

Методика и технология комплексных геофизических исследований для обеспечения геологической безопасности высотного строительства (на примере Юго-Западного АО г. Москва)

Гурьев С.В., ООО "Фирма "Геосейс", г. Москва, Голосов В.П., МИРЭА, г. Москва; Захаров В.Н., Костюченко С.Л., Липовецкий И.А., Мушин И.А., ГФУП «ВНИИГеофизика», г. Москва; Сопочко С.А., Москомархитектура, г. Москва

Массовое развитие высотного гражданского и промышленного строительства предъявляет возрастающие требования к качеству и достоверности информации об инженерно-геологических условиях территорий планируемой застройки. Увеличение этажности зданий, глубины и масштабов освоения наземного и подземного пространства приводит к усилению прямого инженерно-технического и опосредствованного (накопление стационарных изменений) влияния на приповерхностные (первые метры), глубокие (первые сотни метров) и глубинные (первые километры) горизонты геологического разреза. Сложившиеся обстоятельства определяют необходимость не только расширения объемов и видов опережающих геолого-геофизических исследований, но и совершенствования методических и технологических подходов их производства.

Всероссийский научно-исследовательский институт геофизических методов разведки (ГФУП «ВНИИГеофизика») более 25 лет осуществляет разработку, создание и внедрение в практику аппаратно-технических комплексов, совершенствование методических приемов и способов проведения геолого-геофизических исследований, изучение, обработку и интерпретацию материалов по инженерно-геологическим условиям г. Москвы, Московского региона и других городских и промышленных центров РФ.

К основной цели предыдущих исследований относилось изучение верхней части геологического разреза, обнаружение участков нарушенного состояния среды (наличие карстовых полостей, разломов) и техногенных изменений (захороненных свалок, остатков инженерных конструкций и выработок, прорывов коммуникаций), установление и мониторинг уровня грунтовых вод и т.д. В 2007-2008 гг. по заказу Департамента городского строительства города Москвы и Москомархитектуры в рамках научно-исследовательской темы «Оценка сейсмических воздействий на здания высотной застройки на основе результатов проведения детального сейсмического районирования юго-западного сектора Москвы и анализ полученных результатов» ГФУП «ВНИИГеофизика» выполнило комплексные сейсмогеологические работы, ориентированные не только на изучение приповерхностных (пер-

вые десятки-сотни метров) горизонтов, но и на обнаружение зон глубинных разломов и оценку реакции грунтов на упругие события, вызванные землетрясениями.

Были применены три метода исследований: (1) малоглубинные многоволновые сейсмические работы МОГТ по профилям в оползне и карстоопасных районах; (2) наземная глубинная сейсморазведка МОГТ по профилям с расщелками; (3) сейсмологический мониторинг (организация и проведение непрерывной регистрации местных и удаленных землетрясений сетью высокочувствительных сейсмических станций).

Выполнение работ потребовало адаптации технологии сейсморазведки МОГТ и мониторинга к городским условиям, характеризующимся неравномерной плотностью городской застройки, наличием сетей ЛЭП, подземных коммуникаций, сильными техногенными шумами, движением транспортных средств, ограниченностью «свободных» территорий и невозможность выноса пунктов возбуждения за пределы расстановки сейсмоприемников.

Малоглубинные многоволновые сейсмические исследования с использованием продольных (Р) и поперечных волн преимущественно горизонтальной поляризации (SH) - наиболее эффективный способ изучения приповерхностной части геологического разреза (Голосов и др., 2001, 2004, 2008; Баев и др., 2009). Исследования проводятся в условиях естественного залегания горных пород, не нарушая сплошности геологического разреза. В дополнение к редким данным бурения скважин результаты сейсмических наблюдений обеспечивают непрерывное изучение физических свойств разреза и прослеживание границ слоев горных пород до глубины 100-150 м. на всей территории работ.

Профильные малоглубинные сейсморазведочные исследования методом многократных перекрытий (МОГТ) проведены на 9 участках Юго-западного административного округа г. Москвы. Отработано 37 линейных профилей общим объемом около 11 пог.км. Применены сейсмостанции «Эхо» и сейсмоприемники СВ-10 и СГ-10 для раздельной регистрации продольных и поперечных волн, соответственно. В зависимости от реальных условий работ расстояние между сейсмоприемниками составляло 1, 2 и 3 м, а между пунктами возбуждения - 2, 4 и 6 м. Число каналов - 48, кратность наблюдений - 6 и 12. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось ударами молота массой 6 кг. Для возбуждения волн различной поляризации использовались специальные подставки. Накопление одиночных воздействий изменялось от 5 до 10.

В качестве систем обработки полученных сейсмических данных использовались пакеты программ «VISTA» и «SEIS WIN PRO», позволяющие производить обработку информации с этапа ввода исходных данных до получения суммарного разреза и построения куба.

Комплексное использование продольных и поперечных волн обеспечивает уверенное выделение большего числа отражающих границ, чем при применении одного типа волн. Продольными

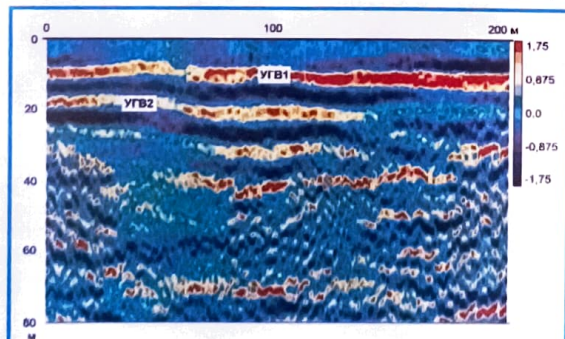


Рис. 1. Динамический разрез по продольным волнам, характеризующий положение двух уровней грунтовых вод (УГВ1 и УГВ2). ЮЗАО г. Москва.

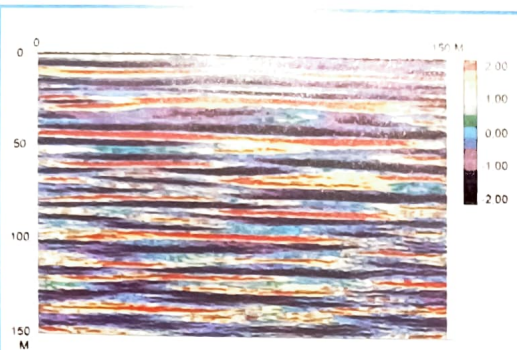


Рис. 2. Глубинный динамический разрез по данным поперечных волн. ЮЗАО г. Москва.

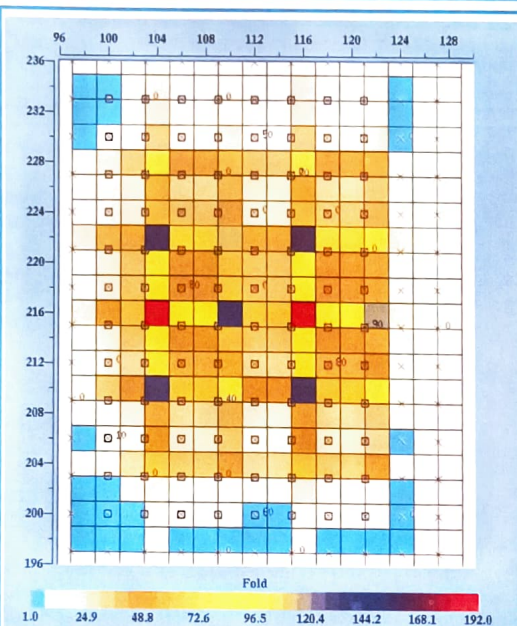


Рис. 3. Система наблюдений и кратность 3-Д исследований в ЮЗАО г. Москва.

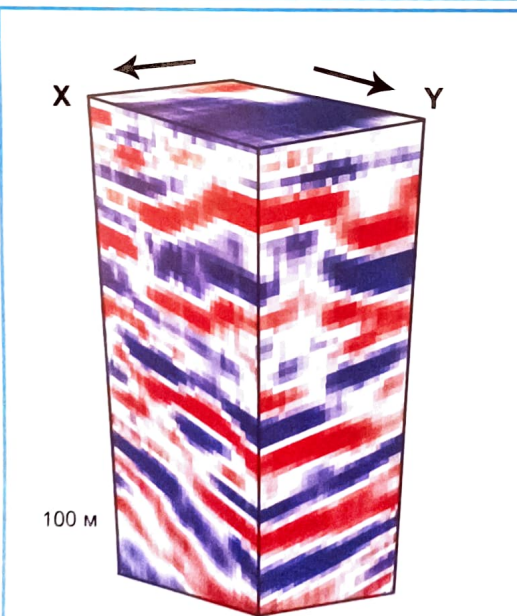


Рис. 4. 3-Д изображение исследованного участка. ЮЗАО г. Москва.

волнами, начиная от первых-нескольких метров глубины, уверенно прослеживается 1 – 2 уровня грунтовых вод (УГВ), которые являются сильными экранирующими границами для нижележащих горизонтов (рис. 1). Поперечные волны характеризуются пониженными скоростями и более чувствительны к изменениям физических свойств горных пород, слагающих геологический разрез. По их данным, как правило, прослеживается от 5 до 6 устойчивых отражающих горизонтов. Применение поперечных волн обеспечило надежное прослеживание толщ моренных и подморенных отложений, кровли песчаных отложений нижнемелового возраста, кровли юрских глин и кровли карбонатных пород верхнего карбона в интервале от дневной поверхности до глубины 100 м и более (рис. 2). Выделяемые с помощью поперечных волн зоны разуплотнения (разрушения) предлагается оценивать по формуле $D = 0,3\sqrt{\lambda Z}$, где D – характерный размер (диаметр) неоднородности в горизонтальной плоскости, λ – длина волны, Z – расстояние от дневной поверхности до зоны разуплотнения. При максимальной частоте спектра SH волн, отраженных от горизонтов четвертичного возраста, около 40 Гц и скорости этих волн 2000 м/сек, на глубине 30 м распознаются зоны с горизонтальными размерами около 3–4 м.

В районе Новоясеневского проспекта выполнены площадные работы по системе профилей, обеспечивших технологию 3D исследований. Система наблюдений и кратности приведены на рис. 3. В процессе обработки реализовано основное преимущество трехмерной съемки по сравнению со стандартными профильными наблюдениями, а именно, выполнение 3D миграции. На рис. 4 показано объемное изображение исследованного участка. Горизонтальные разрезы могут быть воспроизведены для любых глубин куба. Вертикальные сейсмические разрезы по осям X и Y куба строятся по каждой из линий.

В результате выполненных работ оценены мощности и физические параметры сейсмо-геологических комплексов (толщ) геологического разреза. Установлены особенности залегания границ: субгоризонтальные, моноклиналиные, дислоцированные и со смещением. На отдельных участках профилей обнаружены устойчивые нарушения корреляции сейсмических волн, интерпретируемые в качестве зон разрушения среды (рис. 5). Дополнительную информацию привносит анализ динамических свойств зарегистрированных сейсмических волн, например, для оценки модулей упругости и плотности песчаных отложений.

По совокупности установленных сейсмических и геологических признаков полученные материалы позволили оценить исследованные участки по степени инженерно-геологической опасности: безопасные, средней категории и опасные. На территории последних в обязательном порядке должны быть проведены дополнительные геофизические исследования и инженерное бурение.

Профильная глубинная сейсморазведка МОГТ-2D впервые обеспечила изучение особенностей строения осадочного чехла и кровли фундамента под г. Москва до глубины 2,0-2,5 км. Наблюдения выполнены в трех модификациях: (1) с применением импульсных источников Геотон-12 (в объеме 45,0 пог.км), (2) с высокочастотным вибрационным источником SV-5-300V (около 4,0 пог.км) и (3) с обработкой трех компонент волнового поля (11,0 пог.км).

Полевые работы проводило ООО «Геосейс» под руководством С.В.Гурьева с использовани-

МВС: НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ем телеметрической сейсмореги-
стрирующей системы SERCEL428
и цифровых акселерометров
DSU3. Расстояние между сейсмо-
приемниками составляло 10 м,
между пунктами возбуждения – 20
м. Применена симметричная
система наблюдений. Кратность,
зависимости от длины профиля, –
7–75. Максимальная длина расста-
новки – 1600 м, количество актив-
ных каналов до 300.

Для получения наиболее каче-
ственных материалов при исполь-
зовании электродинамических
импульсных источников Геотон-12
(Фирм «Геосейс») необходимо их
группирование в количестве не
менее 4-х на базе 10 м при 26 воз-
действиях на 1 физ. наблюдение.
При возбуждении среды высокоча-
стотным вибрационным источни-
ком SV-5-300V (ЗАО «Геосвиб») оп-
тимальными признаны следую-
щие параметры: Тсв – 16 с, Тзап – 3
сек, количество накоплений – 12,
частота – до 240 Гц (рис. 6).

Изучение строения ВЧР и рас-
чет априорных статических попра-
вок проводились методом первых
вступлений на сейсмограммах
МОГТ с использованием про-
граммного обеспечения фирмы
Green Mountain Geophysics, Inc.
(GMM) Millennium Series Software
включающего систему GeoScribe
(ввод геометрии и контроль каче-
ства анализируемых материалов).

Обработка полученных мате-
риалов выполнена на базе ком-
плекса ULTRA SPARC – 2 в обра-
батывающей системе ProMAX и
системе интерпретации Discovery-
2D. Обработка съемки 2D-3C (X,Y,Z
– компоненты) осуществлена в
ООО «Геофизические Системы
Данных» с использованием систе-
мы ProMAX компании Landmark и
системы IST 3MP компании ГСД.
Геологическая интерпретация
выполнена с применением мето-
дики спектрально-временного
прогнозирования типов геологиче-
ского разреза (Мушин и др., 2008;
Mushin et al., 2000).

Глубинные исследования МОГТ
проводились на территории рай-
она Хорошево-Мневники, в Филе-
вском парке и в природно-истори-
ческом парке «Битцевский лес». В
результате проведенных работ
составлен комплект сейсмических
разрезов, сейсмо-формационных
моделей и структурно-тектониче-
ских схем, отражающих глубины
залегания сейсмо-геологических границ, мощ-
ности отложений, структуру рифейского и венд-
кайнозойского комплексов осадочного чехла,
положение разломов. Рис. 7 иллюстрирует
эффективность сейсморазведочных работ в
Нижних Мневниках. На территории «Битцевского
парка» впервые инструментально установлен
ориентированный в субширотном направлении
глубинный и оперяющие к нему разломы в
палеозойской части разреза (рис. 8). По резуль-
татам интерпретации с применением СВАН тех-

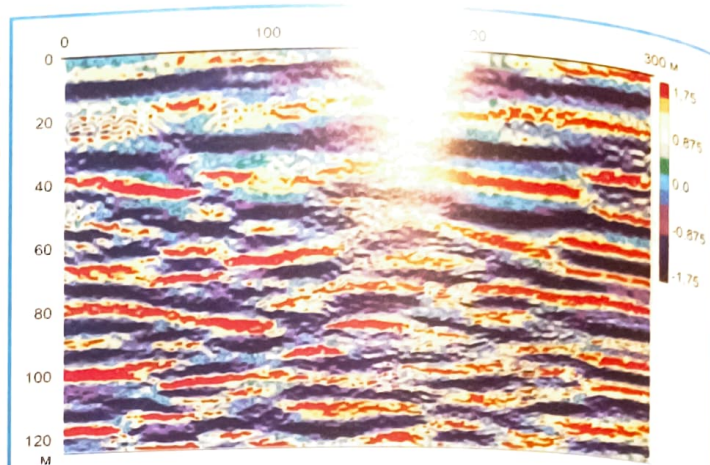


Рис. 5. Глубинный динамический разрез по данным поперечных волн, отражающий нарушенную среду. ЮЗАО г. Москва.

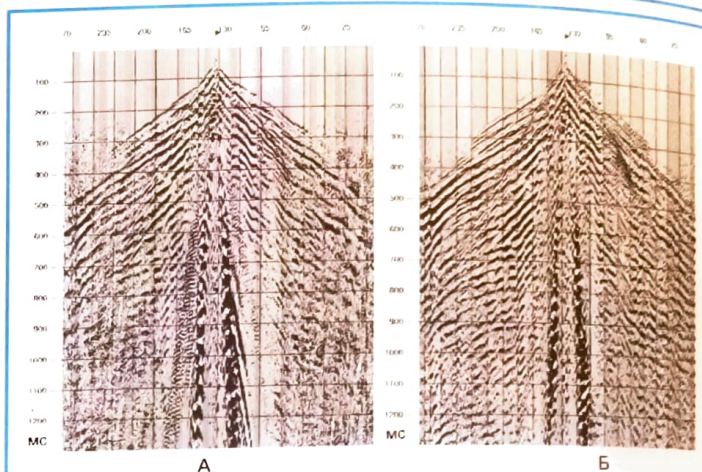


Рис. 6. Исходные сейсмограммы, полученные на одном и том же пункте наблюдений, с применением в качестве источника возбуждений группы Геотон-12 (А) и высокочастотного вибратора SV-5-300v (Б)

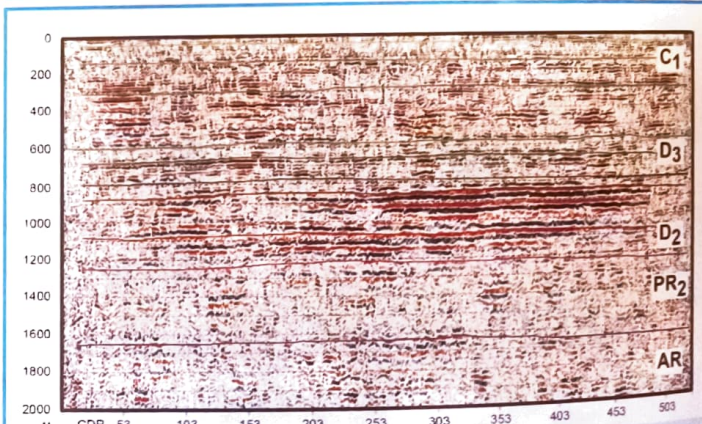


Рис. 7. Глубинный сейсмический разрез в районе Нижних Мневников. ЮЗАО г. Москва. Применена группа Геотон-12

нологий разломы классифицированы на про-
ницаемые и непроницаемые (рис. 9). Проницаемые
разломы могут обеспечивать поступление под-
земных вод в приповерхностные горизонты
земли и, таким образом, контролировать разме-
щение и развитие карстовых процессов.

Для установления связи между глубинными и
приповерхностными неоднородностями геоло-
гического разреза необходимо комплексирова-
ние результатов малоуглубинной и глубокой
сейсморазведки МОГТ, полученных на одних и

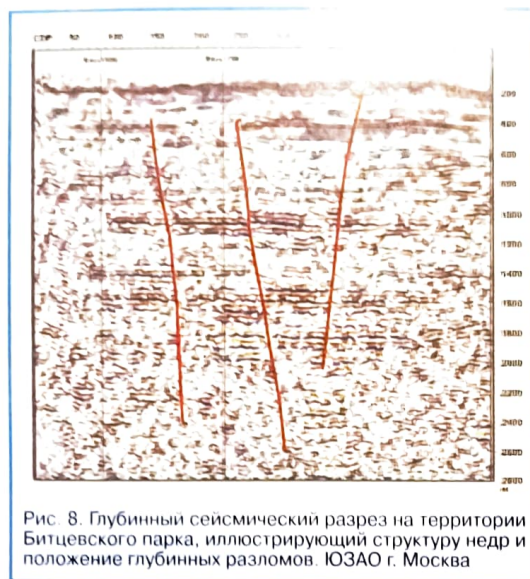


Рис. 8. Глубинный сейсмический разрез на территории Битцевского парка, иллюстрирующий структуру недр и положение глубинных разломов. ЮЗАО г. Москва

тех же профилях. С целью обеспечения безопасности строительства высотных зданий и сооружений необходимо сгущение сети фактических наблюдений по всем видам работ.

Сейсмологический мониторинг включал непрерывную регистрацию землетрясений с 15 сентября 2007 года до окончания 2008 г. шестью автономными цифровыми четырехканальными станциями «Дельта-ГЕОН», размещенными по территории г. Москвы и ближнего Подмосковья (Табл. 1). В качестве датчика сейсмических колебаний применялся электродинамический низкочастотный трехкомпонентный сейсмоприемник СК-1П (велосиметр), имеющий одну вертикальную и две горизонтальных компоненты, расположенные ортогонально. Перед началом работ была определена идентичность всех сейсмических каналов (сейсмического тракта) используемой аппаратуры. В процессе наблюдений осуществлялся контроль АЧХ сейсмических каналов и внутренних часов регистраторов.

Регистрация сейсмической информации производилась ежесуточно непрерывно с 00 час.

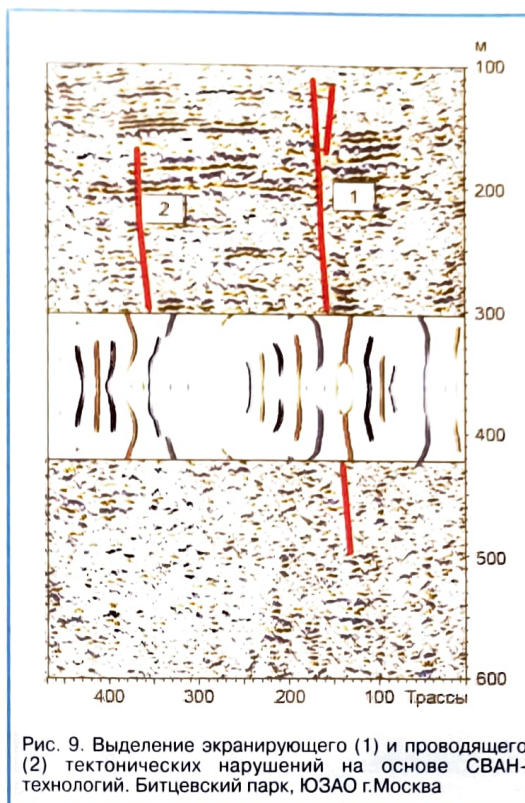


Рис. 9. Выделение экранирующего (1) и проводящего (2) тектонических нарушений на основе СВАН-технологий. Битцевский парк, ЮЗАО г.Москва

01мин. до 23 час.58 мин. по Гринвичу в полосе частот 0,1- 15,0 Гц в режиме «Безусловная запись», а в 00 час. 00 мин. автоматически выполнялась «калибровка» сейсмических каналов. За сутки объем получаемой сейсмической информации достигал 0,4-0,5 GB. Съем записи с флэш-карт каждого регистратора выполнялся периодически один раз в 2-3 дня.

Для правильного выбора параметров регистрации проведен анализ частотного состава полезных событий (ближние и удаленные землетрясения), фона промышленных помех и его уровня. Сейсмические материалы просматривались и обрабатывались программой WINRSS и

Табл. 1. Пункты сейсмического мониторинга и времена прихода Р и S волн от удаленных землетрясений

Событие \ ПН	Тип волн	Апрелевка (ПН1)	Троицк (ПН2)	г. Москва			
				Ясенево (ПН3)	Волгина (ПН4)	Чертаново (ПН5)	Н.Красно-сельская (ПН6)
Греция 08.06.08 г. То = 12 ч. 25 м. 29,71 с.	P	12ч. 30м. 08,290с.	12ч. 30м. 09,016	12ч. 30м. 11,113	12ч. 30м. 11,850	12ч. 30м. 11,355	
Байкал 27.08.08 г. То = 01ч. 35м. 29,3 с	P	01ч. 42м. 57,097с.	01ч. 42м. 55,801с.	01ч. 42м. 54,833с.	01ч. 42м. 55,833с.	01ч. 42м. 57,081с.	01ч. 42м. 53,210с.
Гиндукуш 06.10.08 г. То = 05 ч. 47 м. 38 с.	P	05ч. 53м. 30,618с.	05ч. 53м. 28,522с.	05ч. 53м. 28,650с.	05ч. 53м. 28,729с.	05ч. 53м. 28,153с.	
Китай 05.10.08 г. То = 15 ч. 52 м. 49 с.	P	15ч. 58м. 48,649с.	15ч. 58м. 46,553	15ч. 58м. 46,555с.	15ч. 58м. 47,290с.	15ч. 58м. 46,050с.	15ч. 58м. 46,171с.
Северный Ледовитый океан То = 10 ч. 00 м. 46,2 с.	P	10ч. 08м. 56,810с.	10ч. 08м. 57,545с.		10ч. 08м. 56,188с.	10ч. 08м. 56,921с.	10ч. 08м. 55,065с.
Северный Кавказ 11.10.08 г. То = 09 ч. 06 м. 09 с	P	09ч. 09м. 21,401с.		09ч. 09м. 22,089с.	09ч. 09м. 22,475с.	09ч. 09м. 20,730с.	09ч. 09м. 21,977с.
	S	09ч. 11м. 38,266с.		09ч. 11м. 43,865с.	09ч. 11м. 45,611с.	09ч. 11м. 43,002с.	09ч. 11м. 45,801с.

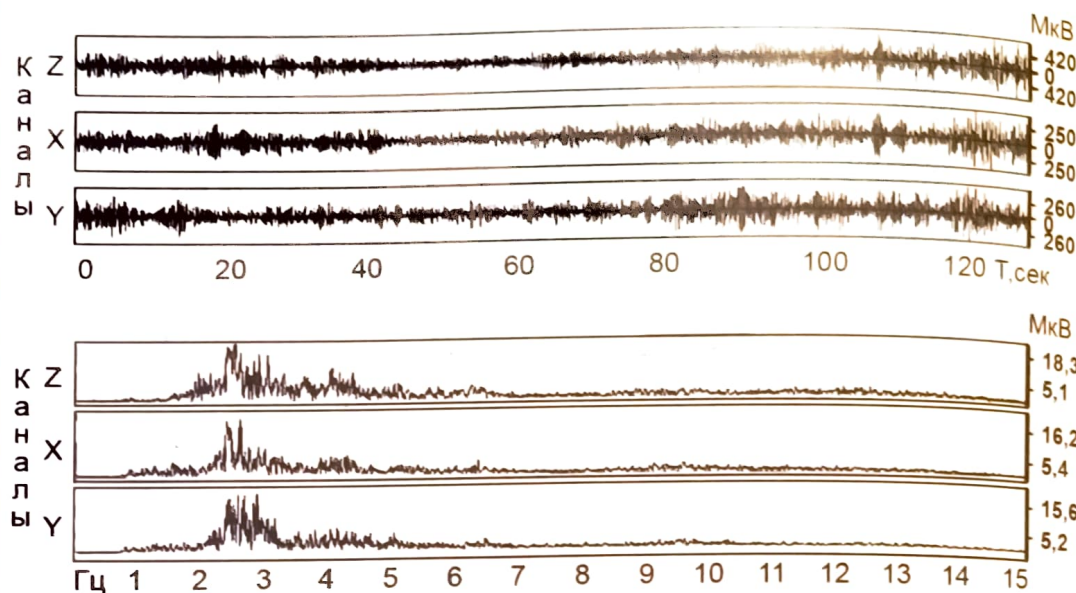


Рис. 10. Фон промышленных помех и его спектр на пункте наблюдения в ЮЗАО г. Москва

программами, составленными в Центре ГЕОН.

В результате работ получены записи далеких землетрясений с магнитудой 5,3 баллов и выше и составлен каталог зарегистрированных событий. Из-за высокого уровня помех, вызванных работой предприятий, строительством, движением автотранспорта и т.д., не все, даже достаточно сильные, землетрясения можно уверенно выделить на записях без применения низкочастотной фильтрации 0,1-1,2 Гц. Выделение и просмотр местных событий, по всей вероятности, практически невозможен, так как их частотный состав близок частотному составу помех, а амплитуда меньше. Для уменьшения уровня помех рекомендуется погружение сейсмометров в скважины на глубину 200-400 м.

Анализ времен прихода Р-волн и S-волн от удаленных землетрясений, зарегистрированных на станциях мониторинговой сети в период с 08.06.2008 г. по 11.10.2008 г. (Китайских, Индийского, Байкальского, Грозненского и др.), показал, что на территории юго-западного сектора г.Москвы существуют временные различия, которые могут свидетельствовать о нахождении регистрирующих сейсмостанций в различных блоках земной коры (Табл.1). Эти блоки по-разному реагируют на сейсмические воздействия далеких землетрясений независимо от азимута прихода и должны учитываться при проведении детального сейсмического районирования. Для повышения надежности информации и более точного определения контуров блоков необходимо сгущение сети сейсмологического мониторинга до 1 пункта наблюдения на 10-25 кв.км. Для оценки степени воздействия приходящих землетрясений на здания высотной застройки желательно установить по 2 пункта наблюдения на нескольких конкретных высотных зданиях: один пункт наблюдения в подвальной части, а второй на верхнем этаже.

Заключение.

Материалы комплексных геофизических исследований, полученные в производственных объемах на территории Юго-западного административного округа г. Москвы, показали их

эффективность при решении инженерно-геологических задач под строительство высотных зданий и сооружений. Разработаны и опробованы методические и технологические аспекты производства работ. Очевидна не только необходимость продолжения подобных исследований в крупных городах, промышленных агломерациях и в районах расположения особо важных объектов для оценки геологической безопасности строительства и установления причин возникновения аварийных ситуаций, но и введение их в регламентирующие документы планирования и производства изыскательских работ.

Литература:

1. Баев А.А., Голосов В.П., Захаров В.Н., Костюченко С.Л., Липовецкий И.А. Обоснование безопасности строительства высотных зданий в юго-западном секторе г. Москвы по результатам инженерно-геофизических исследований. Инженерные изыскания, 2009, № 6 С.64-67.
2. Голосов В. П., Захаров В.Н., Костюченко С.Л., Липовецкий И.А. Малоуглубленная сейсморазведка – эффективный инструмент московских градостроителей. Инженерные изыскания 2008. С. 76-80.
3. Голосов В.П., Федотов С.А., Тимофеев В.В., Федотов А.С. Аппаратурно-методический комплекс для малоуглубленных сейсмических исследований. Разведка и охрана недр, 4-2001. С.45-47.
4. Голосов В.П., Гурова Е.А., Ерхов В.А., Тимофеев В.В., Федотов А.С. Высокоэффективная мобильная многоволновая сейсморазведочная технология малоуглубленных исследований. Разведка и охрана недр 7-2004. С.14-17.
5. Мушин И.А., Копилевич Е.А., Лисунова О.В. Методики спектрально-временного прогнозирования типов геологического разреза. «Геофизика», М., №3, 2008, с.22-28.
6. Mushin I.A., Makarov V.V., Kozlov E.A. and Lowrie A. Structural-formational interpretation tools for seismic stratigraphy. Geophysical Prospecting 48, 953-983, 2000.