kurt I. Surenson, Esben Auken and Max Halkjær, Skytem. High Resolution Airborne Transient Measurements. KEGS Symposium. March 5, 2005.
11. Prikhodko A. Results of an airborne geophysical survey in the northern part of Far East of Russia. — Windows to the World, May 13–21, 2005, Reno-Sparks, Nevada.
12. Rudd J., Balch S. Four short AeroTEM case studies. KEGS Symposium, New developments in Airborne Geophysics. March 5, 2005.
13. Smith R.S., Annan A.P. et al. Application of a modified GEOTEM system to reconnaissance exploration for kimberlites in the Point Lake area, NWT, Canada. Geophysics, vol. 61, № 1, January-February, 1996. — P. 82–92.
14. Smith R.S., Klein J. A special circumstance of airborne induced-polarization measurements: Geophysics, 61, 1996, № 1. — P. 66–73.
15. Smith R.S., Annan A.P. Advances in Airborne Time-Domain EM Technology. Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration, edited by A.G. Gubins, 1997. — P. 497–504.
16. Smith R.S., Balch S.J. Robust estimation of the band-limited inductive-limit response from impulse-response TEM measurements taken during the transmitter switch-off and transmitter off-time: Theory and example from Voisey's Bay, Labrador, Canada. Geophysics, vol. 65, No.2. March-April, 2000. p. 476–481.
17. Smith R., Fountain D., Allard M. The MEGATEM fixed-wing transient EM system applied to mineral exploration: a discovery case history. Edge, vol.21, 2003. — P.71–75.
18. Won I.J., Oren A., Funak F. GEM-2A: A programmable broadband helicopter-towed electromagnetic sensor. Geophysics, Vol. 68, №.6, November-December, 2003. — P. 476–481.

## ХРОНИКА

© Ляшенко Е.А., 2005

Ляшенко Е.А. (РОСНЕДРА)

### К 175-ЛЕТИЮ ПЕРВОЙ НАХОДКИ ИЗУМРУДА В РОССИИ

175 лет назад на Среднем Урале произошла первая находка изумруда в России, давшая толчок к открытию в кратчайшие сроки группы месторождений, всемирно известных под названием Уральских изумрудных копей. И до сих пор несмотря на огромные усилия российских и советских геологов Урал так и остался единственным местом нахождения в России изумруда. Академик А.Е. Ферсман [4] так писал об этом самоцвете: «...наиболее ценным и экономически важным драгоценным камнем России является уральский изумруд, этот действительно прекрасный камень, имеющий соперников лишь в копиях Колумбии». В течение всей истории существования месторождений изумруд неоднократно привлекал к себе необычайно сильное внимание, играя значительную роль в экономике страны в качестве драгоценного камня или исходного минерального сырья для получения стратегического бериллия, то попа-

дал в длительное забвение. Примечательно, что в отдельные годы царская Россия и СССР были мировыми лидерами по объемам добычи изумруда.

Как и многие другие крупные открытия месторождений в прошлом, первая находка изумруда на Урале произошла случайно. Осенью 1830 г. крестьянин-смолокур Максим Кожевников обнаружил на берегу р. Токовая (Екатеринбургский уезд, Белоярская волость) в корнях вывороченного дерева несколько прозрачных кристаллов и обломков зеленого камня [2]. Организованная им артель в составе трех человек уже в кратчайшие сроки начала вести тайную добычу и сбыт найденных камней перекупщикам.

Следует отметить, что ведение добычных работ таким образом в то время каралось законом. По существовавшим правилам частные лица допускались к разведке и добыче цветных камней только в окрестностях своего селения и при наличии специального билета, получить который на Урале можно было только на Екатеринбургской гранильной фабрике. Билет действовал в течение года и стоил 10 руб., что равнялось годовой зарплате низкооплачиваемого рабочего. Владелец такого билета имел право продавать добытые камни в сыром и ограниченном виде, но при обязательном условии, что уникальные камни он должен был показывать командиру. Штраф за работу без билета

по тем временам был немалый — 100 руб. За утайку редкого камня также взималось 100 руб., а сам камень отбился и шел, как и штрафы, в пользу фабрики. Уличенный повторно в незаконной добыче предавался суду. При этом необходимо напомнить, что артель М. Кожевникова имела дело с драгоценными камнями первого порядка, добыча которых частным лицам не разрешалась вообще, поэтому, чтобы хоть как-то обезопасить себя, артельщики называли найденные камни зелеными аквамаринами.

Слух о незнакомых зеленых камнях быстро распространился и вскоре дошел до управляющего Екатеринбургской гранильной фабрикой и Горношнитским мраморным заводом — обер-гиттенфервальтера (попросту — командира) Я. Коковина. Выполненные по его поручению анализы показали, что найденные камни были изумрудами. С этого момента события начали развиваться с невероятной для нынешнего времени быстротой. Командир решил с выгодой для себя использовать создавшуюся ситуацию и не стал отдавать под суд М. Кожевникова (тем самым заручился его молчаливой поддержкой). Вместо этого 23 января 1831 г. он организовал при фабрике горнорудное предприятие и уже 27 января начал вести казенные работы вблизи от кожевниковских копей (шурфов). Везение сопутствовало ему — первой же выработкой была вскрыта продуктивная жила. 31 января Я. Коковин доносит вице-президенту Кабинета его императорского величества о случайной находке изумруда неизвестным крестьянином и о своих успешно начатых работах, приложив к рапорту ограненные кристаллы.

28 февраля 1831 г. император Николай I утвердил указ о награждении Я. Коковина орденом и грамотой, что было актом признания открытия изумруда в России выдающимся событием, а немного позднее безымянному первооткрывателю было пожаловано 200 руб.

Первые 2–3 года изыскательские и добычные работы продвигались быстро и в значительных объемах. До 1885 г. были открыты почти все ныне известные месторождения и проявления изумруда. Выявленные жилы с богатыми гнездами сразу отрабатывались полностью или на максимально доступную глубину — 13,5 сажень (около 30 м). Обычными были находки кристаллов исключительного качества и чистоты, лучшие из которых поступали ко двору Николая I, а затем гранились на Петергофской гранильной фабрике. Было найдено немало камней, которые по праву занимают место в десятке лучших изумрудов мира. Наиболее известным из них является великолепный кристалл весом 11130 карат (2226 г), получивший название «Изумруд Коковина» и хранящийся ныне в Минералогическом музее

им. А.Е. Ферсмана. Множество других уникальных кристаллов и друз разошлось по миру, украсив минералогические музеи и частные коллекции.

Но не все так радужно и безоблачно было вокруг изумруда, была и обратная сторона в истории освоения месторождений. В то время как в России свирепствовала жесточайшая эпидемия холеры, унесшая сотни тысяч жизней, на Урале в 1831 г. началась своя эпидемия — изумрудная лихорадка. Немало камня ушло на разросшийся в то время черный рынок изумруда. Никакие законы и административные нововведения не могли пресечь разворовывание камня по всей цепочке проведения казенных работ: добыча — обработка — доставка в столицу.

В 1885 г. за многочисленные злоупотребления по службе, связанные прежде всего с изумрудами, Я. Коковин был судим, лишен чинов, орденов, дворянского звания и вскоре скончался. Так печально закончилась судьба изумрудного командира, а между тем изумруд стоит в списке счастливых камней и является символом счастливой любви, верности и мужества [1].

Крупнейший знаток истории Уральских изумрудных копей Семенов В.Б. считает основной причиной произошедшего то, что копи сразу не попали в поле зрения горного отдела Кабинета его императорского величества, а само открытие не было по достоинству оценено [2]. Вместо этого разведка и добыча камня пошла через фабрику, что привело в дальнейшем к негативным последствиям, поскольку горные работы велись исключительно мастерами художественной обработки камня под руководством то же художника по профессии и дилетанта в горном деле — Я. Коковина, а потому были поставлены непрофессионально. Негласно главной целью работ стала добыча любой ценой, о ведении планомерных изыскательских работ на перспективу не было и речи. В результате всего этого и при отсутствии надлежащего контроля «сверху» вскоре началась неофициально узаконенная выборочная отработка богатых жил и гнезд, без какого-либо учета — что и где сделано, сколько изумруда добыто и обработано. В 1835 г. государственная добыча самцвета практически прекратилась.

На этом закончился так блестяще начатый первый этап истории уральского изумруда — главного драгоценного камня России.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Здорик Т.Б. Минералы и горные породы. — Т.1. — М., 1998.
2. Семенов В.Б. История освоения месторождений изумруда // Уральский геологический журнал. — 2002. — № 2 (26).
3. Семенов В.Б., Тимофеев Н.И. Изумрудные годы мира. — Екатеринбург, 2004.
4. Ферсман А.Е. Избранные труды, т. VII. — М.: Изд-во АН, 1962.

*Редакция журнала поздравляет с 90-летием старейшую библиотеку геологической отрасли — Научно-техническую библиотеку им. В.В. Аршинова*

*Всесоюзного научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского.*

*Научно-техническая библиотека ВИМСа основана в 1915 г. заслуженным деятелем науки и техники, доктором геолого-минералогических наук, профессором Владимиром Васильевичем Аршиновым. В фонде библиотеки насчитывается около 400 000 экземпляров книг и журналов, имеются уникальные издания геологического и прикладного профиля.*



## № 1

*Матвеев Ю.И.* Основные направления и результаты деятельности ГНПП «Севморгео» в области морских геологоразведочных работ

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

*Матвеев Ю.И., Верба М.Л., Липилин А.В., Рослов Ю.В., Эринчек Ю.В.* Основные итоги десятилетних региональных комплексных геофизических исследований на Баренцево-Карском шельфе

*Верба М.Л., Рослов Ю.В., Сакулина Т.С.* Новая Земля в структуре Обско-Баренцевского осадочного мегабассейна по результатам работ на опорном профиле 2-АР

*Сакулина Т.С., Телегин А.Н., Тихонова И.М.* Особенности динамической обработки сейсмических записей преломленных волн

*Всемирова Е.А., Рослов Ю.В.* Особенности томографической обработки сейсмических материалов, полученных на опорном профиле 2-АР

*Атаков А.И., Дмитриева Л.К.* Петрофизическая модель осадочного комплекса Северо-Баренцовой впадины

*Каленич А.П., Морозов А.Ф., Орго В.В., Загайный А.К., Иванов Г.И.* Магматизм и тектоника Вайгачско-Новоземельского орогена

*Дзерилли А., Матвеев Ю.И., Рослов Ю.В.* Морские магнитотеллурические зондирования на опорном профиле 3-АР

*Верба М.Л.* Контактный метаморфизм каменноугольных отложений в зоне Биллефьордского разлома

*Безруков В.М., Винокуров И.Ю.* Север Баренцево-Карского шельфа: актуальные проблемы геологического изучения и прогноза нефтегазоносности

СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ В ТРАНЗИТНЫХ ЗОНАХ

*Нечхаев С.А., Жемчужников Е.Г., Стебляк А.В., Щедров В.А.* Особенности сейсморазведки в транзитных зонах Обско-Тазовского мелководья

## ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ МИРОВОГО ОКЕАНА

*Андреев С.И., Лисицын Е.Д., Московская Л.Ф., Петухов С.И.* Использование данных ВЭЗ для пространственного картирования и оценки прогнозных ресурсов тел ГПС

*Аникеева Л.И., Андреев С.И., Александров П.А., Казакова В.Е.* Кобальтбогатые корки мирового океана: геохимия, генезис, распространение

*Воронов М.А., Мельников М.Е., Поляков Ю.Е., Рождественский В.Х., Туголесов Д.Д.* Опыт создания глубоководной буровой установки для исследования кобальтомарганцевых корок

*Воронов М.А., Иванов В.А., Рождественский В.Х.* Донные зондирующие установки для инженерно-геологических исследований

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, ГЕОЭКОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

*Корнеев О.Ю., Рыбалко А.Е., Федорова Н.К.* Результаты государственного мониторинга состояния недр Финского залива

*Иванов Г.И., Холодилов В.А.* Уровни концентраций загрязняющих веществ в придонном слое Обской губы

*Свечников А.И.* Комплекс технических средств высокого разрешения для сейсмических исследований на шельфе

ИНФОРМАЦИОННОЕ И НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

*Баньолесси Н.Ю., Штыкова Н.Б.* Создание реестра шельфовых зон России на основе геоинформационных технологий

*Александров В.В., Мельников А.И.* Территориально-распределенная система информационного обеспечения и хранения информации

*Анисимов В.С., Баньолесси Н.Ю.* Система формирования стоимости геологоразведочных работ для государственных нужд

ЕСТЬ МНЕНИЕ

*Верба М.Л.* Откуда взялась вода Всемирного потопа?

## ХРОНИКА

Лаверову Николаю Павловичу — 75 лет

Поздравляем с юбилеем

## № 2–3

## ГЕОЛОГИЯ И МЕТОДИКА

*Константинов М.М., Лайпанов Х.Х., Данильченко В.А., Афанасьева Е.Л., Орлов Б.Ю.* Геологическое строение и перспективы Танадонского золото-арсенопиритового месторождения

*Коньшев В.О.* Методология опробования на месторождении с крайне неравномерным и бонанцевым распределением золота

*Виниченко П.В.* Генезис месторождений золота балецкого типа

*Кременецкий А.А., Карась С.А.* Технология глубоководных геохимических поисков алмазоносных кимберлитов

*Афанасьев Г.В.* Роль кольцевых структур фундамента древних платформ в размещении масштабного уранового и комплексного оруденения

*Мандельбаум М.М., Хохлов Г.А., Кондратьев В.А., Мазур В.Б.* Методика и технология открытия крупных и уникальных месторождений нефти и газа на юге Сибирской платформы

*Гатиятуллин Н.С., Тарасов Е.А., Ананьев В.В., Шагидуллин Ф.Ф.* Оценка перспектив нефтегазоносности палеозойских отложений мелекесской впадины

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

*Кардыш В.Г., Шумов Л.А., Кардыш Г.В.* Легкий универсальный буровой станок ББУ-000

## ОХРАНА НЕДР И ЭКОЛОГИЯ

*Кирюхина Н.Н., Шахиджанов Ю.С.* Разрушение геологической среды и ее радиационное загрязнение в результате ядерных испытаний в недрах

*Чемезов В.В.* Субъективизм в оценке показателей выявления и использования запасов россыпей и его последствия при охране недр

*Ахундов И.Д., Гусейнов М.А., Солодилов Л.Н.* Прогноз пожаровзрывоопасности в угольных шахтах

## УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

*Зайченко В.Ю.* Маркетинг интеллектуальной собственности, создаваемой в сфере геологического изучения недр

*Мерцалова Г.В.* Недра как объект государственной регистрации права собственности и других прав.

Бежанов С.К. Критерии поисково-ревизионной оценки проявлений и месторождений полезных ископаемых в условиях рыночной экономики

Асеев С.А. Моделирование упорядочения инвестиционных проектов

#### ГЕОФИЗИКА

Анфилогов В.Н., Хачай О.А., Калашников Н.Г., Кораблев Г.Г., Новгородова Е.Н., Хачай О.Ю., Кононов А.В. Опыт геолого-геофизического изучения строения Уральской алмазоносной россыпи и поиска первичных источников алмазов

Рыжов А.В. Распространение волн в дискретной модели упругой среды

#### ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Куренной В.В. Гидрогеологическая карта территории субъекта Российской Федерации

#### ХРОНИКА

Виктору Андреевичу Ярмолуку — 90 лет

90 лет со дня рождения Алексея Алексеевича Рясного

Памяти Леонида Семеновича Язвина

Памяти Николая Николаевича Ведерникова

#### № 4

С Днем геолога!

#### ГЕОЛОГИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ И РАЦИОНАЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ МСБ МЕТАЛЛУРГИИ И АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Тигунов Л.П. Пути рационального использования и эффективного развития минерально-сырьевого потенциала России

Покалов В.Т. Отечественное минеральное сырье — основа развития металлургического комплекса.

Темнов А.В. Российский ниобий — на службу отечественной металлургии

Машковцев Г.А., Мизута А.К., Наумов С.С., Бойцов А.В. Программа «Уран России» и пути ее реализации

Машковцев Г.А., Наумов С.С., Щеточкин В.Н. Минерально-сырьевые базы урана стран СНГ и стратегия их использования в рамках единого экономического пространства

Столяров А.С., Халезов А.Б., Ивлева Е.И., Милославская О.А. Эволюционно-геологические модели крупномасштабного марганцевого рудообразования на примерах осадочных месторождений России и СНГ

Соколов С.В. Физико-химические условия формирования оруденения в породах карбонатитовой серии

#### ИЗУЧЕНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Ожогина Е.Г., Рогожин А.А. Применение комплекса минералого-аналитических методов для технологической оценки руд черных и цветных металлов

Луговская И.Г., Ожогина Е.Г., Дубинчук В.Т., Ануфриева С.И. Минералогические критерии технологической оценки нетрадиционных видов полезных ископаемых

Симаков В.А., Земцова Л.И., Исаев В.Е. Экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ растворов подземного выщелачивания в стационарных или полевых условиях

Кривоконева Г.К., Сирина Т.Н. Рентгенографические признаки формационной принадлежности касситерита

Орлов М.В., Чесноков Л.В., Нечелюстов Г.Н., Леденева Н.В. Вещественный состав уранового оруденения в Центральном Присянье

Сидоренко Г.А. Требования к достоверности результатов количественного фазового анализа горных пород, руд,

продуктов их технологического передела и техногенных образований

Викуллова Л.П., Ожогина Е.Г., Пугачев В.С. Методика изучения вещественного состава руд при создании стандартных образцов фазового состава и свойств минералов

Колбанцев Л.Р., Куприянова И.И., Скоробогатова Н.В., Кузьмин В.И. Совершенствование нормативно-методической базы формирования и использования музейных коллекций каменного материала

#### ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Иванков С.И., Петрова Н.В., Кушпаренко Ю.С., Голева Р.В., Мельников М.Е., Пономарева И.Н. Определение перспектив рациональной технологии переработки океанических кобальтоносных железомарганцевых корковых образований

Кушпаренко Ю.С., Литвинцев Э.Г., Масловский П.А., Тигунов Л.П., Тютюнник Н.Д. Рациональная технология обогащения ильменит-титаномагнетитовых руд на примере Куранахского месторождения

Рябкин В.К., Ратнер В.Б., Тигунов Л.П. Особенности рентгено-радиометрической сепарации оловянных руд Хинганского месторождения

Крылов И.О., Луговская И.Г., Сынгаевский Е.Д. Изменение физико-химических свойств поверхности шунгитового сорбента в результате термоокислительной обработки

#### ГЕОЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Голева Р.В., Пронин А.П., Ануфриева С.И. Экологические исследования в ВИМСе

Стародубов А.В., Бахур А.Е., Березина Л.А., Зуев Д.М., Мануилова Л.И., Иванова Т.М. Особенности миграции техногенных радионуклидов в загрязненных ландшафтах Брянской области

Лебедев В.С., Балакин В.А., Иванов Д.В., Соловьев А.В., Телешева С.Ю. Применение изотопно-химических методов при геоэкологических исследованиях захороненных органических отходов

#### УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

Герасимов Р.А. Конкурсное ценообразование на геологоразведочные работы для государственных нужд: принципы, проблемы, решения

#### ХРОНИКА

Поздравляем юбиляра — Грекулову Лидию Александровну

Ровесница ВИМСа — Екатерина Копченева

Георгий Владимирович Остроумов

Памяти Игоря Константиновича Минеева

#### № 5

#### ОТДЕЛ ВОЕННОЙ ГЕОЛОГИИ ЛЕНИНГРАДСКОГО ФРОНТА

Яцкевич З.В., Саломон А.П., Юфа Б.Я. Роль геологов в строительстве оборонительных рубежей в период героической обороны Ленинграда

Болотина А.И. Инженерно-гидрогеологические работы в прифронтовой полосе Ленинградского фронта

МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ  
Кочкалда Е.Ю., Сизякин Д.А. Минерально-сырьевая база Ленинградской области: состояние и перспективы

Перекатов Б.А., Тютиков Ю.П., Романовский А.З. Геолого-экономическая оценка минерально-сырьевого потенциала недр Ленинградской области

Романовский А.З. Оценка степени инвестиционной привлекательности видов минерального сырья Ленинградской области

*Липин В.М., Филонов С.И.* Проявление редкоземельного оруднения в Ленинградской области

*Легкова О.Е., Менжулин М.Г.* Состояние и перспективы развития МСБ Выборгского и Всеволожского районов

*Романовский А.З., Липин В.М., Быстров А.Ф., Филонов С.И.* Проявление волластонита Купарсаари

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕМ**

*Веденин О.Л.* Система управления недрами Ленинградской области

*Веденин О.Л., Шумахер Д.А., Костин Ю.М.* Геоинформационные технологии при решении задач информационного обеспечения управления недропользованием

**ОБЛИЦОВОЧНЫЙ КАМЕНЬ**

*Романовский А.З., Тутова А.А.* Сырьевая база облицовочного камня Карельского перешейка и критерии оценки месторождений

*Романовский А.З., Каренин А.С.* К вопросу представительного объема опытного карьера для определения блочности при оценке месторождений облицовочного камня

*Архангельский А.А., Савченко А.И.* Опыт разведки месторождения облицовочного талько-хлоритового сланца

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ**

*Грейсер Е.Л., Иванова Н.Г.* Пресные подземные воды: состояние перспективы водоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов

*Яхнин Э.Я., Томилин А.М., Шелемотов А.С.* Оценка качества и химический состав подземных вод дочетвертичных отложений Ленинградской области

*Седова А.А., Бударин В.Ф., Силина Н.И.* Состояние водных ресурсов в бассейне реки Нарва

**ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

*Пинчук Н.П., Кизуб Н.И., Кулындышев В.А., Хорьков В.Я., Покутник А.С., Жуковский А.Б., Саксон В.М., Кузнецов С.А., Абрамов В.Ю.* Концепция контролируемого экологического состояния геологической среды

*Семенов В.В., Бегак О.Ю., Пименова М.А., Ивахнюк Г.К., Носевич А.В.* Экоаналитическая идентификация источников загрязнений нефтяными углеводородами

*Мазуров Г.И., Нестерук В.Н., Пугач В.И.* Отдаленные экологические последствия Чернобыльской катастрофы и их влияние на северо-запад России

**ХРОНИКА**

Чечкин Спиридон Аникантьевич

Памяти Кима Амаяковича Бежанова

**№ 6**

*Каминский В.Д., Иванов В.Л.* На главном направлении: ВНИИокеангеология вчера и сегодня

**НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА**

*Каминский В.Д., Иванов В.Л., Супруненко О.И., Сенин Б.В.* Западно-Арктическая нефтегазоносная провинция на пороге промышленного освоения

*Супруненко О.И., Вискунова К.Г., Сулова В.В.* Основные результаты уточнения количественной оценки углеводородного потенциала Западно-Арктического шельфа России

**ГЛУБОКОВОДНЫЙ АРКТИЧЕСКИЙ БАССЕЙН – ПРОБЛЕМА ВГКШ**

*Буценко В.В., Поселов В.А., Каминский В.Д., Липилин А.В.* Строение литосферы и модель эволюции Арктического бассейна в свете проблемы внешней границы континентально-го шельфа России в СЛО

*Погребницкий Ю.Е., Горячев Ю.В., Трухалев А.И.* Тектоническое районирование Центрально-Арктического бассейна

**ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАГЕНИЯ АРКТИКИ**

*Иванов В.Л.* Арктическая континентальная окраина России: достигнутый уровень знаний и нерешенные проблемы

*Евдокимов А.Н.* Минеральные ресурсы Российской Арктики  
*Иванова А.М., Смирнов А.Н., Ушаков В.И.* Кайнозойский шельфовый рудогенез

*Виноградов В.А., Лопатин Б.Г., Бурский А.З., Гусев Е.А., Морозов А.Ф., Шкарубо С.И.* Основные итоги геологического картографирования масштаба 1:1 000 000 Арктического шельфа России

**УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЯ АРКТИКИ**

*Додин Д.А.* Устойчивое развитие российской Арктики

*Опекунов А.Ю.* Методологические принципы эколого-геохимического мониторинга геологической среды континентального шельфа

**МИНЕРАГЕНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА**

*Андреев С.И., Бавлов В.Н., Каминский В.Д., Опекунов А.Ю., Черкашев Г.А., Мирчинк И.М.* Минеральные ресурсы Мирового океана и перспективы их освоения

*Андреев С.И., Черкашев Г.А., Анисеева Л.И., Степанова Т.В., Батуев Б.Н., Лазарева Л.И.* Глубоководные сульфидные руды океана: достижения и проблемы изучения

**ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АНТАРКТИКЕ**

*Лейченко Г.Л., Грикуров Г.Э., Масолов В.Н.* Геолого-геофизическое изучение Антарктической литосферы

**ПЛАТИНА РОССИИ**

*Додин Д.А., Додина Т.С., Чернышов Н.М., Дюжиков О.А., Поляков Г.В., Щека С.А.* Программа «Платина России»: результаты и основные направления работ

**ЕСТЬ МНЕНИЕ**

*Павленкин А.Д., Межевов Ю.В.* Формы поверхности литосферы и их связь с глобальной геодинамикой

**ХРОНИКА**

Рамазану Магомедовичу Багатаеву – 50 лет

Виктору Ивановичу Реутову – 70

100 лет со дня рождения Герасима Васильевича Богомолова  
Памяти Загорулько Ивана Николаевича

**№ 7**

*Бавлов В.Н.* Основные задачи геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые в 2005 г.

**ГЕОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

*Подурушин В.Ф., Недашковская О.В.* Тектоника Норильского рудного района как фактор образования его месторождений

*Казанцев Р.А., Шайнуров Р.В.* Новейшие данные о геологическом строении северо-восточной части Азовского моря

*Варгунина Н.П., Данильченко В.А.* Объемная модель геохимических ореолов скрытого кварц-полиметаллического оруднения на примере рудной зоны Бозанг

*Голенев В.Б.* Группировка месторождений золота в глинистых корах выветривания для целей разведки

*Бушев А.Г., Коплус А.В.* Люминесцентные методы при поисках платиноидных руд в мафит-ультрамафитовых интрузиях

*Кулындышева Ю.В.* Распределение попутных элементов в углях Подмосковского бурогоугольного бассейна

*Быкова Е.И.* Генерационные модели нефтегазообразования в Предуральской зоне прогибов на примере Косью-Роговской впадины

## ОХРАНА НЕДР И ЭКОЛОГИЯ

*Шахиджанов Ю.С., Кирюхина Н.Н.* Геоэкологические последствия применения подземных ядерных взрывов при разработке газовых месторождений в России и США

## УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

*Зайченко В.Ю.* Интеллектуальная собственность и стандартизация

*Стафеев К.Г.* Опыт стандартизации условных обозначений геолого-экономических карт, создаваемых в технологии ГИС

*Рыжов А.В.* К теории механического сейсмоприемника

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

*Леоненко Л.В., Круподеров В.С., Куренной В.В.* Создание гидрогеологической карты Российской Федерации

## ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

*Михайлова В.Н., Горковенко С.И., Шерстов В.А., Попов Г.И.* Анализ причин тяжелого травматизма на ГРП в Якутии и мероприятия по его предупреждению

## ХРОНИКА

Конференция Российского геологического общества

*Федорчук В.П.* О роли общественных геологических организаций

## № 8

ФГУПП «Волгагеология» — 75 лет

## ГЕОЛОГИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

*Руднев М.Л.* Особенности строения Карлинской структуры  
*Высоцкий К.А.* Новый взгляд на тектоническое строение и перспективы нефтеносности Волго-Камского региона

*Хамидулин В.В., Богатырев О.С.* Состояние и основные направления развития минерально-сырьевой базы углеводородного сырья Приволжского ФО

*Аксенов Е.М., Ведерников Н.Н., Сенаторов П.П.* Проблемы развития и использования ресурсной базы нерудных полезных ископаемых Приволжского ФО

*Салин С.В.* Обновление и создание современной информационной базы торфяных и сапропелевых месторождений на территории Европейской части России

*Пригода В.К., Рубцов Ю.С.* Сульфатные и карбонатные породы Нижегородской области

*Лыгина Т.З.* Аналитико-технологическое сопровождение и обеспечение геологоразведочных и добычных работ

*Вагин Н.А., Зайцев Б.И., Коломиец А.М.* О проблемах технического перевооружения и совершенствования технологии буровых и опытных гидрогеологических работ

## ГЕОФИЗИКА

*Трушин С.А., Шаповалов А.В., Калинин А.Т., Коломиец А.М., Богатырев О.С.* Применение компьютерных ГИС-технологий и результатов аэромагнитных съемок для навигации и решения геологических задач

*Шакуро С.В.* Применение геофизических методов при изучении техногенных линз нефтепродуктов

*Шакуро С.В., Ляхович В.В.* Опыт использования георадарных технологий при решении геологических и гидрогеологических задач

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ И МОНИТОРИНГ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

*Агафонов В.П.* Особенности гидрогеологического картографирования масштаба 1:1 000 000 территории Среднего Поволжья

*Агафонов В.П., Коломиец А.М., Куренной В.В.* Состояние и региональные проблемы мониторинга геологической среды Волжского бассейна

*Коновалова О.А.* Геохимические особенности техногенных аномалий в почвогрунтах на нефтяных месторождениях Удмуртии

## УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

*Зайченко В.Ю.* Форма и содержание — две стороны интеллектуальной собственности

## ХРОНИКА

Расширяются международные связи РосГео

Атабаеву Камине Кайхетисовичу — 75 лет

Ерхову Венедикту Алексеевичу — 70 лет

Ляховичу Владимиру Владимировичу — 55 лет

Гутору Анатолию Аркадьевичу — 50 лет

Памяти Владимира Федоровича Табачкова

## № 9

*Аксенов Е.М., Дистанов У.Г., Сементовский Ю.В.* ФГУП «ЦНИИГеолнеруд» - базовое научное предприятие в области изучения и использования минерально-сырьевой базы неметаллических полезных ископаемых России

*Аксенов Е.М., Садыков Р.К.* Социально-экономическое значение, проблемы развития и использования минерально-сырьевой базы неметаллических полезных ископаемых

*Баталин Ю.В., Фахрутдинов Р.З., Карпова М.И., Садыков И.С.* Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы агрохимического сырья Российской Федерации

*Фахрутдинов Р.З., Карпова М.И., Садыков И.С., Туманова Т.Р., Межуев С.В.* Минерально-сырьевая база фосфатного сырья России: состояние, проблемы и пути развития

*Шевелев А.И., Сабитов А.А., Тимесков В.А., Тохтасьев В.С., Коплус А.В.* Нерудное металлургическое сырье России

*Ахманов Г.Г., Баталин Ю.В., Васильев Н.Г., Валитов Н.Б., Горбачев Б.Ф., Руднев В.В., Серых Н.М., Борисов Л.А.* Стратегия геологического изучения воспроизводства и использования минерально-сырьевой базы горнохимического и горнотехнического сырья

*Полянин В.С., Полянина Т.А., Поклонов В.И., Атабаев К.К.* Прогнозно-минерагеническая оценка территории России на апоультрамафитовое камнесамоцветное сырье

*Дистанов У.Г., Конохова Т.П.* Природные адсорбенты России: ресурсы, стратегия развития и использования

*Лыгина Т.З., Корнилов А.В.* Минералого-технологические решения как основа инноваций

*Садыков Р.К., Сенаторов П. П., Власова Р. Г., Вяткина Л. Ю., Чуприна Н.С.* Минерально-сырьевая база неметаллов Приволжского ФО и ее социально-экономическое значение

*Садыков Р.К., Власова Р.Г., Байчурина Н.Р.* Механизм расчета дифференцированной ставки налога на добычу общераспространенных полезных ископаемых

*Газеев Н.Х.* Направления совершенствования экологической политики Республики Татарстан

*Зорина С.О., Лыгина Т.З.* Инженерно-экологические изыскания для строительства — новое направление деятельности ЦНИИГеолнеруд

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

*Лыгина Т.З., Храмченкова Р.Х., Храмченков М.Г.* Электрохимические свойства почв и грунтов

Наумов С.С., Бастриков Ю.Л. История геологоразведочных работ на уран в контексте «Атомного проекта СССР»  
СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ УРАНА

Самович Д.А. История изучения и современное состояние минерально-сырьевой базы урана Восточной Сибири

Рубинов И.М., Молчанов В.И. Становление и результаты специализированных на уран работ на территории Центрально-Сибирского региона

Долбиллин С.И. История поисков, разведки и разработки месторождений урана на Урале

Кушнеренко В.К., Шустов Б.Н., Громов Ю.А., Петров Ю.В. Шестьдесят лет поисков уранового сырья на Северо-Западе России

Мартьяненко В.Г., Новгородцев А.А., Фоменко А.Е., Грабовников Л.В. Центральная геологическая экспедиция за 35 лет

Соломатин Г.Б., Бражников А.С. История создания минерально-сырьевой базы урана и пути решения вопросов ураноносности Дальнего Востока и Якутии

Берикболов Б.Р., Сушко С.М., Долгополов В.Ф., Вершков А.Ф. Вклад АО «Волковгеология» в развитие и укрепление МСБ урановой промышленности Казахстана

Халмурзаев Н.Х., Корсаков Ю.Ф. Основные этапы деятельности ГПП «Кизилтепагеология» в Средней Азии

Бакаржиев А.Х., Макивчук О.Ф., Попов Н.И. Создание минерально-сырьевой базы урана Украины

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ, АППАРАТУРНОЕ И КАДРОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА УРАН

Машковцев Г.А., Мигута А.К., Щеточкин В.Н. Роль ВИМСа в создании и развитии минерально-сырьевой базы урана

Афанасьев Г.В., Бузовкин С.В., Миронов Ю.Б. Региональная металлогения урана за 60 лет

Величкин В.И., Власов Б.П., Омеляненко Б.И., Алешин А.П., Тарасов Н.Н., Винокуров С.Ф. История, состояние и перспективы развития исследований в области радиогеологии и радиогеоэкологии в ИГЕМ РАН

Мац Н.А. Научно-практическое геофизическое обеспечение прогнозно-поисковых и разведочных работ на уран

Мальцев А.В. Методические разработки и история создания аппаратуры для поисков и разведки урана

Микельсон Э.Э., И.М. Хайкович И.М. Становление и развитие отечественной радиометрии

Бойцов В.Е. Новая научная школа – «Урановая геология»  
РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВА УРАНА И ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Коновалов В.Ф., Головинский С.А., Бойцов А.В., Кротков В.В. Производство урана в России: история, состояние, перспективы развития

Шаталов В.В., Никольский А.Л., Прибытков П.В., Заварзин А.В., Тарханов А.В., Фазлуллин М.И., Авдонин Г.И., Гордиенко О.Е. Геологические и минералого-технологические исследования ВНИИХТа и его сотрудничество с УРАНГЕОЛОГОРАЗВЕДКОЙ

Дигонский С.В., Тен В.В. Пирометаллургическое извлечение золота из продуктов гравитационного обогащения суходожской руды  
ХРОНИКА

Губанов Е.А., Прокопенко А.Е., Шипулин Ю.К. К 50-летию ФГУГП «Гидрогеологическая экспедиция 16 района»

Боревский Б.В., Боревский Л.В., Язвин Л.С. Основные принципы разработки новой Классификации эксплуатационных запасов и прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод  
Закутин В.П. Региональные гидрогеохимические провинции пресных подземных вод, некондиционных по содержаниям микроэлементов

Боревский Л.В. Гидродинамические особенности глубокозалегающих водоносных горизонтов

Боревский Б.В., Олиферова О.А., Поляков С.И., Сидоркин В.В. Типизация месторождений пресных подземных вод Татарстана для целей оценки эксплуатационных запасов

Мелихова Г.С., Сычева Л.Б. Методика поисково-оценочных работ на участках инфильтрационных водозаборов в долинах рек севера Кольского полуострова

Боревский Б.В., Еришов Г.Е. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод при неравномерном водоотборе в речных долинах в условиях сработки-восполнения их емкостных запасов

Кадамцева Т.Н., Козак С.З., Сидоркин В.В., Федулова А.М., Язвин А.Л. Основные результаты поисков подземных вод для удовлетворения питьевых потребностей поселка Тура

Еришов Г.Е., Палкин С.С., Фортыхин А.В. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод на отдельных участках нефтяных месторождений с использованием постоянно-действующих моделей

Плугина Т.А., Сидоркин В.В., Закутин В.П. Прогнозная оценка изменения качества подземных вод Прибрежно-Челнинского месторождения методами аналогии и моделирования

Шуваткин К.Н., Зубанова Т.Н. Опыт оценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод по одиночному водозабору

Просекоев А.М., Козак Н.С. О прогнозе изменения уровня грунтовых вод под влиянием крупного водоотбора из подземных источников

Колотов И.Б. Оценка влияния отбора подземных вод из водоносных отложений в каменноугольных отложениях на режим уровней грунтовых вод в пределах Московского региона

Палкин С.С., Сычева Л.Б. Использование данных мониторинга для оценки эксплуатационных запасов подземных вод, добываемых системой групповых и одиночных водозаборов

Палкин С.В., Палкин А.С. Результаты мониторинга подземных вод на Северо-Комсомольском месторождении

Устинова Г.В., Шуваткин К.Н., Язвин А.Л. Геоэкологическая оценка отдаленных последствий аварийного выброса водонефтяной смеси из добывающей скважины месторождения углеводородов

Богданович А.М. Опыт локализации и ликвидации нефтяного загрязнения на одном из предприятий нефтекомплекса

Черняк А.Г., Язвин А.Л. Обоснование принципиальной схемы общеплощадочного дренажа Западно-Сибирского металлургического комбината

Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Тихомирова Г.И., Соловьева Л.В., Шапошникова Е.Ю. Литогеодинимический метод решения проблем стратификации продуктивных рифей-вендских отложений древних рифтовых систем

РЕЦЕНЗИЯ

Корвет Н.Г. О книге «Инженерная геология Западно-Арктического шельфа России»

ХРОНИКА

Памяти Кардыша Вадима Григорьевича

---

---

## КОМПАНИЯ ООО “ГЕОМОДЕЛЬ-КОНСАЛТИНГ” ПРЕДЛАГАЕТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ ЛИТЕРАТУРУ

**НИКИТИН А.А.,  
ХМЕЛЕВСКОЙ В.К.**  
Комплексирование  
геофизических методов



Тверь: Издательство МГУ, 2004 - 294 с.

**ВЛАДОВ М.Л.,  
СТАРОВОЙТОВ А.В.**  
Введение  
в георадиолокацию



М.: Издательство МГУ, 2004. - 153 с.

---

---

## ИЗДАТЕЛЬСТВО АИС Г. ТВЕРЬ ВЫПУСКАЕТ В 2005 ГОДУ

**Г.Н. БОГАНИК.**

Учебник для вузов "Сейсморазведка". Объем 30 п.л.

**В.С. ЗИНЧЕНКО**

Учебное пособие "Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных". Объем 20 п.л.



Заказ литературы по телефону (0822) 35-75-12, E-mail: [ais@tvcom.ru](mailto:ais@tvcom.ru)

# НЕДРА - 2006

3-я международная выставка 29 марта - 1 апреля

Россия, Выставочный зал Мэрии г. Москвы

НЕДРА 2006



ENTRAILS 2006

Проводится при поддержке Совета Федерации и Государственной Думы Российской Федерации

При участии Министерства природных ресурсов Российской Федерации, Федерального агентства по недропользованию

Организаторы:

ООО "Экспоброкер",

Выставочный Комплекс "Промышленность и строительство"

## Основные разделы выставки:

- Законодательная и нормативно-правовая база использования минерально-сырьевых ресурсов
- Инвестиционные предложения по освоению новых месторождений и реорганизации действующих предприятий добывающих отраслей
- Состояние и проблемы геологического изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы
- Геологическое изучение континентального шельфа Российской Федерации, Антарктики и дна Мирового океана
- Новейшее оборудование, технологии, методы разведки и добычи полезных ископаемых
- Экологическая безопасность при добыче, переработке и транспортировке
- Комплексное использование минерального сырья и глубина его переработки



## В рамках выставки пройдут:

### Научно-практическая конференция

*"Роль минерально-сырьевого комплекса России в социально-экономическом развитии страны и увеличении ВВП"*

### "Круглые столы":

- *"Новые методы добычи и переработки полезных ископаемых";*
- *"Федеральные и региональные законы как инструмент обеспечения эффективного и рационального недропользования"*

### 2-й фестиваль авторской геологической песни

*"Люди идут по свету"*

Более подробную информацию по условиям участия и программе выставки Вы можете получить по: тел/факс (095) 181-41-60, 181-98-15

E-mail: [bild@bk.ru](mailto:bild@bk.ru) , [expobroker@mtu-net.ru](mailto:expobroker@mtu-net.ru)

Официальный сайт выставки: [www.nedraexpo.ru](http://www.nedraexpo.ru)





## СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

# "САМОЦВЕТЫ И АЛМАЗЫ РОССИИ"

Проводится при поддержке Комитета Совета Федерации по природным ресурсам и охране окружающей среды и Алмазного клуба России

**26-29 апреля 2006 г., Россия, Москва, ВВЦ, павильон № 69**

**Организаторы:** Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию Российской Федерации (Роснедра), Отраслевой информационно-методический центр "Проект-Имидж", ЗАО "ВК ВВЦ "Промышленность и строительство"

### Тематические разделы выставки:

- Рынок алмазов, камнесамоцветного, поделочного и декоративно-облицовочного камня
- Состояние и проблемы геологического изучения недр и воспроизводства камнесамоцветного сырья
- Инновации в воспроизводстве минерально-сырьевой базы цветных камней и алмазов
- Современная техника и технологии для горнодобывающей и перерабатывающей промышленности
- Оборудование и алмазный инструмент для обработки алмазов и природного камня
- Рынок драгоценных камней в сети интернет: Состояние и перспективы
- Ювелирные изделия
- Промышленное и медицинское использование самоцветов и алмазов
- Часовая промышленность
- Самоцветы и алмазы в религиозной атрибутике
- Охрана окружающей среды и экологическая безопасность при добыче, переработке и транспортировке
- Подготовка и аттестация кадров

В рамках выставки пройдет научно-практическая конференция:  
**"Российский рынок драгоценных камней"**

Устроитель выставки -  
Выставочный комплекс "Промышленность и строительство"  
тел/факс: (095) 181-41-60, 181-97-86, 181-98-15  
e-mail: Expoprom@rambler.ru; bild@bk.ru, www.vkps.ru

Будем рады видеть Вас среди участников  
и посетителей выставки

**"Самоцветы и алмазы России - 2006"**