

ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТРУЗИВНЫХ МАССИВОВ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ВЫСОТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

© 2009 г. А. В. Скалин

ООО “Научно-производственное объединение Уралгеоэкология”

Поступила в редакцию 30.08.2008 г.

Предлагается методика гидрогеомеханических исследований структуры интрузивных массивов вблизи долин рек в условиях техногенного загрязнения мегаполисов при обосновании высотного строительства. Рассматривается геофильтрационная анизотропия тектонически нарушенных интрузивных массивов для дренажа глубоких строительных котлованов под многоуровневые подземные паркинги.

ВВЕДЕНИЕ

Геофильтрационная структура интрузивных массивов определяется развитием зон региональной и тектонической трещиноватости. Сочетание слабоводоносных зон региональной трещиноватости с локальными водоносными зонами тектонической трещиноватости привело к формированию представлений о корово-блоковой структуре интрузивных массивов.

Идею об использовании подземных вод в качестве универсального индикатора геомеханики скальных массивов одним из первых предложил В.А. Мироненко [4], введя понятие “гидрогеомеханики”.

Опыт геомеханических исследований скальных массивов при решении вопросов устойчивости горных выработок накоплен на Среднем Урале. Как отмечает С.Н. Тагильцев [7], напряженное состояние земной коры формирует в скальных массивах иерархический ряд активных тектонических образований, определяющих гидрогеомеханические свойства и геофильтрационную структуру геологической среды.

В настоящей работе предпринята попытка показать эффективность методики гидрогеомеханических исследований на примере Шувакишского габбрового массива на Среднем Урале. На участке этого габбрового массива вблизи Городского пруда на р. Исеть (г. Екатеринбург) проектируется деловой центр “Екатеринбург – Сити” (ДЦЕС), который включает три башни по 50 этажей (“Исеть”, “Татищев”, “Де Генин”) и одну – 80-этажную (“Урал”). Под ДЦЕС проектируется здание 4-х уровневое подземного паркинга на общей фундаментной плите с глубиной заложения около 20 м (ниже уреза Городского пруда). Для проектирования ДЦЕС, относимого к уникальным объектам, привлечен международный состав участников.

В ходе инженерных изысканий на разных стадиях уточнялись представления о геомеханической структуре Шувакишского габбрового массива.

При инженерных изысканиях на стадии “проект” в качестве рабочей была принята модель интрузивного массива без тектонических нарушений. Как известно, такая простая модель предполагает типовой состав инженерных изысканий, регламентированных СП 11-105-97.

При инженерных изысканиях на стадии “рабочей документации”, выполнявшихся под руководством автора, была принята в качестве эвристической модель габбрового массива с локальным тектоническим нарушением, простирающимся до Городского пруда. Для изучения геофильтрационной анизотропии массива и петрофизических свойств грунтов тектонической зоны дробления были пробурены 49 скважин глубиной до 40 м, оборудованные однотипно как гидрогеологические пьезометры. В них выполнен комплекс каротажных исследований и произведена опытная групповая откачка из водоносной зоны тектонического нарушения с дебитом 950 м³/сут.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ НАРУШЕННОСТЬ ИНТРУЗИВНЫХ МАССИВОВ СРЕДНЕГО УРАЛА

Современные представления об особенностях глубинного строения Урала базируются на интерпретации сейсмопрофилей URSEIS-95 и ESRU-93-98, один из которых проходит через Уральскую сверхглубокую скважину SG-4 [6].

Исследуемый участок Шувакишского габбрового массива находится вблизи Верх-Исетского тектонического разлома, разделяющего два крупных сегмента земной коры: Верхисетско-Туринскую и Медведевско-Арамилскую зоны.

Верх-Исетский разлом – разрывное нарушение лево-сдвигового характера большой амплитуды. Его протяженность около 500 км, что определяет широкое распространение и высокую интенсивность деформаций пород, прилегающих к зоне разлома. По данным региональных геологических исследований, ширина полосы пород, подвергшихся дислокационному метаморфизму в зоне этого разлома, достигает сотен метров. Образование разрывных нарушений подобного типа большинство исследователей в настоящее время связывает с тектоническими движениями на границе палеозоя и мезозоя [6]. К Верх-Исетскому тектоническому разлому приурочена долина р. Исеть. Шувакишский массив сложен преимущественно пироксеновыми и амфиболовыми габбро, которые в зоне тектонического нарушения подверглись катаклазу и милонитизации. Трещины растяжения к настоящему времени полностью залечены жилами и дайками разных пород (аплиты, гранит-порфиры и пр). В соответствии с установленными региональными тектоническими схемами структур Урала можно сделать вывод, что тектоническое нарушение в габбровом массиве следует отнести к вторичным локальным раздвигам вблизи Верх-Исетского главного разлома. Известно, что основная форма тектонических локальных раздвигов – клиновидная. Как отмечает К.П. Плюснин [5], основную роль в образовании этих трещин играли вертикальные сбросовые перемещения по поверхностям естественного откоса, т.е. под крутым (до 80°) углом к линии горизонта. Весьма показательным сопоставлением геологического строения на разных сторонах Верх-Исетского сдвига. Так, в створе ДЦЭС на правом берегу Городского пруда находится габбровый массив, а на левом берегу залегают осадочные породы. Например, на левом берегу при изысканиях под станцию метро “Динамо” вскрыты мраморизованные известняки.

Для изучения генетической природы разрывных нарушений применяются статистические методы анализа большого количества замеров элементов залегания трещин сместителей и направлений штриховок на них [5]. Более 200 измерений простирания и падения трещиноватости пород Шувакишского массива в обнажениях строительных котлованов вокруг площадки проектируемого ДЦЭС показали, что азимут простирания трещиноватости близок к субмеридиальному. Преобладают трещины с простиранием около 10° и углом падения на восток около 70°. Ширина трещин изменяется от первых миллиметров до 2 см; трещины заполнены выветрелыми ожелезненными породами, в редких случаях кварцем; поверхность стенок гладкая, иногда со следами скольжения. Породы дайкового комплекса залегают согласно рассланцованности, имеют азимут

простирания также около 10° и угол падения на восток около 70°.

К тектоническим трещинам растяжения, трасируемым дайками жильных пород, приурочены водоносные зоны трещинно-жильных подземных вод. К поисковым признакам водоносных зон в габбровых и гранитных массивах можно отнести обнаружение жильных разновидностей более молодого возраста – аплитов, пегматитов, гранит-порфиров, альбитофиров и др. Они богаче гранитов и габбро кварцем, поэтому более хрупки. При развитии давления в интрузивных массивах жильные граниты более подвержены дроблению и становятся водопроницаемыми. Обычно жильные граниты залегают круто. Определение угла наклона дайки дает возможность наметить место заложения скважины с таким расчетом, чтобы пересечь водоносную зону на глубине не менее 50–70 м. При этом будут обеспечены: большой водосбор, более устойчивый, не зависящий от сезонов дебит скважины, большее постоянство химического состава и температуры воды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Гидрогеомеханические исследования структуры габбрового массива

В качестве самого простого теста оценки геофильтрационной анизотропии габбрового массива может служить определение величины среднеквадратичного отклонения логарифма водопроницаемости, определенной по данным опытных откачек из однотипно оборудованных 49 скважин (рис. 1). В соответствии с известными критериями, предложенными Б.В. Боревским и Л.С. Язвиным [1], в весьма неоднородных пластах удельные дебиты скважин различаются более чем в 10 раз, а среднеквадратичное отклонение логарифма водопроницаемости составляет 0.4. На основе параметрической оценки геофильтрационного поля на исследуемом участке габбрового массива можно выделить два слабопроницаемых блока, между ними проходит водоносная зона субмеридионального простирания – естественная подземная дрена.

Для уточнения параметров и простирания водоносной зоны на изучаемом участке габбрового массива в зимнюю межень 2008 г. проведена опытная кустовая групповая откачка одновременно из трех центральных скважин 18б, 01в и 020в (см. рис. 1) с суммарным дебитом 950 м³/сут. В результате такого “просвечивания” габбрового массива гидравлическим возмущением было подтверждено субмеридиональное простирание водоносной зоны тектонической милонитизации, а также практически пренебрежимо малые понижения в слабопроницаемых блоках региональной трещиноватости. Схема гидроизогипис

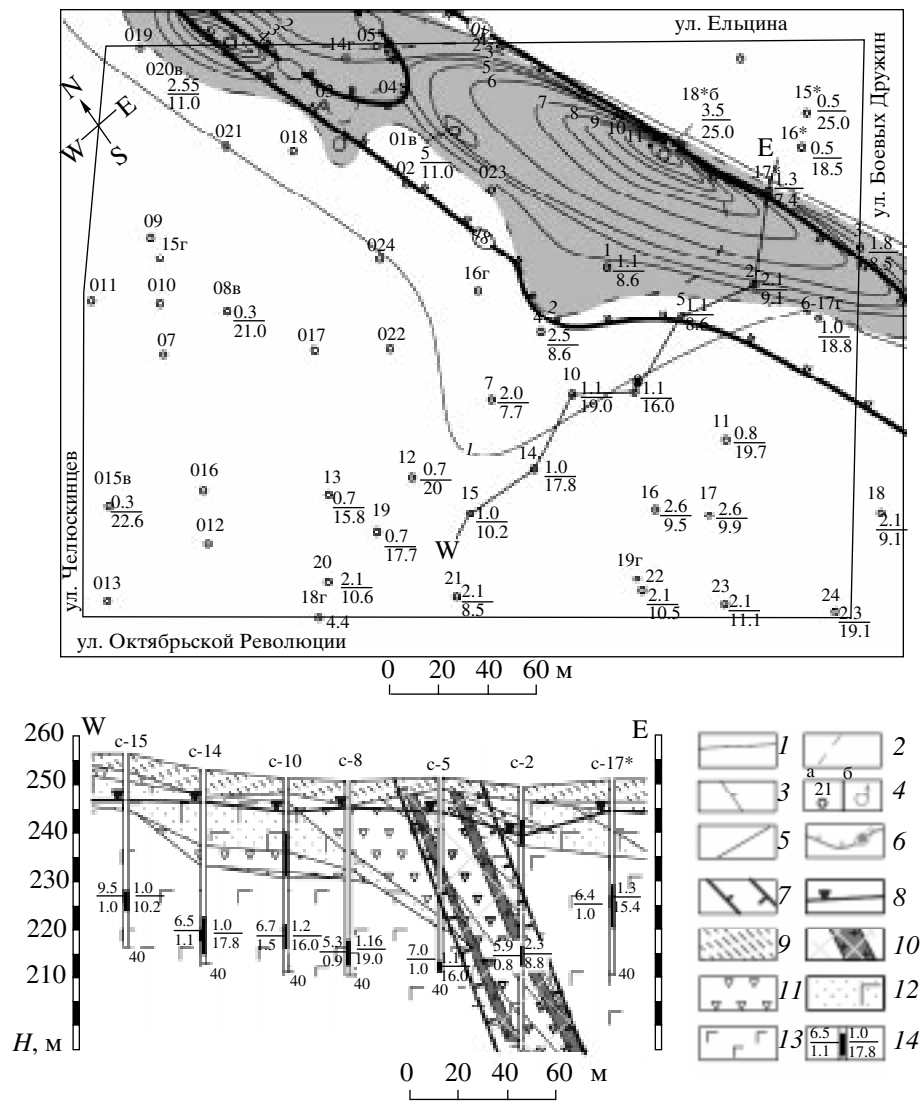


Рис. 1. Схема гидроизогипс воронки депрессии и гидрогеологический разрез вкост водоносной зоны тектонической трещиноватости габбрового массива: 1 – гидроизогипс воронки депрессии при кустовой откачке $950 \text{ м}^3/\text{сут}$; 2 – граница зоны с температурой подземных вод $t > 15^\circ\text{C}$; 3 – граница проектируемого котлована; 4 а – скважина, ее порядковый номер по первоисточнику; справа псевдодробь: в числителе дебит ($\text{дм}^3/\text{с}$), в знаменателе понижение (м); 4 б – место “налива” горячих вод из теплотрассы; 5 – линия разреза; 6 – изолиния кровли скальных грунтов по данным электрокаротажа ($\rho_k > 1000 \text{ Ом м}$); 7 – граница водоносной зоны тектонической трещиноватости; 8 – начальный уровень подземных вод; 9 – грунты зоны аэрации: насыпной грунт, суглинки делювиальные и элювиальные; 10 – жильные породы: дайки гранит-порфиров, кварца; 11 – зона милонитизации: дресвяно-щебенистые грунты, рухляки; 12 – габбро, сланцы, амфиболиты выветрелые малопрочные трещиноватые; 13 – габбро, сланцы, амфиболиты слабыветрелые; 14 – скважина; сверху – номер по первоисточнику; закрашено внутри – интервал водопоглощения при расходомерии (с наливом); справа псевдодробь: в числителе дебит ($\text{дм}^3/\text{с}$), при опытной откачке; в знаменателе – понижение (м); слева псевдодробь: в числителе – уровень подземных вод, в знаменателе – минерализация подземных вод, ($\text{г}/\text{дм}^3$).

воронки депрессии подземных вод при опытной кустовой групповой откачке хорошо коррелируется со схемой глубин кровли скальных пород (геоэлектрическое поле с удельным электрическим сопротивлением $\rho_k > 1000 \text{ Ом м}$). Глубина тектонического нарушения габбрового массива увеличивается в субмеридиональном направлении к Верх-Исетскому тектоническому разлому от 40 м до 60 м и более.

Исследованию взаимосвязи речных вод Городского пруда и трещинно-жильных подземных вод, приуроченных к зоне повышенной трещиноватости габбрового массива, помог необычный миграционный эксперимент. Из-за несогласованности действий коммунальных служб” производился многомесячный “налив” горячих вод из теплотрассы в количестве около $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ в упомянутую зону трещиноватости. В результате одновременных замеров температуры подземных вод

Сравнительные физико-механические и петрофизические характеристики грунтов на площадке проектируемого строительства ДЦ «Екатеринбург-Сити»

Наименование грунтов	Плотность, δ_o , г/см ³	Предел прочности на одноосное сжатие $\delta_{сж}$, МПа	Коэффициент фильтрации K , м/сут	Кажущееся геоэлектрическое сопротивление ρ_k , Ом м	Скорость продольной волны V_p , км/с	Радиоактивность, мкЗв/ч
Грунты зоны аэрации: насыпной грунт, суглинок делювиальный, суглинок элювиальный	2.0–2.1	–	0.1	200	2.4	до $15–18 \times 10^{-2}$ в навалах щебня ($t_{Q_{IV}}$), глинистом элювии при общем наследовании свойств материнских пород
Дресвяно-щебенистые грунты, рухляки	2.2–2.6	≤ 5	1–5	<200	3.0	$2–6 \times 10^{-2}$
Жильные грунты водоносных зон: дайки гранит-порфиров, жилы кварца	2.6	50	10–20	2000–3000	>3.5	$7–19.7 \times 10^{-2}$
Габбро, сланцы, амфиболиты малопрочные, трещиноватые	2.6–2.8	5–15	0.1–1	200–800	3.0–3.5	$2–6 \times 10^{-2}$
Габбро, сланцы, амфиболиты средней прочности, слаботрещиноватые	2.8–3.2	20	0.1	≥ 1000	3.5	$2–6 \times 10^{-2}$

в скважинах-пьезометрах был установлен ореол теплых подземных вод с температурой более 15°C (при фоновой 7°C) размерами около 60 × 300 м² (см. рис. 1). По данным термометрии, в скважине 01в зафиксирована максимальная температура 24.5°C на глубине 30.5м. При разгрузке теплых подземных вод водоносной зоны тектонической нарушенности габбрового массива в Городской пруд, в конце зимней межени 2008 г., на льду р. Исеть образовалась полынья. Это явление можно рассматривать как важное свидетельство активной взаимосвязи подземных и речных вод.

Для подтверждения угла падения зоны дробления (около 70°), к которой в свою очередь приурочена водоносная зона, было решено выполнить поинтервальные откачки по мере углубления скважины 18 (см. рис. 1). При глубине скважины 40 м дебит откачки составлял 1.4 дм³/с при понижении уровня на 15.3 м, а после вскрытия тектонической зоны дробления на глубине 50 м дебит увеличился до 3.5 дм³/с при понижении уровня 25 м. В настоящее время скважина 18 используется по лицензии на недропользование для технического водоснабжения бетонного завода ДЦЕС.

Таким образом, гидрогеомеханические исследования габбрового массива позволили установить геометрические размеры тектонической приразломной клиновидной структуры: ее ширина на урезе Городского пруда около 65 м, а на южной части площадки проектируемого ДЦЕС – около 30 м; простирание – субмеридиональное, а падение – восточное под углом около 70°. Водопроницаемость водоносной зоны тектонического нарушения достигает 100 м²/сут, а в слабодопроницаемых блоках на один-два порядка меньше (таблица).

Исследование петрофизических свойств тектонически нарушенного габбрового массива

В условиях техногенного химического и теплового загрязнения геологической среды в мегаполисах при обосновании высотного строительства отдается предпочтение скважинным методам геофизики по сравнению с наземными. Как известно, в таких условиях интерпретация результатов наземных геофизических методов затруднена из-за большого числа переменных. И.Г.Миндель и др. [3], обобщая опыт применения геофизических методов при инженерно-геологи-

ческом и геотехническом обосновании высотного строительства в Москве, также отмечают, что в условиях плотной застройки приоритет принадлежит скважинным методам. Применительно к изучаемой площадке проектируемого ДЦЭС в результате проведения инженерно-экологических изысканий были обнаружены линзы минерализованных до 4 г/дм^3 подземных вод под техногенными грунтами – своеобразные водные вытяжки из обломочных грунтов зоны аэрации, формирующиеся при инфильтрации талых и дождевых вод (при естественной фоновой минерализации подземных вод около 0.4 г/дм^3). Кроме того, было закартировано тепловое загрязнение подземных вод вследствие утечки горячих вод из теплотрассы (см. рис. 1). Известно, что при проведении наземных сейсмометрических работ нужно учитывать следующее обстоятельство: скорость продольных волн увеличивается с ростом минерализации и повышением температуры [2]. При производстве площадных электрометрических работ также следует иметь в виду, что на удельное электрическое сопротивление водонасыщенных пород определяющее влияние оказывает минерализация подземных вод.

Данные каротажных методов исследований тектонической трещиноватости габбрового массива представлены в таблице. По результатам каротажа водопроницаемые интервалы ($K > 1 \text{ м/сут}$) приурочены к трещинно-жильным коллекторам в дайках хрупких жильных пород мощностью $0.1\text{--}1 \text{ м}$, которые по акустическому каротажу диагностируются высокими скоростями продольных волн; по гамма-каротажу – увеличением гамма-фона примерно в 3 раза; по электрокаротажу – увеличением почти на порядок кажущегося геоэлектрического сопротивления; по расходомерии при наливе – интервалом водопоглощения.

В северной части площадки проектируемого ДЦЭС под 80-этажной башней “Урал” была выполнена сейсмотомография, когда геологическая среда “просвечивалась” сейсмическими лучами путем возбуждения упругих колебаний в одной скважине и приеме их в другой (см. таблицу). В качестве источника возбуждения упругих волн использовался невзрывной электрогидравлический источник сейсмических волн “Искра 20/70”. Сейсмотомография подтвердила вывод, сделанный по результатам гидрогеомеханических исследований, о наличии тектонического нарушения восточного падения (рис. 2).

В южной части площадки проектируемого ДЦЭС простирание и падение зоны тектонического нарушения наглядно (рис. 3) можно проследить при сопоставлении послойных схем-срезом кажущихся геоэлектрических сопротивлений, построенных по данным электрокаротажа (см. таблицу).

Анализ результатов применения комплексных геофизических исследований скважин позволяет сделать вывод о целесообразности перемещения примерно на $20\text{--}30 \text{ м}$ проектируемой башни “Урал” за пределы зоны тектонического нарушения, которая к тому же характеризуется несколько повышенным гамма-фоном, хотя он и меньше предельно допустимого.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

После проведения инженерных изысканий на площадке проектируемого ДЦЭС возникла дискуссия, какую модель принять за расчетную при проектировании – с учетом или без тектонической трещиноватости габбрового массива.

Упрощенная модель габбрового массива без учета выявленной тектонически нарушенной зоны пока рассматривается международной проектирующей организацией в качестве главной. Эта модель предполагает наличие только слабОВОдопроницаемой коры выветривания габбрового массива, поэтому проектируется только гидроизоляция стенок подземного паркинга без устройства дренажа в период эксплуатации ДЦЭС. Главный аргумент сторонников “ванны” и противников дренажа в период эксплуатации ДЦЭС – предположение о возможности компрессии осушенных грунтов под соседними зданиями, которая может вызвать их деформацию. К минусам предлагаемого проектного решения следует отнести его высокую стоимость, сложность в исполнении и высокие риски при эксплуатации.

По мнению автора, модель участка Шuvaкишского габбрового массива, принятая с учетом тектонического оперяющего нарушения от Верх-Исетского разлома, к которому приурочена долина р. Исеть, более адекватна. Приразломная зона повышенной трещиноватости имеет клиновидную форму в плане. У уреза Городского пруда ее ширина составляет около 65 м , в южной части площадки застройки – уже около 35 м . К оперяющей тектонической структуре приурочена локальная водоносная зона трещинно-жильных подземных вод, в которой можно соорудить инфильтрационный водозабор для защиты проектируемого глубокого котлована от поступления речных вод. Сооружение комбинированного дренажа и его эксплуатация в период функционирования ДЦЭС позволят увеличить безопасность и получить экономический эффект от использования подземных вод инфильтрационного водозабора для технического водоснабжения. Таким образом, выбор той или иной инженерно-геологической модели Шuvaкишского габбрового массива при проектировании ДЦЭС будет влиять не только на стоимость строительства, но и на безопасность его эксплуатации.

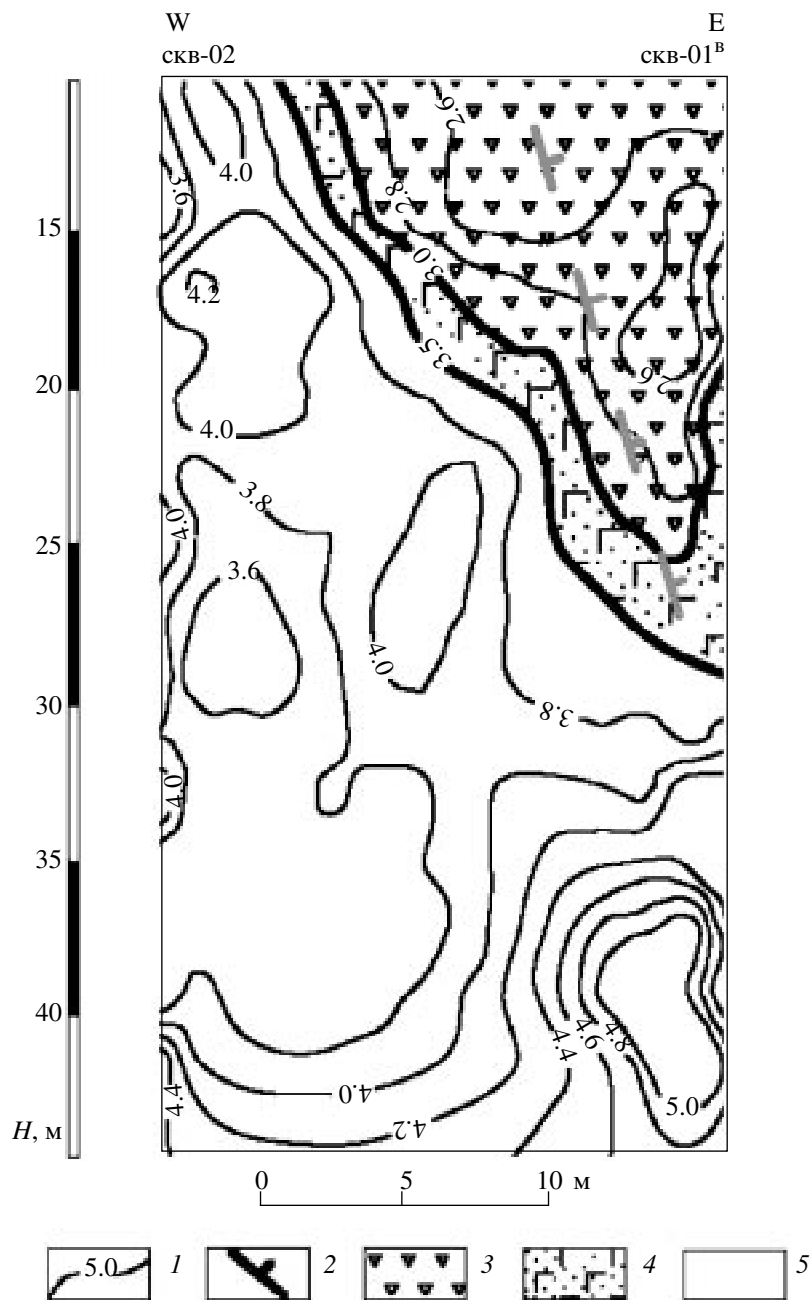


Рис. 2. Сейсмотограмма в изолиниях скорости распространения продольных волн (V_p , км/с) в габбровом массиве под башней “Урал”: 1 – изолиния скорости продольной волны, V_p , км/с; 2 – предполагаемая осевая линия тектонического нарушения с падением на восток; зона: 3 – древесно-щебенистых грунтов с падением на восток ($V_p < 3.0$ км/с), 4 – малопрочных трещиноватых габбро, сланцев, амфиболитов ($3.0 < V_p < 3.5$ км/с), 5 – слаботрещиноватых средней прочности габбро, сланцев, амфиболитов ($V_p > 3.5$ км/с).

ВЫВОДЫ

1. При инженерно-геологическом обосновании высотного строительства над интрузивными массивами в долинах рек целесообразно учитывать потенциальную возможность обнаружения оперяющих тектонических нарушений и приуроченных к ним водоносных зон трещинно-жильных подземных вод. Гидрогеомеханические ис-

следования в комплексе с каротажем однотипно оборудованных скважин позволяют достоверно определять тектоническую трещиноватость интрузивных массивов.

2. Верх-Исетский тектонический разлом образовался, по-видимому, в позднем палеозое и нет сейсмологических свидетельств, указывающих на его потенциальную активность. При проектиро-

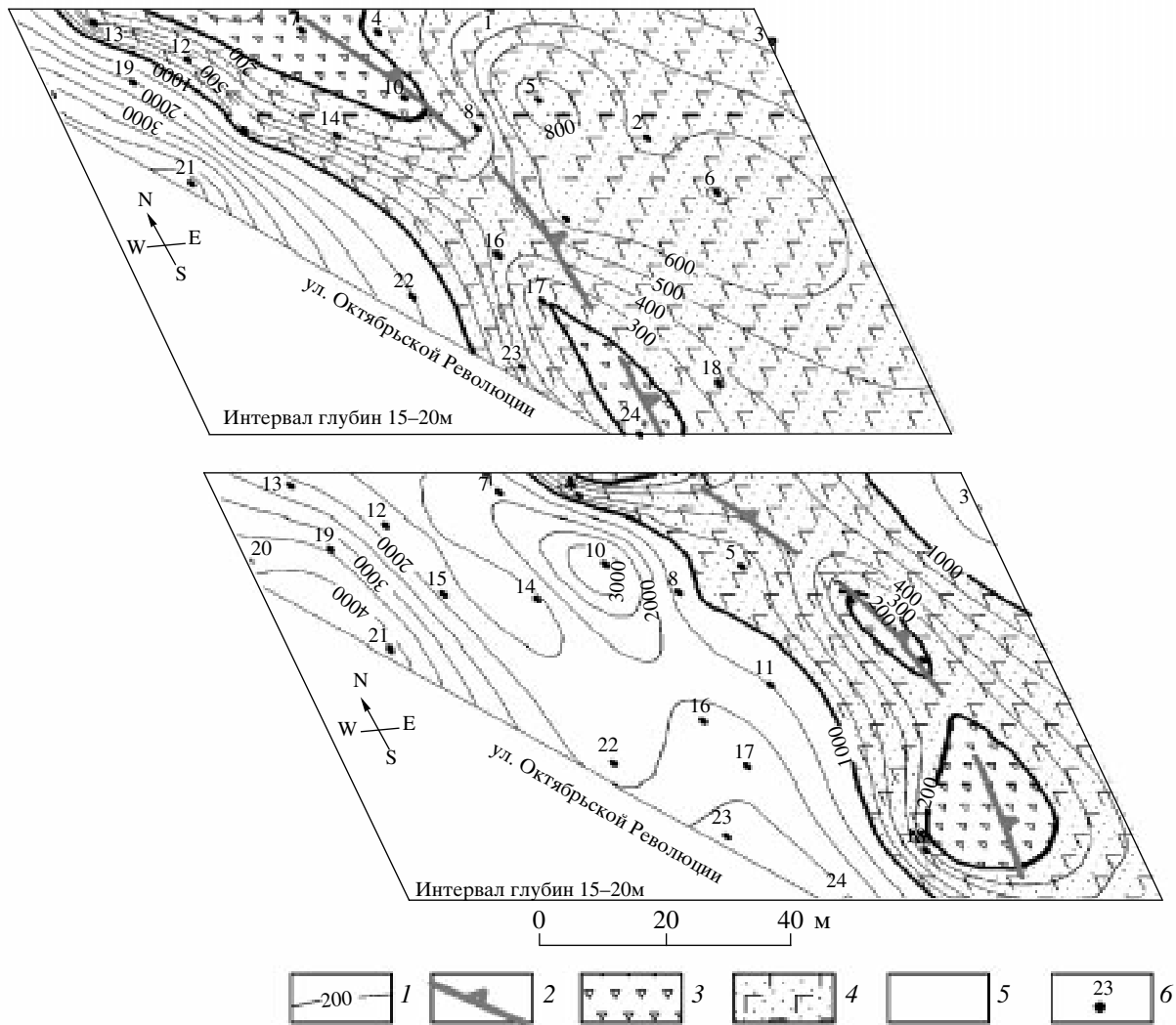


Рис. 3. Геоэлектрические полойные схемы – срезы в изолиниях кажущихся электросопротивлений ρ_k (Ом м) по данным электрокаротажа (КС) для глубин 15–20 м и 35–40 м габбрового массива в южной части площадки ДЦ “Екатеринбург-Сити”: 1 – изолиния кажущегося электрического сопротивления пород (ρ_k , Ом м), измеренного кровельным градиент зондом N0.1M0.95; 2 – предполагаемая осевая линия тектонического нарушения с падением на восток; зона: 3 – древесно-щебенчатых грунтов тектонического нарушения с падением на восток ($\rho_k < 200$ Ом м); 4 – малопрочных трещиноватых габбро, сланцев, амфиболитов ($200 < \rho_k < 1000$ Ом м); 5 – слаботрециноватых средней прочности габбро, сланцев, амфиболитов ($1000 < \rho_k < 5000$ Ом м); 6 – скважина, ее порядковый номер по первоисточнику.

вании ДЦЭС и размещении высотной башни “Урал” целесообразно учитывать геометрию тектонической оперяющей структуры Верх-Исетского разлома, а также физико-механические свойства заполнителя. В условиях тектонической нарушенности Шувакишского габбрового массива проектируемый вариант “ванны” без устройства дренажных систем имеет высокую стоимость и содержит в себе неоправданные риски.

3. Для защиты проектируемого глубокого строительного котлована от поступления речных вод можно соорудить инфильтрационный водоза-

бор в водоносной зоне трещинно-жильных подземных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровский Б.В., Хордикайнен М.А., Язвин Л.С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М.: Недра, 1976. С. 247.
2. Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных. М.: Изд-во АИС 2005. 392 с.

3. Миндель И.Г., Севостьянов В.В., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А. Геофизические методы при инженерно-геологическом и геотехническом обосновании высотного строительства в Москве // Развитие городов и геотехническое строительство. Тр. междунар. конф. по геотехнике / Под ред. В.М.Улицкого. СПб.: Изд-во НПО "Геореконструкция-Фундаментпроект", 2008. Т. 3. С. 325–330.
4. МIRONENKO В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГГУ, 2001. 519 с.
5. Плюснин К.П. Методика изучения тектонических структур складчатых поясов (на примере Урала). Пермь : Изд-во ПГУ, 1971. 217 с.
6. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.
7. Тагильцев С.Н. Основы гидрогеомеханического анализа фильтрационной структуры скальных массивов: // Автореф. Дис. ... докт. техн. наук, Екатеринбург: Уральская гос. горно-геол. академия, 2001. 41 с.