

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЕРАТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УЧАСТКАХ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАЛЕГАНИЯ

© С.П. Левашов, Н.А. Якимчук, И.Н. Корчагин, Ю.М. Пищаный, 2009

*Институт прикладных проблем экологии, геофизики и геохимии, Киев, Украина
Центр менеджмента и маркетинга в области наук о Земле ИГН НАН Украины, Киев, Украина
Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина*

There are given results of practical application of a complex of geoelectric methods of forming a short-pulsed electromagnetic field (FSPEF) and of vertical electric-resonance sounding (VERS), as well as of seismic-acoustic and georadar soundings in areas of constructing Kiev new underground stations. The negative (destroying) influence of underground water on transport infrastructure objects under construction and nearby located buildings and dwelling is shown. The following conclusion is made: it is absolutely necessary that underground water flows should be taken into consideration when doing design work for constructing buildings, industrial structures and transport infrastructure objects. Neglecting underground flows causes the essential waste of time and financial resources. The finding and mapping of water flows and areas of super moistened soil can be operatively realized by a complex of offered geophysical methods. This complex can also be used for solving specific engineering and geological problems when constructing new near-surface underground lines, as well as for regular monitoring of the engineering-geological condition of the environment in areas of already acting underground lines.

Введение. В настоящее время академические (научные) учреждения, производственные организации и сервисные компании геолого-геофизического профиля уделяют повышенное внимание вопросам разработки эффективных методов (технологий) решения разнообразных практических задач приповерхностной геофизики – экологических, гидрологических, гидрогеологических, инженерно-геологических, геолого-геофизических. Такого рода технологии создаются и предлагаются для использования как на базе отдельных геофизических методов, так и путем комплексирования нескольких методов различной физической природы. В частности, следует отметить достаточно активное применение в практической деятельности различных геоэлектрических (классических и нетрадиционных, электрических и электромагнитных) методов полевых геофизических исследований. Возможности современных геоэлектрических и электромагнитных технологий при решении разнообразных задач приповерхностной геофизики, а также перспективы их дальнейшего совершенствования и расширения областей применения всесторонне анализируются в серии зарубежных журнальных публикаций обзорного [18, 25-28] и научно-описательного характера [1, 3, 15, 16].

В актуальной по этой проблеме монографии [16] описывается новая методология геофизического изучения негативного влияния активных геологических процессов, протекающих в верхней части разреза, на здания и инженерные со-

оружения. Ее суть – проведение высокоточных геофизических измерений в режиме мониторинга с целью регистрации не только физических полей, но и их изменений во времени. Отмечается эффективность высокоточных гравиметрических измерений и электромагнитного зондирования становлением поля. Методология прошла апробацию на территории архитектурного ансамбля Казанского кремля и позволяет решать следующий круг задач: изучать влияние подземных вод на основания строений; устанавливать особенности влияния современных тектонических движений на строения; трассировать подошву антропогенного слоя; прогнозировать сохранившиеся остатки древних строений в антропогенном слое; выявлять зоны разрывных нарушений, участки утечек подземных водных коммуникаций и др.

В книге [3] изложены основы теории и методики радиоволнового метода (0,5–10,0 МГц) геоэлектрических исследований применительно к задачам геоинженерного мониторинга и экологии. Приведенные в ней примеры демонстрируют возможности метода при решении актуальных задач изучения источников техногенного воздействия на природную среду (контроль и экологическая оценка загрязненности почв нефтепродуктами на промышленных объектах, термокарст, исследование аварий на подземных коммуникациях, картирование пустот, природного карста, оползней, изыскания для организации водозаборов, изучение археологических объектов и т. д.).

Для оперативного решения инженерно-геологических задач, связанных с природными и техногенными процессами разрушительного характера, в последнее время используются также экспресс-технологии геофизических исследований, которые позволяют оперативно проводить полевые геофизические измерения, а следовательно, – получать необходимую экспериментальную информацию для решения конкретных практических задач своевременно, эффективно и в достаточном объеме. К такого рода технологиям относится комплекс геоэлектрических методов становления короткоимпульсного электромагнитного поля (СКИП) и вертикального электрорезонансного зондирования (ВЭРЗ) (экспресс-технология СКИП–ВЭРЗ), а также сейсмоакустического и георадарного зондирования [2, 4, 17, 19–21]. Эти оперативные методы геофизических исследований неоднократно применялись для поисков и картирования водонасыщенных коллекторов и подземных водных потоков [7, 13], изучения инженерно-геологических условий на территориях историко-архитектурных заповедников [23], инженерно-геологических изысканий при реконструкции и строительстве автомобильных дорог и мостов [9, 10, 14], обследования оползнеопасных и карстоопасных участков [2, 11, 14, 19], оперативного обнаружения, картирования и мониторинга техногенной “залежи” газа [12] и т. д.

На протяжении последних пяти лет этот комплекс оперативных геофизических методов активно использовался для изучения инженерно-геологических условий на участках строительства новых линий метро приповерхностного залегания в г. Киеве, а также над уже построенными и работающими его участками. Некоторые результаты выполненных работ экспериментально-исследовательского характера представлены в публикациях [5, 6, 8, 22, 24]. Тем не менее появление еще одной статьи по этой проблеме обусловлено в первую очередь переносом даты ввода в эксплуатацию трех новых станций Киевского метрополитена – Демеевской, Голосеевской и Васильковской – с 2008 г. на 2009 г. Появившиеся в средствах массовой информации сведения о том, что на их достройку необходимо дополнительно 785 млн грн (цифра впечатляет!), свидетельствуют, что проблема учета подземных водных потоков, с которыми столкнулись метростроевцы при проходке туннелей, заслуживает более серьезного внимания.

И еще на одно обстоятельство авторы публикации считают целесообразным акцентировать внимание. Положительные результаты многолетнего практического применения экспресс-технологии СКИП–ВЭРЗ для решения разнообразных задач (в том числе нефтегазопромысловых) дают право сделать достаточно обоснованный

вывод о том, что включение указанной технологии в традиционный комплекс методов для поисков скоплений углеводородов будет содействовать существенному повышению информативности и эффективности геологоразведочного процесса на нефть и газ в целом. В связи с этим материалы настоящей статьи могут служить еще одним весомым аргументом в подтверждение данного вывода, так как убедительно демонстрируют работоспособность и оперативность технологии при решении конкретных практических задач приповерхностной геофизики.

Методы полевых исследований и методика проведения работ. При проведении геофизических работ на объектах Киевского метрополитена были всесторонне апробированы геоэлектрические и сейсмоакустические методы исследований: 1) площадная съемка методом СКИП [2, 19, 21]; 2) ВЭРЗ [4, 20, 21]; 3) сейсмоакустическое зондирование [2, 19, 21]; 4) георадарное зондирование.

Геоэлектрические методы СКИП и ВЭРЗ. Эти методы базируются на изучении геоэлектрических параметров среды в импульсных неустановившихся геоэлектрических полях, а также квазистационарного электрического поля Земли и его спектральных характеристик над исследуемыми объектами (например, подземными водными потоками).

В методе СКИП регистрируется процесс становления поля короткого электрического импульса в малогабаритных дипольных ферритовых антеннах.

Метод ВЭРЗ основан на изучении процессов естественной поляризации среды и спектральных характеристик естественного электрического поля над изучаемыми объектами. Для слоистых разрезов эта составляющая технологии дает возможность разделять разрез в точке зондирования на слои с различными физическими свойствами и с высокой точностью определять глубины их залегания. Эффективность процедуры зондирования повышается при наличии на участках работ задокументированных скважин, которые позволяют соответствующим образом “калибровать” диаграмму зондирования – связывать отдельные интервалы значений на диаграмме ВЭРЗ с соответствующими стратиграфическими разновидностями разреза.

Метод сейсмоакустического зондирования. Практическими исследованиями установлено, что в зонах интенсивного обводнения пород резко увеличивается интенсивность принимаемых сейсмоакустических сигналов. Эта особенность сейсмоакустического метода используется при картировании зон повышенного увлажнения пород.

Сейсмоакустическое зондирование проводится с применением одноканальной станции регистрации сейсмических сигналов, возбуждение сейсмических колебаний осуществляется ударным

способом. Сейсмоакустические отклики регистрируются датчиком, расположенным вблизи пункта возбуждения. Приемниками служат пьезоэлектрические и индукционные датчики с частотной характеристикой приема 0–10 000 Гц. Компьютерная обработка данных сейсмоакустического зондирования по простым алгоритмам нормировки сигналов завершается построением акустических разрезов.

Максимальная глубина зондирования зависит от мощности и частотных характеристик ударного сейсмоимпульса, а также физических свойств изучаемой среды. В большинстве случаев эта величина не превышает 50 м.

Георадарное зондирование. Георадарный метод зондирования сплошных сред – технологически новый метод изучения приповерхностной (в интервале первых десятков метров) структуры геологических разрезов и отдельных объектов. Общий принцип действия георадарных систем основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов электромагнитных волн метрового и дециметрового диапазонов и приеме сигналов, отраженных от границ разделов между пластами зондируемой среды с различными электрофизическими свойствами. Такими границами раздела являются контакты между сухими и водонасыщенными грунтами, границы пород разного литологического состава, контакты между породами и объектами искусственного происхождения и т. д.

При проведении георадарной съемки осуществляются запись и построение на экране компьютера волновой картины отраженных сигналов (радарограммы), которая формируется из набора единичных трасс. Горизонтальная ось радарограммы (расстояние) представляется в метрах, вертикальная – в наносекундах (время) или в метрах (глубина). Глубина расположения неоднородностей разреза вычисляется с учетом скорости распространения электромагнитных волн в среде. Глубина зондирования георадаром повышается при уменьшении центральной частоты возбуждаемых электромагнитных колебаний и увеличении удельного сопротивления разреза.

Съемка методом СКИП обычно используется для выявления и картирования подземных водных потоков, зон повышенной фильтрации и влажности грунтов, установления путей миграции подземных водных потоков. Съемка обычно проводится вдоль отдельных маршрутов, шаг съемки выбирается для каждой конкретной задачи отдельно.

Методы электрорезонансного, георадарного и сейсмоакустического зондирования применялись для определения глубины залегания зон повышенной влажности грунтов и участков повышенной фильтрации подземных водных потоков, а

также отложений различного состава. Зондирование практически повсеместно осуществляется по профилям, шаг измерений вдоль профилей выбирается с учетом особенностей конкретной решаемой задачи. Зондирование ВЭРЗ достаточно часто проводится в отдельных точках, произвольным образом расположенных по площади работ.

Георадарное зондирование выполняется георадаром “Око-2” с антенным блоком АБ-250 МГц. Глубина зондирования в этом случае составляет около 20,0 м. Шаг по профилю равен 0,2 м.

Краткая характеристика результатов предыдущих экспериментальных работ. Для формирования целостного представления о процессе становления геофизической технологии оперативного решения практических задач инженерно-геологического характера на существующих и строящихся объектах Киевского метрополитена целесообразно остановиться на материалах ранее выполненных работ [5, 6, 8, 17, 24].

В статье [5] представлены результаты первых экспериментальных работ по контролю геофизическими методами качества цементирования (заполнения цементирующими растворами межскважинного пространства) и уплотнения грунтов, прилегающих к туннелям метрополитена. Эта процедура (закрепление цементированием) выполняется с целью предотвращения проседания отдельных участков тоннелей под воздействием постоянных динамических нагрузок, которые создают регулярно курсирующие поезда метрополитена.

Проведенные геофизические исследования позволили оценить характер закрепления грунта в районе строительства подземного тоннеля метрополитена. Определены контуры зоны заполнения грунта цементирующими растворами по площади. На вертикальных разрезах вдоль линии тоннеля выделены зоны заполнения грунта раствором и относительная величина такого заполнения.

Карты зон закрепления грунтов цементирующим раствором на глубине 8, 10, 12 м, а также продольные сейсмоакустические разрезы показали, что практически вся зона тоннеля и подстилающие горизонты с 8 до 12 м заполнены цементирующим раствором. Картина заполнения неоднородна как по вертикали, так и в горизонтальном направлении.

Согласно полученным результатам, для оперативной диагностики зон герметизации тоннелей, расположенных на глубине до 15–20 м от поверхности, могут быть использованы метод сейсмоакустического зондирования и геоэлектрическая съемка методом СКИП. Диагностика грунтов под дном тоннеля может осуществляться с помощью георадарной съемки непосредственно в тоннеле. Георадарное просвечивание может выполняться антенным блоком 1,2–1,7 ГГц.

Геофизическими исследованиями в районе станции “Вырлиця” [6] установлены достаточно сложные гидрогеологические условия. Здесь выявлено и закартировано пять зон повышенного увлажнения грунтов, что, вероятно, связано с миграцией подземных вод как искусственного, так и естественного происхождения. Построены схемы распределения цементирующего раствора в плане и в разрезе. Выявлены участки ослабленного проникновения цементирующего раствора в грунт.

По результатам работ сделан вывод, что геофизические исследования с целью выделения зон миграции подземных водных потоков целесообразно проводить до выполнения работ по закреплению грунтов. Полученная в процессе таких работ информация дает возможность повысить качество закрепления грунта.

На участках метрополитена вдоль Оболонского проспекта геофизическими исследованиями установлено наличие зон повышенной фильтрации подземных вод [8]: между станциями метро “Оболонь” – “Минская” выделены три такие зоны, на участке между станциями “Минская” – “Героев Днепра” – две. Вдоль этих зон подземные водные потоки техногенного и естественного происхождения мигрируют в юго-западном и западном направлениях. Выявленные подземные водные потоки пересекают зону туннелей метро. Миграция воды происходит ниже зоны туннеля в интервале глубин 9,0–13,5 м.

По данным геофизических исследований при проведении работ по закреплению грунтов вдоль туннелей метро рекомендовано следить за тем, чтобы глубина закрепления в районе выделенных фильтрационных зон не превышала 10,5–12,0 м. В противном случае закрепленные грунты могут сформировать своеобразную запруду, которая, в свою очередь, будет способствовать резкому поднятию уровня грунтовых вод. Миграционный поток воды в таком случае может быть направлен вдоль полосы закрепления, что может привести к появлению водных истоков в районе станций “Оболонь” и “Минская”.

Рекомендации по результатам выполненных работ были учтены при проектировании и строительстве сооружений торгово-развлекательного комплекса на участке метрополитена между станциями “Оболонь” – “Героев Днепра”.

В публикациях [17, 24] представлены результаты геофизических работ на участке разрушения боковой стенки туннеля метрополитена между станциями “Осокорки” – “Позняки”. На этом участке в районе строительства подземного паркинга на начальном этапе выполнено закрепление туннелей цементирующими растворами в одном направлении. Качество работ проверено геофизическими методами СКИП–ВЭРЗ, а также сейсмоакустическим и георадарным зондиро-

ваниями. Съемкой СКИП здесь выявлена зона повышенного увлажнения грунтов, которая пересекает трассу линии метрополитена. Установлено направление миграции подземных потоков. Естественно, что в данной ситуации цементирующий раствор после остывания частично перекрыл естественные подводные потоки, что привело к определенному изменению направления их движения, вымыванию насыпных грунтов между туннелями и образованию там суффозионных полостей. Впоследствии, после возобновления работ по укреплению грунтов в обратном направлении, эти полости были заполнены цементирующими растворами. В процессе застывания цементирующие растворы начали расширяться (увеличиваться в объеме), что и привело к продавливанию и последующему разрушению боковой стенки туннеля. Повторная съемка СКИП после устранения аварии показала, что зона увлажнения грунтов существенно расширилась. Дополнительными геофизическими исследованиями в районе зоны повреждения выявлены также участки вероятного образования подземных суффозионно-миграционных водных каналов. Вдоль таких каналов зафиксированы места размещения подземных пустот, заполненных водой. Размеры пустот по вертикали от 0,3 до 0,9 м, по горизонтали – от 0,5 до 2,5 м. Пустоты образовались в верхней части водного горизонта на глубине около 5 м от существующей поверхности грунта.

В целом можно констатировать, что именно проведение геоэлектрических исследований до и после техногенной аварии на данном участке метрополитена позволило установить основные причины ее возникновения. Полученные при этом результаты являются весомым подтверждением возможности использования технологии СКИП–ВЭРЗ для оперативного мониторинга по изменению инженерно-геологических и гидрологических условий на участках строительства объектов и сооружений различного назначения.

Результаты геофизических работ на участке строительства новых станций. В настоящем разделе публикации более детально остановимся на проблемах, возникших при строительстве новых станций метро “Демеевская”, “Голосеевская” и “Васильковская”, характерных особенностях обусловленных этими проблемами геофизических задач, а также используемых методических подходах к решению таких задач комплексом оперативных геофизических методов. Выше отмечалось, что указанные серьезные проблемы привели к срыву сроков ввода станций в эксплуатацию и существенным затратам временных и материальных ресурсов, а следовательно, заслуживают более детального рассмотрения.

Провал на ул. Васильковской. На участке строительства левого туннеля между станциями “Го-



Рис. 1. Провал в интервале ПК 52+50 – 52+80 между станциями “Голосеевская” – “Васильковская”

Голосеевская” – “Васильковская” в начале июля 2008 г. в районе пикета (ПК) 52+75 образовался провал грунта (рис. 1) в направлении проходки туннеля до станции “Васильковская”. Для установления причин его возникновения и уточнения гидрогеологического состояния участка работ 15.07.08 г. проведены геофизические исследования в зоне между ПК 51+68 – ПК 52+85. В это время забой туннеля находился на ПК 52+37. По геологическим данным (рис. 2), забой должен был выйти из песчаной линзы, в которой и возник провал, но этого не случилось.

В процессе выполнения работ по данным съемки СКИП построена карта зон повышенной фильтрации и влажности грунтов и установлены пути миграции подземных водных потоков (рис. 3), а по данным ВЭРЗ и георадарного зондирования построен вертикальный разрез участка

работ и определены интервалы глубин зон повышенной фильтрации грунтовых вод (рис. 4).

Как следует из рис. 2, по данным инженерно-геологических изысканий с бурением скважин построен достаточно детальный разрез верхней части участка прокладки туннелей. Однако у метростроителей отсутствовала достоверная информация о структуре зон подземных водных потоков и повышенного увлажнения пород, глубинах их залегания. С использованием традиционных методов инженерно-геологических изысканий получение такой информации сопряжено со значительными материальными и временными затратами.

Съемка СКИП показала (см. рис. 3), что в пределах ПК 51+68 – ПК 52+86 существуют две зоны повышенной фильтрации грунтовых вод и повышенного увлажнения верхнего слоя грунтов. Подземные водные потоки могли сформироваться, скорее всего, за счет истоков из подземных водных коммуникаций, расположенных выше по склону; они пересекают зону туннеля в интервале ПК 52+50 – ПК 52+82 и ПК 51+75 – ПК 52+00.

Первой поток формирует ослабленную зону в интервале глубин 6,8–14,5, второй – в интервале 4,8–12,6 м. В районе ПК 52+75 кровля туннеля вошла в ослабленную зону, что способствовало проседанию и провалу грунта в зону туннеля.

На геолого-геофизическом разрезе (см. рис. 4) ослабленные зоны двух водных потоков выделены над кровлей туннеля. По геологическим данным зона песка постепенно выклинивается за зоной забоя (см. рис. 2), по геофизическим данным это происходит на интервале от ПК 52+30 до ПК 51+80. Подземные коммуникации, показанные на рис. 4, а также нижняя граница зоны по-

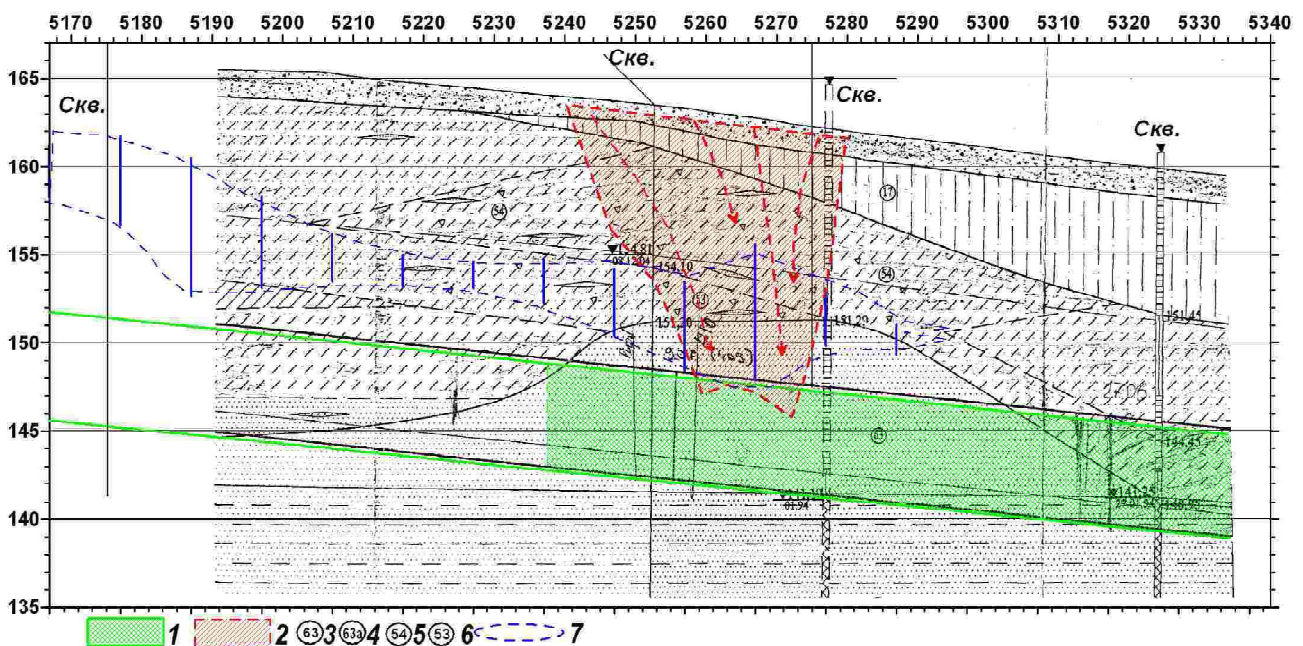


Рис. 2. Геологический разрез участка строительства туннелей метро на перегоне между станциями “Голосеевская” – “Васильковская” (ПК 51+67 – ПК 53+40): 1 – зона подземной выработки на 15.07.08; 2 – провальная зона; 3 – песок; 4 – песок, насыщенный водой; 5 – суглинки; 6 – супесь; 7 – зона увлажнения грунтов по геофизическим данным

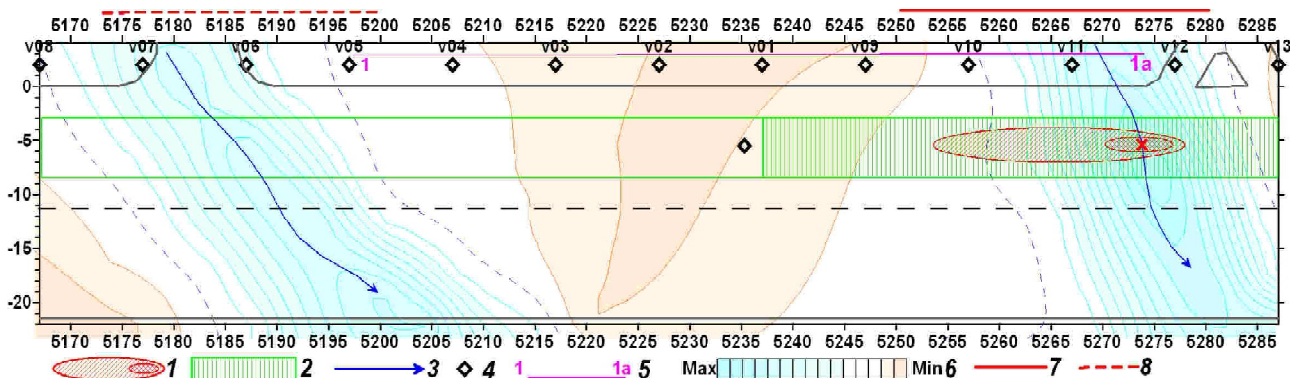


Рис. 3. Карта зон повышенной фильтрации грунтовой воды и путей миграции подземных водных потоков на участке строительства туннелей метро между станциями “Голосеевская” – “Васильковская” (ПК 51+68 – ПК 52+86): 1 – зона провала и просадки грунта; 2 – зона туннеля; 3 – направление миграции грунтовых вод; 4 – пункты ВЭРЗ; 5 – георадарный профиль; 6 – шкала относительной скорости миграции грунтовых вод; 7 – ослабленная зона (ПК 52+50 – ПК 52+82, интервал глубин 6,8–14,5 м); 8 – ослабленная зона (ПК 51+75 – ПК 52+00, интервал глубин 4,8–12,6 м)

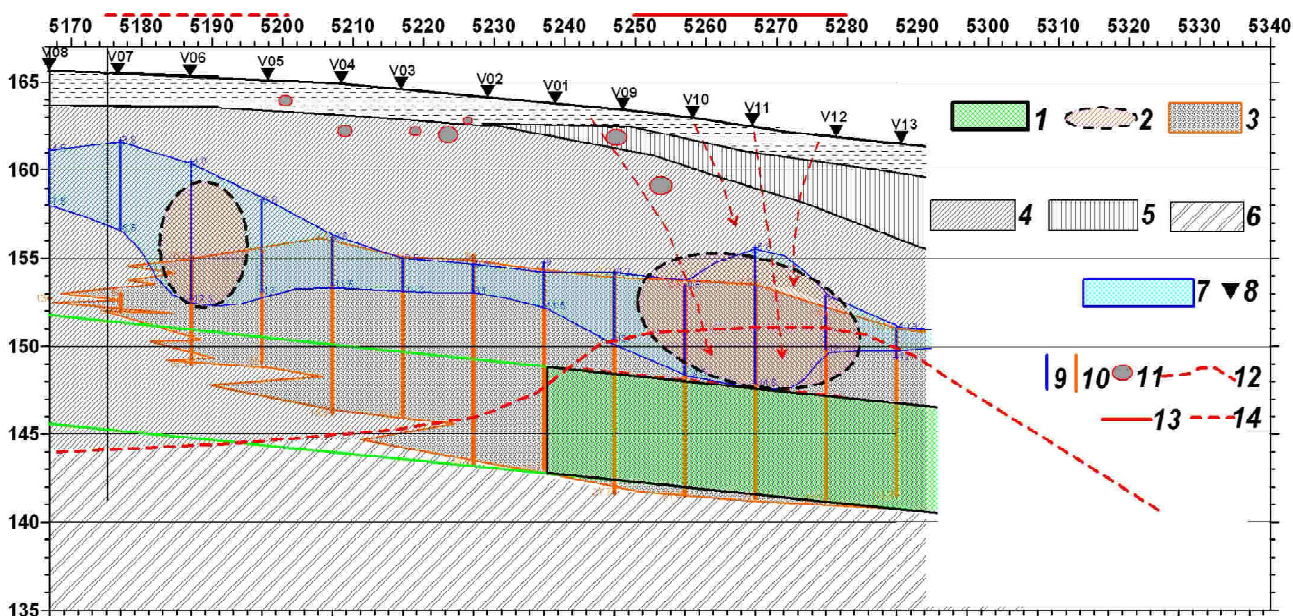


Рис. 4. Геолого-геофизический разрез участка строительства туннелей метро на перегоне между станциями “Голосеевская” – “Васильковская” (ПК 51+67 – ПК 53+40) по геофизическим данным ВЭРЗ: 1 – зона подземной выработки на 15.07.08; 2 – провалоопасные участки (ослабленные зоны); 3 – песок; 4 – суглинки, супеси; 5 – суглинки лессовидные; 6 – песок, насыщенный водой; 7 – водонасыщенная зона фильтрационно-миграционного водного потока; 8 – пункты ВЭРЗ; 9 – глубина залегания увлажненного грунта по данным ВЭРЗ; 10 – глубина залегания песчаных отложений; 11 – подземные коммуникации; 12 – кровля песчаного горизонта по геологическим данным; провалоопасные участки: 13 – ПК 52+50 – 52+80, 14 – ПК 51+75 – 52+00

верхностного техногенного увлажнения грунтов выделены по данным георадарного зондирования.

В целом исследованиями установлено, что причиной провала является наличие в верхней части разреза локальной зоны увлажнения грунтов, которая формируется техногенным водным потоком. Вследствие увлажнения верхней части разреза над кровлей туннеля образовалась ослабленная зона, что способствует выносу грунта в туннель. Опасный участок возможного образования провалов как левого, так и правого туннеля определен в интервале ПК 52+50 – ПК 52+80, вторая зона возможного образования провала – в интервале ПК 51+75 – ПК 52+00.

Особое внимание следует акцентировать на следующее обстоятельство. По результатам работ

метростроевцы были информированы о большой вероятности возникновения провала в зоне второго подземного потока (интервал ПК 51+75 – ПК 52+00) (см. рис. 2, 3). Им также было предложено выполнить геофизические исследования вдоль всего участка строительства. От последнего предложения они отказались, аргументируя отказ тем, что геологический разрез там хорошо изучен. Информация о возможности второго провала не была принята во внимание – конкретные действия при проходке в этом месте предприняты не были. Провал в зоне второго водного потока произошел, что привело к достаточно крупной техногенной чрезвычайной ситуации (аварии) – разрывам канализации и газовой коммуникации с вытекающими отсюда последствиями.

Для авторов работ и настоящей публикации эта чрезвычайная ситуация является весомым и объективным свидетельством работоспособности и эффективности используемой экспресс-технологии геофизических (геоэлектрических, сейсмоакустических и георадарных) исследований. Отметим также, что только такого рода техногенные аварии (указанная, к сожалению, не первая) убеждают потенциальных пользователей технологии в целесообразности и необходимости ее практического применения при инженерно-геологических изысканиях.

Результаты исследований позволяют констатировать следующее: а) причины возникновения провалов установлены, а заключительные выводы достаточно убедительно аргументированы; б) подземные водные потоки и зоны повышенного увлажнения грунтов необходимо выявлять и картировать при проведении инженерно-геологических изысканий и тщательным образом учитывать на этапах как проектирования, так и проведения строительных работ непосредственно.

Станция метро “Голосеевская”. Оперативные геофизические исследования в районе строительства этой станции проводились в начале сентября 2007 г., ноябре 2007 г. и в апреле 2008 г. Ниже они рассмотрены в обратном хронологическом порядке.

В апреле 2008 г. задача исследований состояла в определении причин проседания фундаментов дома № 1, расположенного вдоль котлована строительства станции метро (рис. 5). Основанием для проведения работ было значительное повышение процессов проседания фундаментов во время на-

гнетания цементирующего раствора под дом для закрепления анкеров стены в грунте (рис. 6).

Работы на участке геофизических изысканий (см. рис. 5) выполнялись по таким направлениям: 1) определение и картирование зон повышенной фильтрации грунтовых вод; 2) установление интервалов глубин фильтрационных водных потоков; 3) исследование конструкции стены в грунте.

По данным съемки СКИП здесь в интервале ПК 57+40 – ПК 59+20 выделено несколько зон повышенной фильтрации грунтовых вод. Подземные водные потоки проходят под стеной в грунте и под фундаментами дома № 1 (см. рис. 6) в интервалах ПК 57+50 – ПК 57+70, ПК 57+85 – ПК 58+00 и ПК 58+26 – ПК 59+05. В пределах выделенных водных потоков по геодезическим измерениям наблюдалось максимальное проседание фундамента дома. Наибольшая интенсивность миграционного водного потока установлена в районе угла здания № 1 (геодезический репер № 128).

На рис. 6 показано положение зоны нагнетания цементирующего раствора для закрепления анкеров под фундаментами дома № 1, которая частично перекрывает зоны фильтрации миграционных потоков. В связи с этим перед фундаментом дома зафиксировано расширение зоны увлажнения грунтов.

По данным зондирования построены геолого-геофизические разрезы вдоль профилей 1 (рис. 7) и 2 (см. рис. 5, 6). Глубина расположения зон повышенной фильтрации составляет 8,5–9,5 м от земной поверхности. Мощность зон – от 8,0 до 12,0 м. Наиболее мощная фильтрационная зона наблюдается в районе геодезического репера 128.

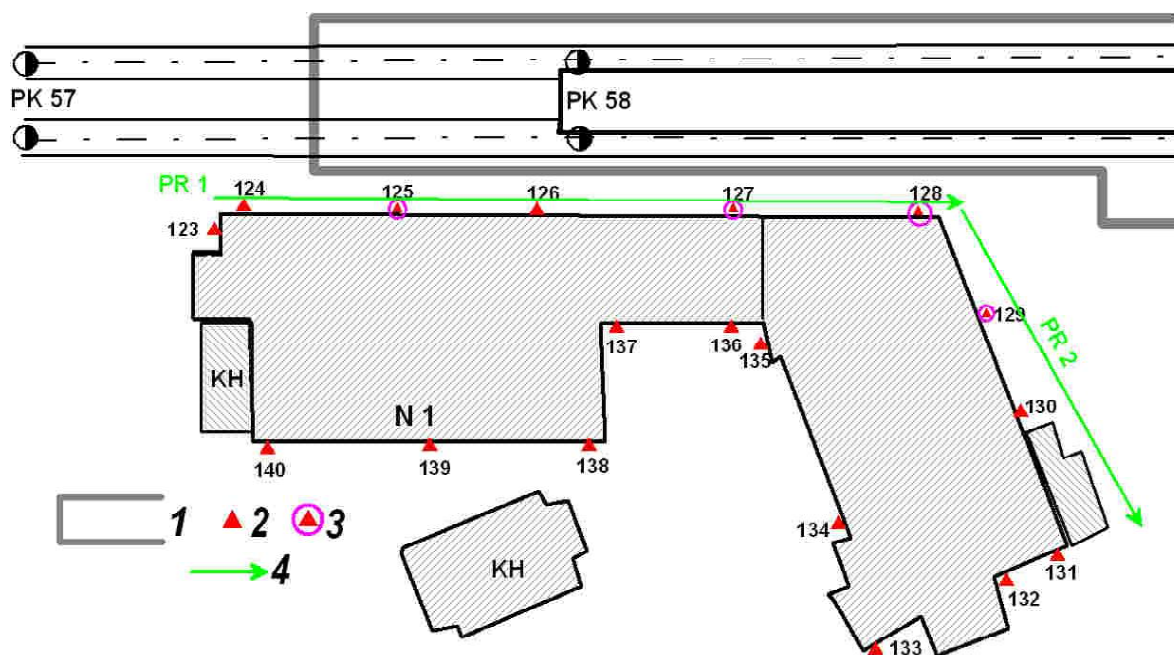


Рис. 5. Схема участка проведения геофизических изысканий в районе строительства станции метро “Голосеевская”: 1 – стена в грунте; 2 – геодезический репер; 3 – зона максимальной деформации зданий; 4 – профиль вертикального зондирования

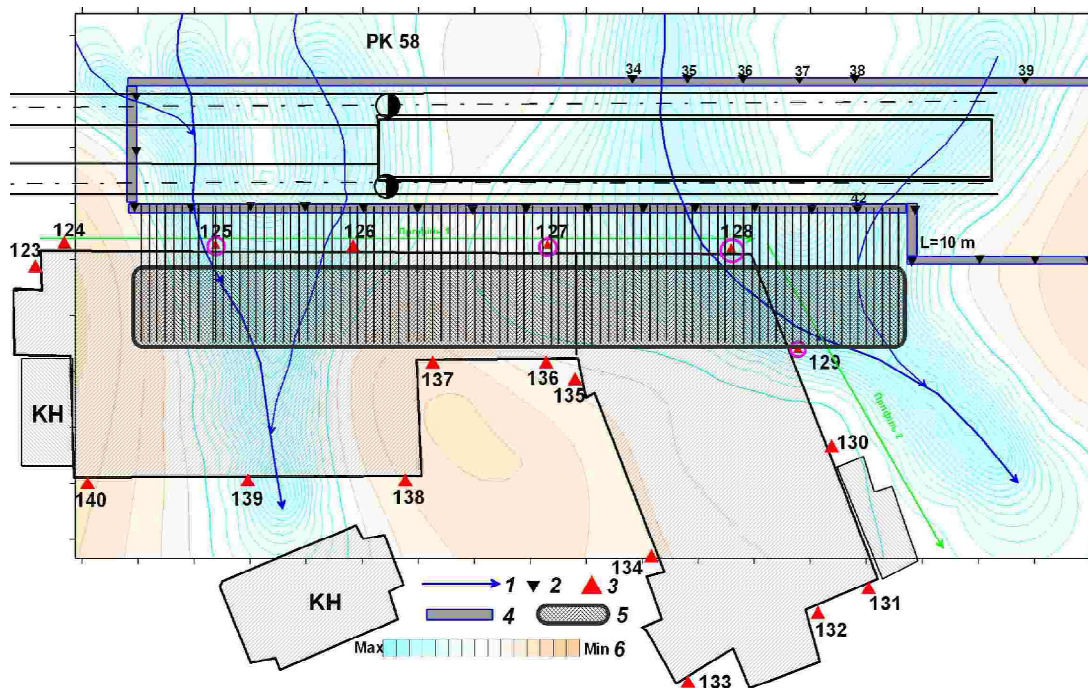


Рис. 6. Карта зон повышенной фильтрации подземных вод и зоны нагнетания цементующих растворов для закрепления анкеров в районе строительства станции метро “Голосеевская”: 1 – направление миграции подземных вод; 2 – точки ВЭРЗ № 1–42; 3 – геодезический репер; 4 – стена в грунте; 5 – зона нагнетания цементующих растворов; 6 – шкала относительной скорости миграции грунтовых вод

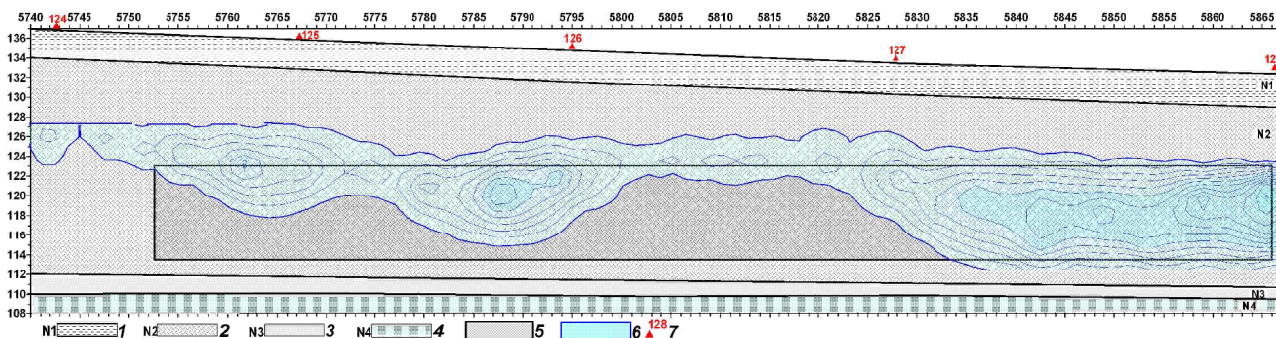


Рис. 7. Геолого-геофизический разрез вдоль здания № 1 в районе строительства станции метро “Голосеевская” (профиль 1): 1 – насыпной грунт; 2 – суглинки и супеси; 3 – суглинки; 4 – глины; 5 – зона нагнетания цементующих растворов; 6 – зона повышенного увлажнения и повышенной фильтрации грунтовых вод; 7 – геодезический репер

Изложенное указывает на то, что проседание фундамента здания вызвано увеличением скорости миграции подземных водных потоков и повышением уровня грунтовых вод. Данные процессы могут быть обусловлены частичным перекрытием зоны фильтрации вследствие нагнетания цементного раствора с целью закрепления анкеров под площадью дома.

В ноябре 2007 г. в задачу геофизических работ на участке строительства станции “Голосеевская” входило определение глубины закладки стены в грунт (рис. 8). В районе строительства изучалось также гидрогеологическое состояние. Были выявлены зоны повышенного увлажнения грунтов и повышенной фильтрации.

Экспериментальные измерения показали, что метод ВЭРЗ позволяет уверенно определять вертикальные размеры стены в грунте. Зондирования ВЭРЗ проведены по левой

(профиль 1, 194 м) и правой (профиль 2, 139+10+55 = 204 м) стенам в грунте, а также по ее торцу (профиль 3, 24 м) (рис. 8). Общая длина участка обследованной стены 422 м. По данным зондирования установлены граница нижней кромки стены, места повышенной фильтрации грунтовых вод и пути их миграции под нижней границей стены.

На рис. 9 показана схема вертикального строения стены в грунте по профилю 2 (правая сторона). В интервале ПК 57+53 – ПК 58+35 мощность стены колеблется от 18,0 до 19,0 м, а между ПК 58+35 – ПК 59+45 – 16,0–16,5 м.

Под основанием стены в интервале ПК 57+53 – ПК 59+15 выявлена зона увлажнения грунтов и повышенной фильтрации грунтовой воды. Ее мощность изменяется от 1 до 4 м. Через данную зону водные потоки мигрируют под основанием стены в грунте.

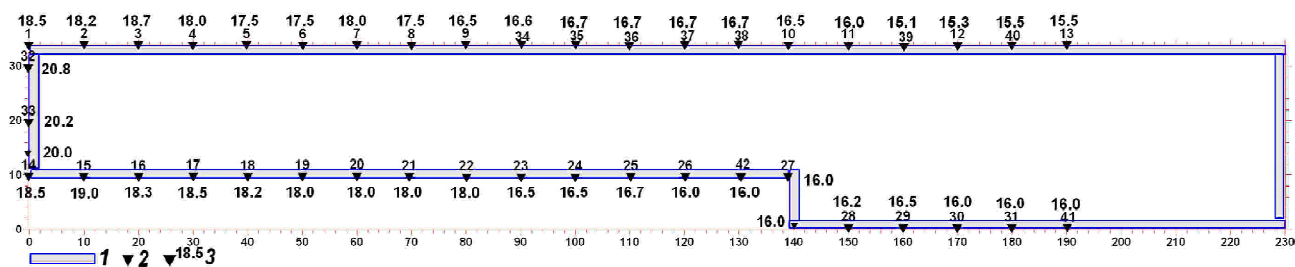


Рис. 8. Вертикальная мощность стены в грунте в точках зондирования в районе строительства станции метро “Голосеевская”: 1 – стена в грунте; 2 – точки ВЭРЗ № 1–42; 3 – вертикальная мощность стены в грунте в точке ВЭРЗ, м

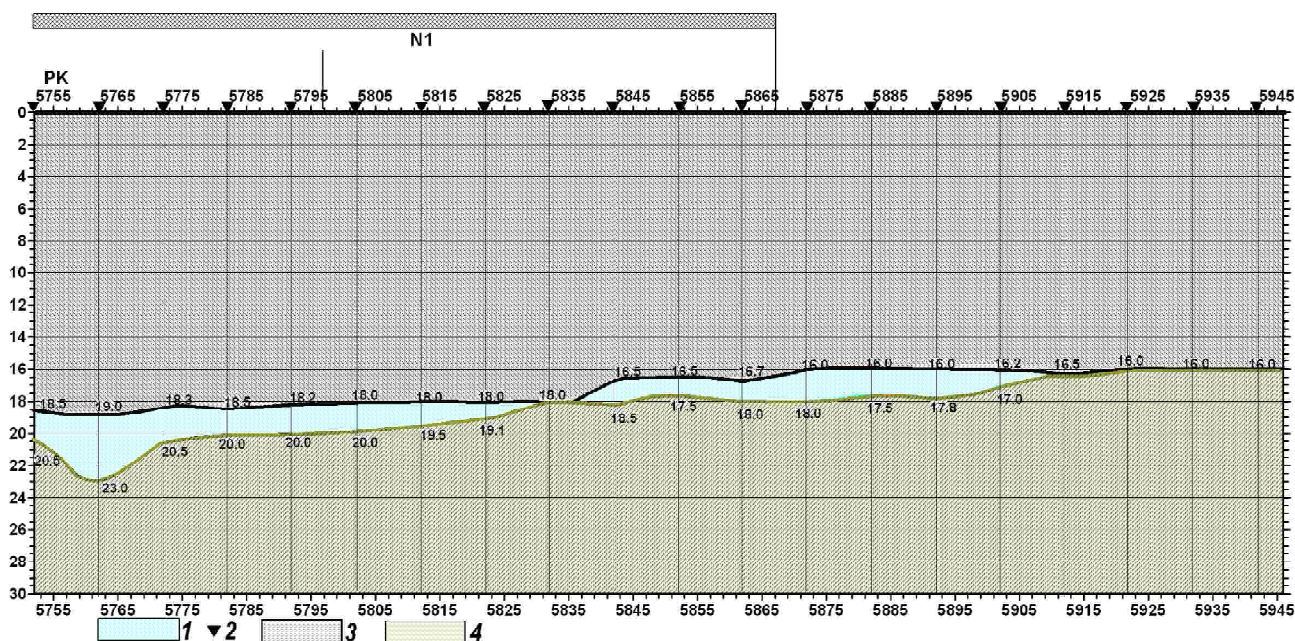


Рис. 9. Схема вертикального строения стены в грунте в районе строительства станции метро “Голосеевская” (правая сторона): 1 – зона повышенного увлажнения и повышенной фильтрации грунтовых вод под стеной по состоянию на 20.12.07; 2 – точки ВЭРЗ; 3 – стена в грунте; 4 – суглинки

Наличие зоны повышенной влажности под стеной обусловлено, скорее всего, тем, что нижняя кромка стены в некоторых местах не достигла отложений суглинков. Она заканчивается в увлажненном песке, который залегает сверху над суглинками (рис. 9). В этих местах и происходит миграция подземных вод под стеной.

В начале сентября 2007 г. задача исследований состояла в выявлении наличия пласта закрепленных грунтов в пределах котлована станции, определении его мощности, а также установлении причин подтопления котлована.

На участке исследования выделено несколько зон повышенной увлажненности пород, протрасированы два фильтрационно-миграционных подземных водных потока, которые пересекают зону котлована. Ширина зон миграции 2–5 м. За пределами левой стены в грунте интервал глубин зоны увлажнения изменяется от 6 до 21 м, правой стороны котлована – от 10 до 23 м.

В результате строительства стены в грунте зоны повышенной фильтрации были частично перекрыты, что привело к поднятию уровня грунтовых вод с левой стороны котлована, усилению

бокового давления на левую стену. Вода начала мигрировать под основаниями стен через небольшое фильтрационное отверстие мощностью 1–2 м. Скорость миграции под основаниями стен выросла в несколько раз. При прохождении воды в зону котлована наблюдалась мощная вертикальная миграция грунтовых вод (рис. 10).

При закреплении грунтов в условиях вертикальной миграции воды с достаточно большим давлением полной герметичности закрепления основания достичь сложно. Вымывание цементующего раствора происходило быстрее, чем его застывание. Вертикальные миграционные каналы наблюдались визуально на дне котлована в виде небольших “блюдеч”, из которых вода постепенно вытекала в котлован. По данным георадарных исследований, фильтрационное отверстие под правой стеной в несколько раз больше, чем под левой. Из котлована вода частично фильтруется через данное отверстие, частично движется вдоль левой стены в грунте.

На участке проведения геофизических работ зона цементного закрепления грунтов установлена с левой стороны до 30 м от торцевой

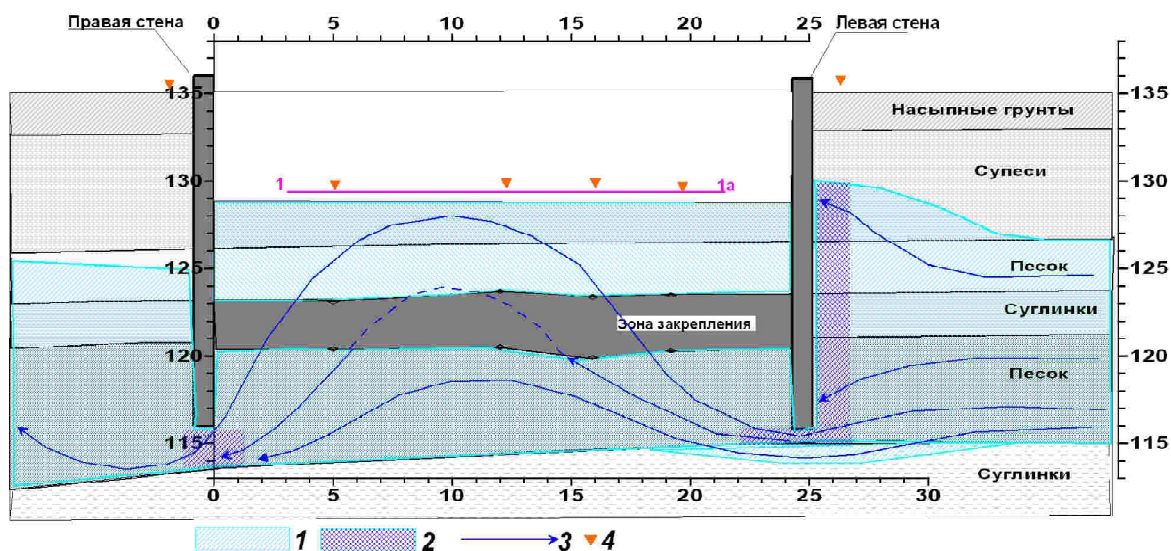


Рис. 10. Схема зоны заводнения грунтов и путей миграции подземных водных потоков на участке строительства станции метро "Голосеевская" (по геофизическим данным): 1 – зона заводненных грунтов; 2 – зона повышенного давления грунтовых вод; 3 – направление миграции подземных вод; 4 – пункты ВЭРЗ

стены и до 25 м – по правой стене котлована (см. рис. 8). Мощность зоны закрепления изменяется от 2,0 до 4,2 м. Максимальная мощность выявлена под левой стенкой котлована (до 4,2 м). В этом месте происходит вертикальная миграция воды вниз. Миграционные водные потоки частично выносили цементирующий раствор вниз.

Результаты георадарного зондирования в центре котлована показаны на рис. 11, а схема процесса проведения измерений георадаром – на рис. 12. В центральной части котлована мощность зоны закрепления колеблется от 3,0 до 2,5 м. Результаты зондирования свидетельствуют, что зона закрепления расположена на проектной глубине и имеет среднюю мощность 3 м, что отвечает проектным требованиям.

Геофизическими исследованиями на участке строительства станции метро "Голосеевская" изучены гидрогеологические особенности участка, определены зоны повышенного увлажнения грунтов, выявлены пути миграции подземных водных потоков; установлено, что процесс замкания грунтов в зоне котлована связан с вертикальной миграцией грунтовых вод из-под стены, построенной в грунте; исследована зона закрепления грунтов, определена ее мощность по отдельным профилям; установлено, что работы по закреплению грунтов отвечают проектным требованиям. Экспериментальные работы по обследованию стены в грунте продемонстрировали возможность определения мощности стены методом ВЭРЗ.

Район Московской площади. Отметим, что основные проблемы у метростроителей возникли при

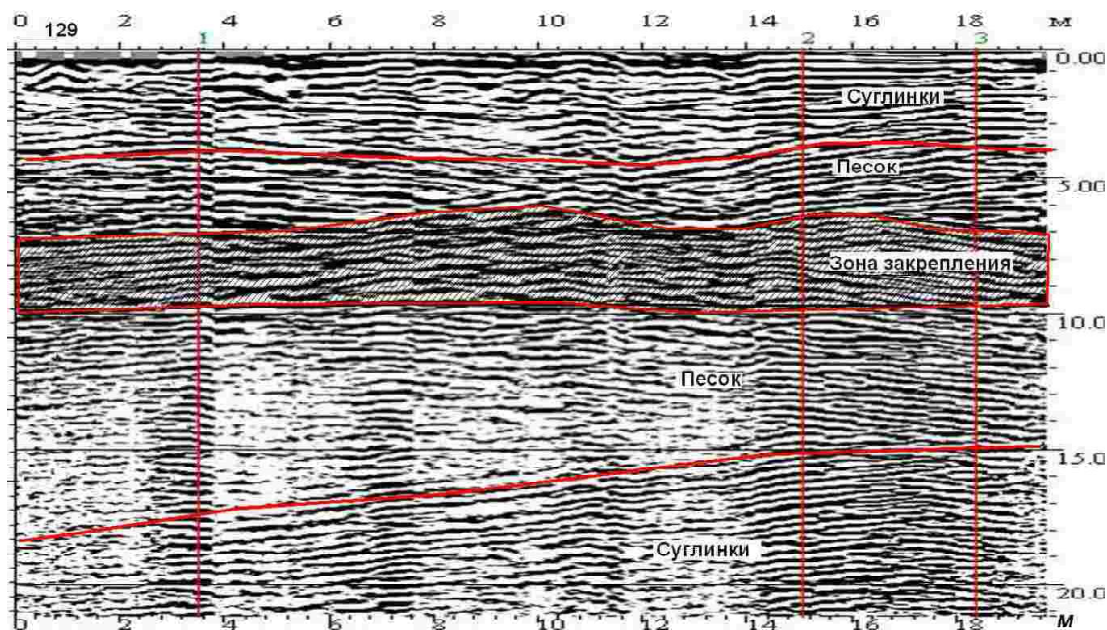


Рис. 11. Георадарный разрез по дну котлована возле торцевой стены в грунте на участке строительства станции метро "Голосеевская"



Рис. 12. Георадарное зондирование в котловане

строительстве участка туннеля метро между станциями “Лыбедская” – “Демеевская”. Здесь из-за мощных подземных водных потоков на проходку 80 м туннелей затрачено около года, хотя в обычных условиях такое расстояние преодолевается с помощью современных проходческих щитов за несколько недель. В силу этого оперативные геофизические исследования на данном участке проводились несколько раз. Вкратце остановимся на них в обратном хронологическом порядке.

12–13 ноября 2008 г. геофизические исследования между станциями “Лыбедская” – “Демеевская” выполнялись на участке ПК 72+00 – ПК 73+00. По состоянию на 12.11.08 г. проходка подземного туннеля в сторону станции “Лыбедская” остановилась на ПК 71+93. В интервале ПК 71+83 – ПК 71+88 образовался провал (рис. 13–16). Задачи исследований: а) детализация (уточнение) инженерно-геологического разреза вдоль оси туннеля в интервале ПК 72+00 – ПК 73+00; б) уточнение глубины залегания отло-

жений водонасыщенного песка; в) определение зон повышенной фильтрации воды, формирующих мощные подземные потоки.

Следует отметить, что инженерно-геологический разрез вдоль оси туннеля на этом участке детально изучен по данным бурения 2003 г. (рис. 13).

По данным съемки СКИП в интервале между ПК 72+00 – ПК 73+00 выделены две мощные зоны повышенной фильтрации грунтовой воды (рис. 14). Они формируются подземными водными потоками, которые мигрируют в направлении р. Лыбедь и пересекают участок строительства туннеля метро на отрезках ПК 71+83 – ПК 72+26 (ширина 43 м) и ПК 72+45 – ПК 72+78 (33 м). Провал кровли туннеля образовался при вхождении туннеля в первую зону повышенной миграции воды, которая формирует участок ослабленных водонасыщенных грунтов в интервале глубин от 7 до 13 м.

По данным георадарного зондирования (рис. 15) и зондирования ВЭРЗ построен геолого-геофизический разрез с выделением участков повышенной фильтрации грунтовой воды (рис. 16). Прослежена кровля отложений водоносного песка.

Установлено, что зоны повышенной фильтрации расположены в районах локальных поднятий кровли отложений песка. В пределах первой зоны фильтрации локальное поднятие кровли песков достигает абсолютной отметки 102,5 м (ПК 72+10), а второй зоны – 103,6 м (ПК 72+70).

По данным георадарного зондирования в пределах зон повышенной фильтрации выделены ослабленные участки грунтов, в которых может происходить вертикальная миграция водных масс. Эти зоны наиболее провалоопасны при строительстве подземного туннеля и расположены в районе ПК 72+02 – ПК 72+04 и ПК 72+54.

Геофизические исследования на участке ПК 73+00 – ПК 74+30 выполнялись в сентябре и в апреле 2008 г., а также в декабре 2007 г.

В декабре 2007 г. здесь было проведено химическое закрепление грунтов. В результате гео-

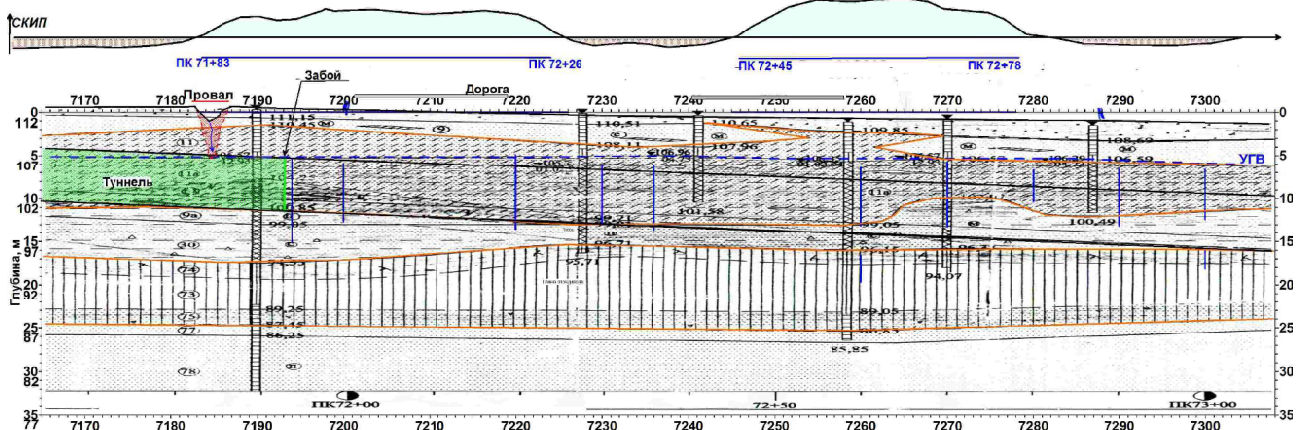


Рис. 13. Инженерно-геологический разрез вдоль оси туннеля на участке строительства Куреневско-Красноармейской линии метро между станциями “Лыбедская” – “Демеевская” (ПК 72+00 – ПК 73+00) по данным бурения 2003 г.

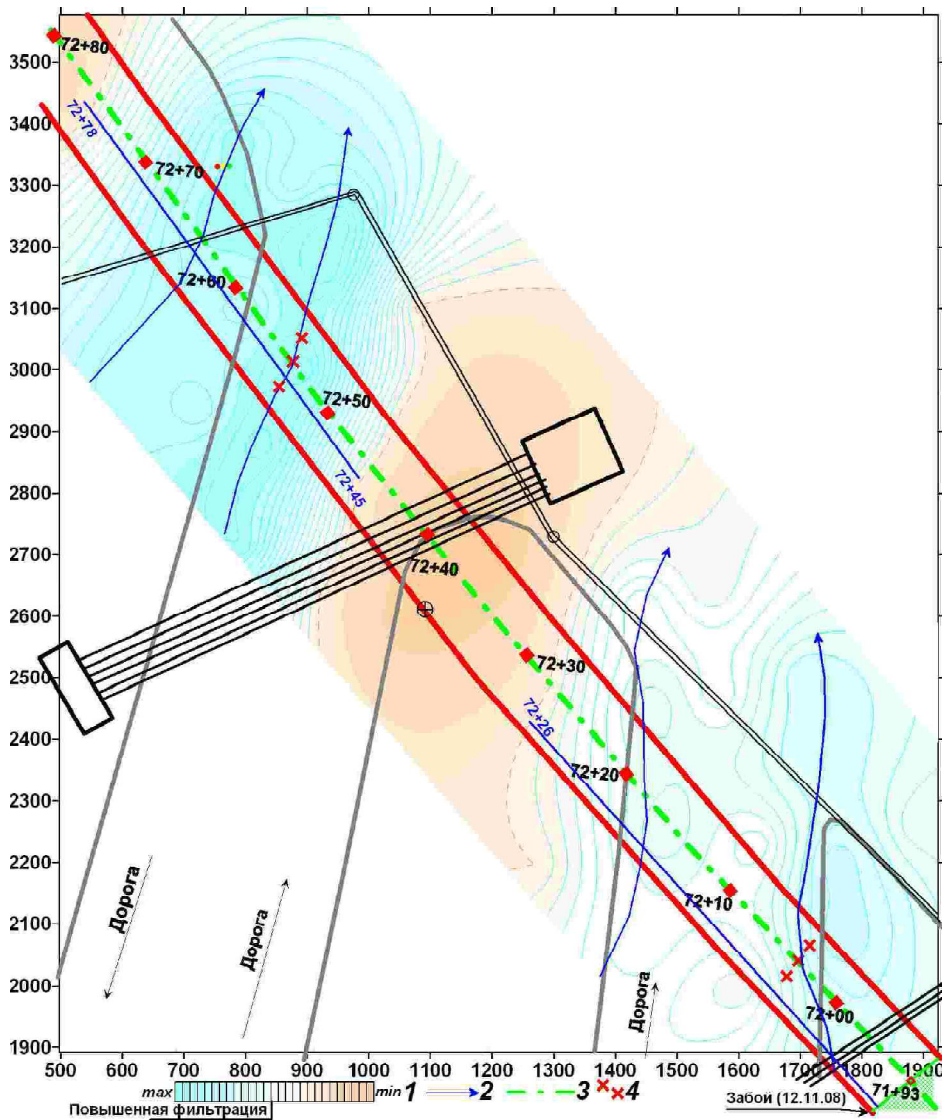


Рис. 14. Карта зон повышенной фильтрации грунтовых вод на участке строительства Куреневско-Красноармейской линии метро между станциями “Лыбедская” – “Демеевская” (ПК 72+00 – ПК 73+80) на 12.11.2008: 1 – шкала относительной скорости фильтрации; 2 – направление миграции подземных водных потоков; 3 – ось туннеля; 4 – места ослабления грунтов

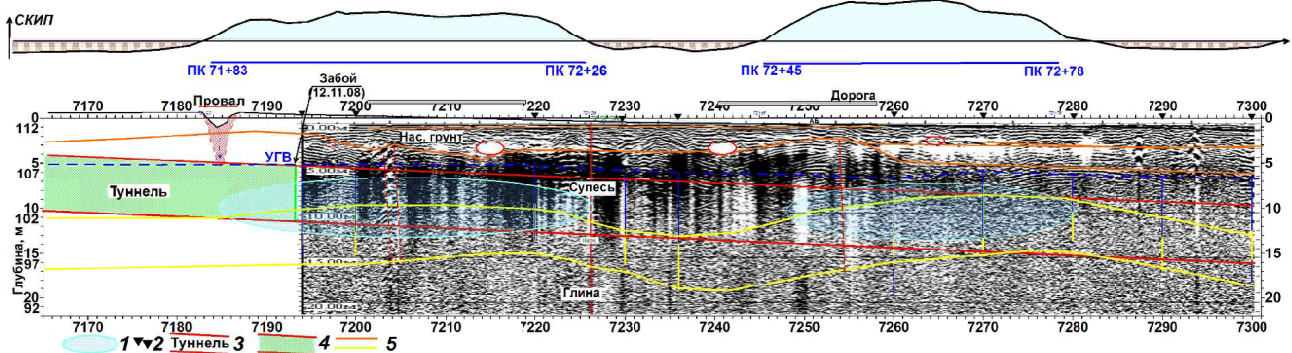


Рис. 15. Георадарный разрез вдоль оси туннеля на участке строительства Куреневско-Красноармейской линии метро между станциями “Лыбедская” – “Демеевская” (ПК 72+00 – ПК 73+00) по данным георадарного зондирования 12.11.2008 г.: 1 – зона повышенной фильтрации грунтовых вод; 2 – пункты зондирования ВЭРЗ; 3 – зона туннеля; 4 – зона проходки; 5 – литологические границы

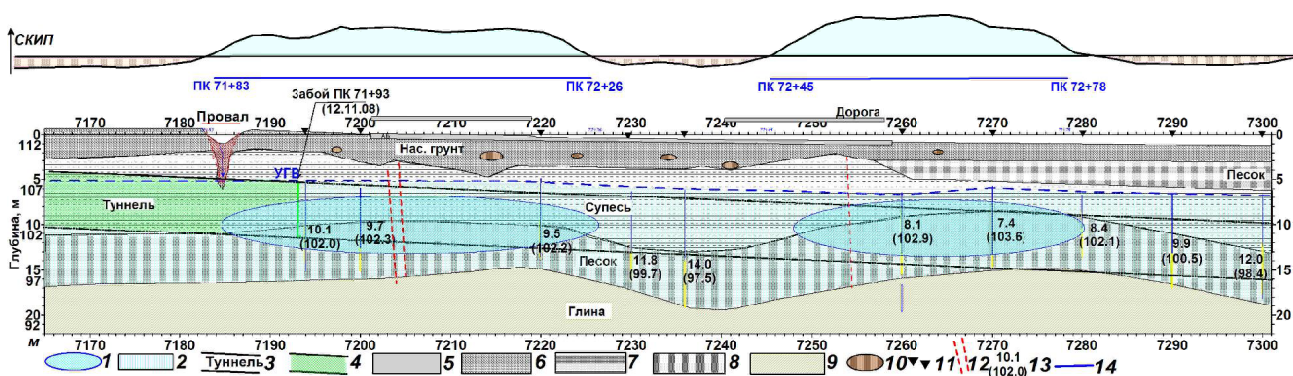


Рис. 16. Геолого-геофизический разрез вдоль оси туннеля на участке строительства Куреневско-Красноармейской линии метро между станциями “Лыбедская” – “Демеевская” (ПК 72+00 – ПК 73+00), по данным зондирования ВЭРЗ 12.11.2008 г.: 1 – зоны повышенной фильтрации грунтовых вод; 2 – увлажненные грунты; 3 – зона туннеля; 4 – зона проходки; 5 – покрытие дороги (асфальтобетон); 6 – насыпные грунты; 7 – супесь; 8 – песок; 9 – глина; 10 – техногенные неоднородности (подземные коммуникации); 11 – пункты зондирования ВЭРЗ; 12 – зона вертикально ослабленных грунтов; 13 – глубина залегания и абсолютная отметка кровли песка, м; 14 – зоны повышенной фильтрации грунтовых вод

физических работ выявлена зона подземного водного потока, в пределах которой грунты оказались незакрепленными. Вследствие высокой скорости фильтрации водного потока закрепляющая смесь вымыта с грунта. Участок подземного потока определен в интервале ПК 74+02 – ПК 74+10 ($L = 8$ м).

В 2008 г. на участке проведено повторное закрепление грунтов цементирующими смесями: в интервале ПК 73+35 – ПК 74+20 – закрепление по технологии “стена в грунте” и частичное закрепление по площади. После возобновления работ по строительству туннеля развились процессы проседания и провалов грунта. Поскольку зона закрепления грунтов расположена ниже по течению подземного потока, на участке строительства туннеля образовалась подземная запруда, что привело к расширению зоны увлажнения грунтов. На период 19.04.08 г. интервал этой зоны находился между ПК 73+92 – ПК 74+15 ($L = 23$ м).

При прохождении туннеля водные потоки вместе с грунтом попадали в подземную выработку, что не давало возможности проводить работы с надлежащей скоростью. На период 20.09.08 г. туннель был пройден к отметке ПК 73+79 (край подземного перехода). Отмечено частичное разрушение подземного перехода, возникновение трещин и т. п.

Задача геофизических исследований в сентябре 2008 г. заключалась в определении современного гидрогеологического состояния участка строительства туннеля.

В декабре 2007 г. геофизические работы на участке ПК 74+90 – ПК 74+18 выполнялись после проведения химического закрепления грунтов. На участке пикетов ПК 74+02 – ПК 74+10 выявлена зона повышенной фильтрации грунтовой воды и установлены интервалы глубин фильтрационного водного потока: $H_1 = 4,5–7,5$ м; $H_2 = 11,0–15,0$ м. На данных интервалах в преде-

лах зоны повышенной фильтрации в разрезе могут быть гравийно-песчаные отложения или крупнозернистые пески.

Повышенная скорость миграции подземного водного потока не позволила провести качественное химическое закрепление грунта. В интервале ПК 74+04 – ПК 74+08 химический раствор был частично вымыт потоками воды.

В апреле 2008 г. после проведения закрепления цементирующими смесями построена “стена в грунте” глубиной до 11 м, которая полностью перекрыла верхнюю зону фильтрации. В результате интервал фильтрации грунтовых вод стал более глубоким – 11–15 м. Мощность фильтрационного потока на этом интервале увеличилась. По сравнению с данными предыдущих исследований зона увлажнения грунтов в районе строительства туннеля также увеличилась. По данным изысканий в апреле 2008 г. интервал зоны увлажнения располагался между ПК 73+92 – ПК 74+15 ($L = 23$ м). Подземные водные потоки начали частично мигрировать в обход закрепленных грунтов, увеличивая зону увлажнения.

В сентябре 2008 г. на участке повышенной фильтрации грунтовых вод между ПК 73+00 – ПК 74+30 выделено две зоны увлажнения грунтов: 1) ПК 73+00 – ПК 73+25 ($L = 25$ м) (начало за переходом под дорогой и под газоном); 2) ПК 73+45 – ПК 74+20 ($L = 75$ м).

Вторая зона постоянно увеличивалась. Вследствие перекрытия участков фильтрации она смешалась в направлении строительства туннеля: 1) декабрь 2007 г. – $L = 8$ м (уровень грунтовых вод $H = 4,5$ м); 2) апрель 2008 г. – $L = 23$ м ($H = 3,8–4,0$ м); 3) сентябрь 2008 г. – $L = 75$ м ($H = 4,5–6,5$ м). Уровень воды на 2,5 м снижен буровыми скважинами водопонижения.

В пределах зоны увлажнения выделены отдельные участки повышенной фильтрации грунтовых вод: 1) ПК 73+62 – ПК 73+70, $L = 8$ м

(под зоной подземного перехода); 2) ПК 73+75 – ПК 73+87, $L = 12$ м (лоб забоя, начало подземного перехода); 3) ПК 73+92 – ПК 73+95, $L = 3$ м; 4) ПК 73+99 – ПК 74+03, $L = 4$ м; 5) ПК 74+07 – ПК 74+20, $L = 13$ м.

Наиболее активная зона фильтрации установлена в районе забоя туннеля. Вполне вероятно, что туннелем перекрываются фильтрационные каналы в интервале от 11 до 15 м. Этот интервал глубин остался для миграции водных потоков после цементации грунтов на глубине от 5 до 11 м. В районе забоя изменение уровня грунтовых вод обусловлено проходкой буровых скважин водопонижения.

Таким образом, при строительстве туннеля на глубине 10–16 м полностью перекрываются пути миграции подземной воды в направлении р. Лыбедь. Вода мигрирует вдоль туннеля и попадает в реку в районе забоя. Дальнейшее строительство туннеля приводит к расширению зоны увлажнения грунтов в сторону подземного перехода.

02.10.08 г. исследования выполнены на участке между ПК 72+65 – ПК 73+40. В феврале 2008 г. здесь проведено экспериментальное закрепление грунтов в интервале ПК 72+05.75 – ПК 72+10.75 путем нагнетания цементующего раствора с примесями жидкого стекла и глины. Геофизическими исследованиями на данном участке выявлена мощная зона подземного водного потока. В задачу повторных исследований в октябре 2008 г. входило выявление наличия закрепленных грунтов в районе проведения цементации, а также установление зон повышенной фильтрации грунтовой воды.

Геофизическими работами выявлена зона максимального подземного водного потока в районе автомобильной дороги, которая расположена за подземным переходом (ПК 73+00 – ПК 73+30). Фильтрационные потоки мигрируют в сторону р. Лыбедь, в интервале глубин 5,0–8,0 и 12,0–13,5 м. Зондированием ВЭРЗ в зонах повышенной фильтрации цементные смеси не выявлены. Закрепленные грунты мощностью от 1 до 2 м установлены между двумя горизонтами повышенной фильтрации.

В зонах фильтрационных водных потоков цементующие растворы потоками воды частично вымыты. В районе скважин, пробуренных ближе к дороге, потоком вынесена большая часть цементующего раствора. Скорее всего, при закреплении грунтов в центральной части подземного потока цементующий раствор данной смеси будет полностью вымыт.

Перед выполнением работ по закреплению грунтов в выявленных зонах повышенной фильтрации необходимо провести детальные инженерно-геологические изыскания, определить литологичес-

кий состав грунтов в этих зонах и для каждой из них подобрать состав цементующей смеси.

Выводы. Изложенные в статье результаты многократных геофизических исследований на трех участках строящейся Куреневско-Красноармейской ветки метрополитена в г. Киеве достаточно наглядно и убедительно демонстрируют негативное (разрушающее) воздействие подземных вод на объекты строящейся транспортной инфраструктуры и близрасположенные здания и сооружения. Недоучет подземных водных потоков естественного и техногенного происхождения при проектировании будущих объектов строительства, а также проведении работ по ремонту и укреплению уже построенных объектов приводит, в конечном счете, к существенным временным и финансовым затратам.

Разрушительное воздействие грунтовых вод и подземных водных потоков на различные инженерные объекты и сооружения неоднократно подтверждалось и ранее в результате проведенных изыскательских работ инженерно-геологического характера с использованием геоэлектрических методов СКИП и ВЭРЗ, а также сейсмоакустического и георадарного зондирования. Об этом свидетельствуют данные выполненных работ по обследованию инженерно-геологических условий в пределах историко-архитектурных заповедников и строений (сооружений, зданий) [23], на участках развития и интенсификации карстовых процессов [11], по установлению причин разрушения фундаментов зданий и сооружений [7], обследованию разрушенных проливными (ливневыми) дождями мостов и участков дорог [14], при проведении изысканий под строительство новых дорог [10] и т. д. На разрушительное воздействие грунтовых вод и подземных водных потоков обращает внимание и автор монографии [16].

В связи с изложенным укажем на один из главных выводов выполненных многочисленных геофизических исследований на объектах Киевского метрополитена: **при проведении проектных работ под строительство зданий, промышленных сооружений и объектов транспортной инфраструктуры необходимо в обязательном порядке учитывать влияние подземных водных потоков!**

Вместе с тем представленные выше практические результаты, а также многолетний опыт экспериментальных работ на различных объектах Киевского метрополитена [5, 6, 8, 17, 24] показывают, что отработанная при решении конкретных практических задач методика проведения полевых геофизических измерений комплексом геофизических методов (геоэлектрических СКИП и ВЭРЗ, сейсмоакустического, георадарного) позволяет оперативно и эффективно выявлять (обнаруживать) подземные водные потоки естественного и техногенного происхождения, картировать

пути их движения и распространение по площади, определять глубины их расположения в разрезе. Особо следует подчеркнуть то обстоятельство, что данная технология в целом дает возможность оперативно и эффективно решать широкий спектр задач приповерхностной геофизики при существенных естественных и техногенных помехах. Следует добавить, что подземные водные потоки, участки повышенного увлажнения грунтов, водоносные горизонты эффективно определялись также при проведении мониторинговых наблюдений за процессом откачки газа из техногенной залежи на месторождении углеводородов [12], при изучении и картировании участков развития карстовых процессов во Львовской области [11], при проведении инженерно-геологических изысканий под строительство новых дорог [10] и разрушенных ливневыми дождями участков дорог и мостов [14], при поисках и картировании водоносных горизонтов с целью выбора мест для закладки скважин водоснабжения [13]. В этом аспекте авторы с удовлетворением отмечают, что отработанная путем решения широкого круга конкретных задач технология оперативных геофизических исследований известна в Украине и широко используется практически во всех регионах страны. Рассмотренная технология позволяет оперативно и эффективно обнаруживать и картировать водоносные горизонты на различных глубинах, подземные водные потоки, участки повышенного увлажнения грунтов и т. д.

Отсюда второй главный вывод: **в процессе проведения инженерно-геологических изысканий под строительство объектов производственной и транспортной инфраструктуры, торгово-развлекательных комплексов и жилых зданий обнаружение и картирование подземных водных потоков и участков повышенного увлажнения грунтов можно оперативно осуществлять комплексом геоэлектрических методов СКИП и ВЭРЗ, а также сейсмоакустического и георадарного зондирования.** Этим комплексом геофизических экспресс-методов могут также эффективно и оперативно решаться специфические инженерно-геологические задачи при строительстве новых линий метрополитена приповерхностного залегания, а также осуществляться регулярный мониторинг инженерно-геологического состояния среды в районах уже действующих линий.

Многолетний опыт практического применения как всего комплекса в целом, так и отдельных его компонентов (методов) позволяет сделать следующие обоснованные выводы.

1. Результаты экспериментов и выполненных работ свидетельствуют об эффективности метода сейсмоакустического зондирования и целесообразности его применения для оценки качества закрепления туннелей цементирующими

растворами в вертикальном разрезе. Он оказался именно тем инструментом, который позволяет без бурения дополнительных скважин уверенно контролировать качество закрепления туннелей метро цементирующими растворами как при прокладке новых линий метрополитена приповерхностного залегания, так и на уже действующих его участках. Построенные по данным сейсмоакустического зондирования разрезы в целом объективно отражают характер проникновения цементирующих растворов в грунт и позволяют сформировать целостное представление о степени закрепления того или другого участка туннеля.

2. Характер проникновения цементирующих растворов в грунт по площади достаточно уверенно определяется по данным геоэлектрической съемки методом СКИП.
3. Площадной съемкой методом СКИП надежно выделяются и картируются участки повышенного увлажнения грунтов, а также зоны фильтрации подземных водных потоков техногенного или же естественного происхождения. Интервалы глубин расположения обводненных участков грунта и зон фильтрации водных потоков уверенно фиксируются методом ВЭРЗ, сейсмоакустического и георадарного зондирования.

В методическом плане целесообразно акцентировать внимание и на тот факт, что, приступая к геофизическим исследованиям на участках строительства новой ветки метрополитена, авторы не имели никакого практического опыта проведения такого рода работ (в том числе по литературным источникам) и не были уверены в успешном решении поставленных перед ними конкретных инженерно-геологических задач. В такой ситуации был избран многократно проверенный и единственно верный путь – проведение полевого эксперимента для изучения возможностей различных геофизических методов при решении конкретной практической задачи. Подобного рода экспериментальные работы показали потенциальному заказчику принципиальную возможность решения поставленных им задач, что, в конечном счете, и привело к последующему выполнению определенных объемов геофизических работ. Методические и технические вопросы решения каждой конкретной задачи отрабатывались детально в процессе ее выполнения. **Этот положительный опыт еще раз подчеркивает важность полевого эксперимента для оценки возможности решения той или другой новой инженерно-геологической задачи и указывает на то, что такого рода эксперименты необходимо проводить более активно.**

В плане “признания” (т.е. активного использования для решения практических задач) разработанной экспресс-технологии геофизических

исследований потенциальными заказчиками принципиальное значение имеет также следующее обстоятельство. В настоящее время метрополитен для г. Киева играет исключительную роль – это один из ключевых элементов транспортной инфраструктуры. Описанная выше авария на действующей линии метро, ее причины и последствия рассматривались и анализировались на многочисленных совещаниях руководителей города и специалистов различных городских служб, а также организаций, занимающихся строительством и ремонтом транспортных коммуникаций, зданий и сооружений. Следствие таких рассмотрений – постановление городских властей об обязательном обследовании инженерно-геологических условий геофизическими методами на площадках строительства новых участков метрополитена, а также объектов социально-культурного назначения в районах, уже построенных и действующих. Благодаря этому геофизическими методами СКИП–ВЭРЗ в комплексе с сейсмическим и георадарным зондированиями выполнено обследование инженерно-геологических условий большинства переходов (отрезков) и станций метро (действующих и строящихся) приповерхностного залегания – Выдубичи, Осокорки, Славутич, Харьковская, Контрактовая площадь, Петровка, Минская и др. Детально описанные выше экстремальные (аварийные) ситуации при строительстве новых станций только усилили сложившееся у метростроителей представление об эффективности и оперативности применяемой геофизической экспресс-технологии. Сегодня технология используется также при изучении инженерно-геологических условий и на других объектах города.

Для г. Киева проблема подземных водных потоков актуальна еще и с точки зрения сохранения историко-архитектурных памятников и сооружений. Так, комплексные геофизические исследования, которые на протяжении многих лет проводились на территории Киево-Печерской лавры, показали, что одной из основных (определяющих) причин разрушения ее исторических памятников и сооружений являются воздействие подземных водных потоков. При этом выполненные работы дают веские основания предполагать, что, в основном, такие потоки формируются вследствие техногенных факторов за пределами лавры, для ее территории они являются транзитными. Отсюда очередной вывод: без устранения влияния внешних (транзитных) потоков на историко-архитектурные сооружения и объекты лавры проводимые там мероприятия с целью их сохранения от разрушения не будут давать должного (ожидаемого) эффекта.

В силу этого актуальным и насущным для г. Киева следует также считать вывод о том, что для сохранения в центральной части города исто-

рико-архитектурных зданий, сооружений и объектов необходимо провести комплексные геофизические исследования с целью изучения (выявления и картирования) подземных водных потоков естественного и техногенного происхождения, участков повышенного увлажнения грунтов, подземных пустот и лабиринтов, зон геодинамической активности. Такого рода исследования целесообразно провести в первую очередь в зонах расположения заповедников и историко-архитектурных комплексов, на оползнеопасных участках, а также на участках строительства зданий и объектов транспортной инфраструктуры. При этом площади проведения измерений должны превышать площади расположения историко-архитектурных памятников с целью картирования транзитных водных потоков и установления причин их формирования. Результаты геофизических исследований на участках будущего строительства должны учитываться на стадии проектирования строящихся объектов.

Учитывая многолетнее успешное применение геофизического комплекса геоэлектрических, сейсмоакустического и георадарного методов на участках метрополитена приповерхностного залегания и других проблемных городских объектах, а также принимая во внимание название монографии “Геофизика для города” [16], авторы полагают вполне обоснованным считать этот многократно апробированный комплекс методов и “экспресс-технологией для города” в том числе (напомним, что комплекс также широко применяется при изучении разнообразных объектов и за пределами городских агломераций). Более того, если учесть возможность оперативного применения данного комплекса (и его отдельных компонентов) для мониторинга аварийной ситуации на месторождении углеводородов [12] и изучения инженерно-геологических условий на разрушенных ливневыми дождями участках дорог и мостов [14], то можно также говорить о создании (разработке) “геофизической технологии для чрезвычайных (аварийных) ситуаций”. Именно оперативность используемых методов, а также возможность проведения полевых работ и получения конкретных практических результатов в экстремальных ситуациях обусловили востребованность данной технологии при изучении причин и следствий опасных природных явлений геологического характера, вызванных природными и техногенными процессами.

В настоящей статье авторы стремились показать (и достаточно аргументировано продемонстрировали) разрушающее воздействие подземных водных потоков на строящиеся объекты транспортной инфраструктуры современного города. Авторы убеждены, что выявлять и картировать такие потоки необходимо на этапах проведения инженерно-гео-

логических изысканий под строительство самых разнообразных объектов. Игнорирование этого в подавляющем большинстве случаев приводит к колоссальным временным и материальным (финансовым) затратам. Авторы надеются, что им удалось достаточно убедительно показать эффективность оперативной геофизической технологии в решении задач обнаружения и картирования подземных водных потоков. Практическое применение этой технологии при проведении инженерно-геологических исследований под строительство может принести существенный экономический эффект. Не меньший эффект можно также получить от включения геоэлектрических методов СКИП и ВЭРЗ в традиционный комплекс поисков и разведки месторождений углеводородов в Украине.

1. *Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А.* Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы развед. геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
2. *Боковой В.П., Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н.* Картирование оползневых участков и зон повышенного обводнения грунтов комплексом геофизических методов на склоне р. Днепр в г. Киев // Докл. НАН Украины. – 2003. – № 11. – С. 96–103.
3. *Задериголова М.М.* Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 319 с.
4. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н.* Электро-резонансное зондирование и его использование для решения задач экологии и инженерной геологии // Геол. журн. – 2003. – № 4. – С. 24–28.
5. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Пищаный Ю.М.* Геофизические исследования качества закрепления грунта на строящемся участке метрополитена в г. Киеве // Геоинформатика. – 2005. – № 2. – С. 49–52.
6. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Пищаный Ю.М.* Геофизические исследования гидрогеологических условий и качества закрепления грунтов в районе прокладки туннеля метро между станциями Харьковская – Бориспольская // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Киев, 2007. – С. 107–112.
7. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Пищаный Ю.М.* Установление причин разрушения фундамента здания с помощью геофизических методов // Там же. – С. 118–123.
8. *Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагин И.Н., Пищаный Ю.М.* Оперативний моніторинг інженерно-геологічних умов на ділянках метрополітену приповерхневого залягання // Геоінформатика. – 2007. – № 3. – С. 27–33.
9. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др.* Геофизические исследования структуры кристаллического массива при строительстве опор моста // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Киев, 2008. – С. 322–329.
10. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др.* Комплексные геофизические исследования при строительстве автомобильных дорог // Там же. – С. 330–335.
11. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др.* Оперативное обследование и мониторинг участков развития карстовых процессов геофизическими методами // Геоинформатика. – 2008. – № 4. – С. 63–68.
12. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Сиднюк Б.Б.* Практический опыт оперативного обнаружения, картирования и мониторинга техногенной “залежи” газа геоэлектрическими методами // Там же. – 2009. – № 1. – С. 23–33.
13. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др.* Оперативное обнаружение и картирование водоносных горизонтов и подземных водных потоков геоэлектрическими методами // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Киев, 2009. – С. 138–148.
14. *Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. и др.* Оперативные геофизические изыскания при ремонте разрушенных мостов и дорог // Там же. – С. 247–259.
15. *Павлов А.Т., Лепешкин В.П., Павлова Ю.Н.* Возможности и особенности импульсных индуктивных ЭМ зондирований ВЧР в сложных геологических условиях // Физика Земли. – 2007. – № 3. – С. 65–73.
16. *Слепак З.М.* Геофизика для города. – Тверь: ГЕРС, 2007. – 240 с.
17. *Шуман В.Н., Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н.* Радиоволновые зондирующие системы: элементы теории, состояние и перспектива // Геоинформатика. – 2008. – № 2. – С. 22–50.
18. *Auken E., Pellerin L., Christensen N.B., Sorensen K.I.* A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods // Geophysics. – 2006. – 71. – P. G249–G260.
19. *Vokovoy V.P., Levashov S.P., Yakymchuk M.A. et al.* Mudslide area and moistening zones mapping with geophysical methods on the slope of the Dniper river in Kyiv // 65nd EAGE conf. and Exhibition: Extended Abstr., P208. – Stavanger, Norway, 2003. – 4 p.
20. *Levashov S.P., Yakymchuk M.A., Korchagin I.N. et al.* Electric-resonance sounding method and its application for the ecological, geological-geophysical and engineering-geological investigations // 66nd EAGE conf. and Exhibition: Extended Abstr. P035. – Paris, France, 2004. – 4 p.
21. *Levashov S.P., Yakymchuk M.A., Korchagin I.N., Pyschaniy Ju.M.* Express-technology of geoelectric and seismic-acoustic investigations in ecology, geophysics and civil engineering. Near Surface 2005 – 11th Europ. meeting of Environmental and Engineering Geophysics: Extended Abstr. P046. – Palermo, Italy, 2005. – 4 p.
22. *Levashov S.P., Yakymchuk M.A., Korchagin I.N. et al.* Geophysical Investigations of Soil Stabilization Quality on the Metro Unit underground Construction in Kyiv // Ibid.: Extended Abstr. P016. – 4 p.
23. *Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. et al.* Geophysical investigations within the cave field of the Kyiv–Pechersk Lavra // 68nd EAGE conf. and Exhibition: Extended Abstr. P223. – Vienna, Austria, 2006. – 4 p.

24. *Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., Prilukov V.V.* Monitoring of engineering-geological conditions along area of the surface bedding underground // 70nd EAGE conf. and Exhibition: Extended Abstr. P098. – Rome, Italy, 2008. – 4 p.
25. *Meju M.A.* Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges // *Surveys in Geophysics.* – 2002. – **23.** – P. 133–205.
26. *Pellerin L.* Applications of Electrical and Electromagnetic Methods for Environmental and Geotechnical Investigations // *Surveys in Geophysics.* – 2002. – **23.** – P. 101–132.
27. *Sheard S.N., Ritchie T.J., Christopherson K.R., Brand E.* Mining, environmental, petroleum, and engineering industry applications of electromagnetic techniques in geophysics // *Ibid.* – 2005. – **26.** – P. 653–669. – Springer 2005. DOI 10.1007/s10712-005-1760-0/.
28. *Tezkan B.* A review of environmental quasi-stationary electromagnetic techniques // *Ibid.* – 1999. – **20.** – P. 279–308.

Надійшла до редакції 23.02.2009 р.

С.П. Левашов, Н.А. Якимчук, И.Н. Корчагин, Ю.М. Пищаний

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЕРАТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УЧАСТКАХ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАЛЕГАНИЯ

Приведены результаты практического применения комплекса геоэлектрических методов становления короткоимпульсного электромагнитного поля и вертикального электрорезонансного зондирования, а также сейсмоакустического и георадарного зондирования на участках сооружения новых станций Киевского метрополитена. Показано негативное (разрушающее) воздействие подземных вод на объекты строящейся транспортной инфраструктуры и расположенные вблизи здания и сооружения. Сделан вывод о том, что при проведении проектных работ под строительство зданий, промышленных сооружений и объектов транспортной инфраструктуры необходимо обязательно учитывать влияние подземных водных потоков. Их недоучет приводит к существенным потерям времени и финансовых ресурсов. Обнаружение и картирование водных потоков и участков повышенного увлажнения грунтов могут оперативно осуществляться комплексом используемых геофизических методов. Этот комплекс можно также применять для решения специфических инженерно-геологических задач при строительстве новых линий метрополитена приповерхностного залегания, а также для регулярного мониторинга инженерно-геологического состояния среды в районах уже действующих линий.

С.П. Левашов, М.А. Якимчук, І.М. Корчагін, Ю.М. Піщаний

ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПЕРАТИВНИХ ГЕОФІЗИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ НА ДІЛЯНКАХ МЕТРОПОЛІТЕНУ ПРИПОВЕРХНЕВОГО ЗАЛЯГАННЯ

Наведено результати практичного застосування комплексу геоелектричних методів становлення короткоімпульсного електромагнітного поля, вертикального електрорезонансного зондування, а також сейсмоакустичного та георадарного зондувань на ділянках спорудження нових станцій Київського метрополітену. Показано негативний (руйнівний) вплив підземних вод на об'єкти транспортної інфраструктури, що споруджується, та розташовані поблизу будинки і споруди. Зроблено висновок про те, що для проведення проектних робіт під будівництво будинків, промислових споруд та об'єктів транспортної інфраструктури необхідно обов'язково враховувати дію підземних водних потоків. Їх неврахування призводить до істотних витрат часу та фінансових ресурсів. Виявлення та картування водних потоків і ділянок підвищеного зволоження ґрунтів можна оперативно здійснювати за комплексом зазначених геофізичних методів. Цей самий комплекс може також застосовуватись для вирішення специфічних інженерно-геологічних завдань під час будівництва нових ліній метрополітену приповерхневого залягання, а також для регулярного моніторингу інженерно-геологічного стану середовища у районах вже діючих ліній.