

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГРУНТЕ ВОЛНОВЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

С. А. ТАТАРКИН – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник отдела геофизики НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», г. Санкт-Петербург. Основные направления исследований: вибрации в грунте и геофизические методы. Автор 50 печатных трудов, 6 изобретений.

А. С. СТУКАЛОВА – аспирантка Балтийского государственного технического университета. Основные направления исследований: разработка программного обеспечения геофизических методов. Имеет 12 печатных трудов.

Приведены экспериментальные данные исследований признаков тектонических явлений в грунте. Исследования проводились волновыми сейсмическими методами с применением вейвлет-анализа при обработке сигнала. Обоснована необходимость учета тектоники при строительстве подземных сооружений и высотных зданий.

ВВЕДЕНИЕ

В геотехнических расчетах для определения прочностных и деформативных характеристик грунта обычно используют традиционные геологические методы. Этим методам присущ ряд недостатков: дискретность скважин по пространству и глубине, использование гипотезы о стационарности процесса (в то время как при недостаточной статистике необходимо использовать критерий Колмогорова для определения нормального закона распределения), неучет при определении механических характеристик по физическим данным степени цементации, окатанности зерен, текстуры и структуры, тонкослоистости и связанной с ней анизотропии и др. В значительной мере это связано с технологическими трудностями отбора проб грунта, несовершенством приборов и технических устройств. Заметим, что в Европе используется более эффективное статическое зондирование с вейвлет-анализом сигналов от геофона на конце зонда и др.

В то же время в природе все процессы нестационарные. В таких условиях существует повышенная опасность воздействия динамических нагрузок на грунты.

Одним из более надежных методов оценки характеристик грунта является использование комплекса информации, полученной с помощью геологических и сейсмоакустических методов.

Применяемые в исследованиях грунта сейсмоакустические методы основаны на модифицированном законе Гука и решении волновых уравнений. Для этого в волновое уравнение введен частотный коэффициент, учитывающий сдвиг по фазе между напряжением и деформацией (т. е. сжимаемость грунта), создаваемой малой силой излучателя, возбуждающего колебания в объеме грунта. Деформация обусловлена известными физическими явлениями: сдвиговой и объемной вязкостью, релаксационными процессами, внутренним и внешним трением частиц, явлением гистерезиса.

Волновые методы, в отличие от лучевых, используют такие известные нелинейные физические явления, как интерференция и дифракция волн, дисперсия скорости звука, эффект самодемодуляции и биения. Наиболее точно измерить эти параметры нестационарных процессов можно с помощью вейвлет-обработки сигналов (сложных и многообразных математических преобразований, позво-

ляющих учесть вид тренда нестационарности для импульсных сигналов).

Эта голографическая обработка позволяет получить объемную картину прочностных характеристик грунта, выявить разломы, определить разрывы литологических слоев, всплески и т. д. Этот вид обработки позволяет до глубины 60...100 м (при малой антенне по длине) определить границы размывов, их склоны, наклоны кровли морены, протерозоя, тонкослоистость и связанную с ней анизотропию, изменение относительных прочностных характеристик по глубине с точностью до 2 м.

Таким образом, с точки зрения описания и измерения нестационарных процессов, эти методы точнее геологических данных, но отсутствие идентификации между ними и геологическими характеристиками грунта не позволяет использовать их для геотехнических расчетов.

Поэтому на данном этапе целесообразно применение совместных комплексных эталонов (сейсмических данных, статического зондирования и геологических данных). Эталоны можно составить для конкретных районов города в зависимости от особенностей геологии. Они позволят в полевых условиях по данным сейсмики оперативно оценить геотехнические характеристики, выявить тренды, определить точки контрольного бурения геологических скважин и статического зондирования.

Рассмотрим характерные примеры такого подхода к решению задачи. Экспериментальные исследования проводились в трех районах города: «Размыв» по ул. Карбышева между станциями метро «Площадь Мужества» и «Лесная» при проходе щита метро и дальнейшей эксплуатации этого участка при движении поездов; дислоцированного кембрия на пл. Конституции (проектирование высотного здания на существующем свайном ростверке) и на территории строящегося Орловского тоннеля (левый берег).

Исследование грунта на участке «Размыв» проводилось после известной аварии в метро и при проходке щита метро при строительстве новой линии. Результаты исследований и мониторинга коллектора, Водоканала и окружающих зданий показали следующее. По многочисленным геологическим данным,

ширина размыва грунта, составляла 700 м; глубина вреза слабых слоев грунта (чаша размыва) – 120 м; угол наклона литологических слоев характеризующий изменение прочностных характеристик замещающих слабых слоев в верхней части вреза – 35°; прочностные характеристики грунта низкие.

Сейсмические характеристики на ограниченном участке в 250 м (между шахтами коллектора) показали существенную нестационарность отражающих слоев по пространству и глубине до 60 м (разрывы слоев, наклоны, отсутствие отражений – слабые места и др.) и соответствовали геологическим данным. Заметим, что превышение сигнала над помехой при отражении от обделки тоннеля метро составляло 10 дБ. По данным геодезического мониторинга, при движении поездов метро (регулярное динамическое воздействие вибраций на грунт) шахта коллектора получила осадки 5 см, а близлежащие здания – 8...9 см.

Аналогичные исследования грунта были проведены на пл. Конституции. Результаты комплексных исследований (геологические данные, СРТ, сейсмика лучевыми и волновыми методами) показали существенный разброс данных (по данным испытаний образцов), что соответствует условиям дислоцированного кембрия. Грунт характеризовался низкими, неравномерными по пространству и глубине прочностными характеристиками. Геотехнические расчеты показали, что при использовании существующего свайного ростверка необходимо уменьшить высоту проектируемого здания. С помощью сейсмоакустических методов с применением вейвлет-анализа были обнаружены подобные геологические явления по пр. Наставников у д. 26, в результате чего произошла авария коллектора Водоканала, и в других местах.

С учетом этих данных были определены признаки ослабления грунта обусловленного тектоникой и других типов нестационарностей и экспериментально проверены на более значительной статистике (на территории, свободной от больших подземных сооружений). Такие изыскания проводились на территории строящегося Орловского туннеля под Невой (левый берег). Наличие нестационарностей фиксировалось по изменению резонансных частот в вейвлет-спектре сигналов и

соответствующему ему наличию склонов слабого грунта, обусловленного замещением твердых пород слабыми на глубинах 30...60 м, неравномерностью (волнистостью) кровли морены и слоев на глубинах 8...45 м, наличием слабых мест (отсутствием отражений на низких частотах) в толще протерозоя. Приведем результаты этих исследований.

Методика и схема измерений:

1. При традиционном сейсмопрофилировании и определении прочностных характеристик грунта лучевыми методами с использованием объемных волн (продольных и поперечных) применялась стандартная сейсмодоска с 12 приемниками. Длина трассы – 1,8 км.

Определялись скорости продольных V_p и поперечных волн V_s . Далее по известным формулам они отождествлялись с прочностными характеристиками грунта, и полученные результаты наносились на соответствующие геолого-литологические разрезы. Глубина проникновения преломленных сейсмических волн по ряду объективных причин (слабый грунт на поверхности и пр.) соответствовала 20...25 м.

2. На этой же территории проводилось сейсмопрофилирование методом суммарных интерференционных (объемных и поверхностных) волн при обработке сигналов вейвлет-анализом. Приемники КД-12 располагались на расстояниях 10, 20, 40, 60, 80, 100 и 120 м. Предварительно измерялись скорости поверхностных волн в зависимости от частоты. В качестве признака поверхностных волн Рэлея и Лява использовалась большая амплитуда импульса, возбуждаемого источником излучения. При разделении волн Рэлея и Лява использовалось наличие (или отсутствие) частотнозависимой дисперсии звука (у волн Лява есть дисперсия, у волн Рэлея – нет).

На рис. 1 приведена дисперсионная кривая скорости звука. Глубина слоя на частотах 15...100 Гц определялась по известной формуле $H = V_r 4/t$, где t – частота дискретной составляющей в спектре отраженного сигнала; V_r – скорость звука; 4 – условие максимума амплитуды при половине длины волны, и двойного пробега волны через слой (известный резонансный метод).

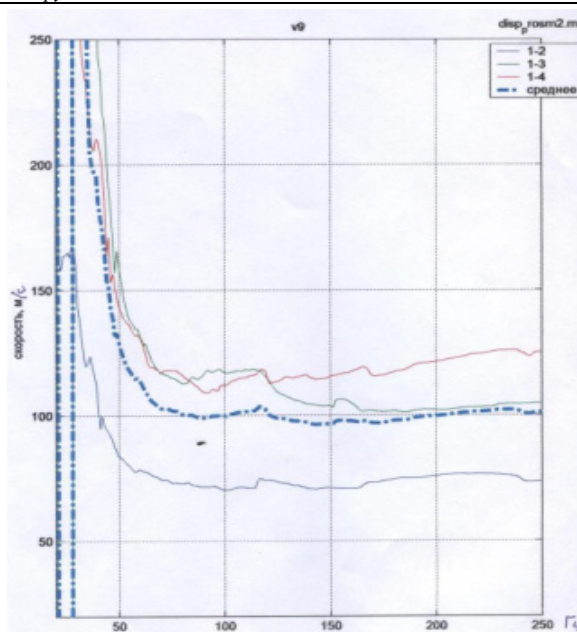


Рис. 1. Дисперсия скорости волн по трассе

Вейвлет-спектры сигналов, изображенные на рисунках, построены в системе координат амплитуда–частота–время. При этом частота соответствует глубине литологических слоев, а амплитуда характеризует прочностные характеристики. Затухание амплитуды во времени до 5 % от максимального значения (декремент затухания) соответствует коэффициенту сцепления и углу внутреннего трения; изменение частоты резонанса (изменение формы импульса) соответствует изменению геометрии литологических слоев (склоны, волнистость и т. д.), либо прочностных характеристик по пространству и глубине. В низкочастотной области (1...10 Гц) амплитудно-фазочастотные характеристики огибающей нестационарного процесса образуют голографические интерференционные (дифракционные) картины в виде фигур Лиссажу (семейство эллипсоидов). Эти картины также дают информацию о геометрических характеристиках слоев или изменении по глубине прочностных характеристик грунта.

Указанные характеристики также сопоставлялись с геологическими данными. Большой эквивалентный радиус отражателя на глубине (большой радиус зоны Френеля), незначительное затухание на низких частотах, высокая помехоустойчивость вейвлет-

обработки позволила достичь глубин 60...100 м.

По результатам измерений сопоставлялись графики дискретных по пространству данных статического зондирования (лобовых сопротивлений СРТ до глубин 30...40 м) со спектральными характеристиками (Фурье) и вейвлет спектрами сигналов по совпадающим трассам (разрезам). На рис. 2 приведен спектр Фурье отраженного сигнала. По СРТ наблюдалось резкое снижение лобовых сопротивлений (до 2-3 мПа) на глубине 22 м, которое соответствует затуханию сигнала на 10 Дб в спектрах. Эти условия соответствуют сильной пространственной нестационарности геологических характеристик. Оценка показывает, что коэффициент корреляции между характеристиками – не менее 0,8.

Первая группа (см. рис. 3) соответствует условиям, где геометрия напластований литологических слоев или их прочностных характеристик соответствует структурным геологическим характеристикам без трендов. Глубины опорных отражающих сейсмических слоев – 17...33 м и 60 м. Это соответствует кровле морены и кровле протерозоя (венда и его слоев).

Вторая группа соответствует условиям наклона литологических слоев (склона при размыве) (рис. 4). Огибающая импульса

изменяет свою частоту во времени и в пространстве. То же самое наблюдается и в модуляционной характеристике, поскольку изменяется толщина слоя.

К третьей группе (см. рис. 5) относятся условия напластований литологических слоев, соответствующих молодой тектонике в чаше размыва–разлома, т. е., по-видимому, наличию палеоречек и ручьев (в том числе с конфигурацией течения по меандру). Эти условия соответствуют волнистости геометрии напластований слоев (или изменений прочностных характеристик по глубине). Здесь глубина составляет 15...40 м. На рисунке видно, что огибающая импульса частотно модулирована, т. е. резонансная частота отражающего слоя, соответствующая кровле морены, изменяется по периодическому закону. То же самое наблюдается в низкочастотной области. Это свидетельствует о том, что кровля морены (либо другие более глубокие ее прослои) изменяет геометрию (либо изменяются прочностные характеристики). Изменение характеристик на 3-4 м и до 8 м на глубинах 40 м.

Согласно графикам на рис. 6, сейсмические характеристики по математическому ожиданию близки к геологическим данным. Дисперсия позволяет уточнить нижний предел прочностных характеристик по пространству.

Анализ вейвлет-спектров по трассам по-

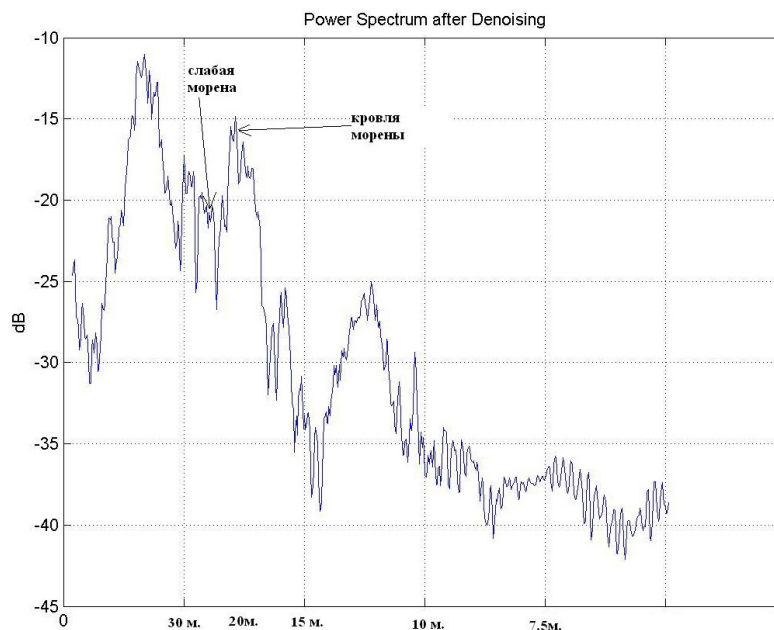


Рис. 2. Спектр отраженного сигнала

зволлил выделить признаки размыва. По этим данным была построена топографическая схема, где были отмечены склоны размыва, ослабленные места в протерозое на глубинах более 100 м. Предварительно по данным геологических изысканий прошлых лет были

получены карты размывов и тектонических разломов разных авторов. Анализ этих данных показал, что наблюдается совпадение сейсмотрасс и зон размыва.

Анализ прочностных характеристик грунтов (по математическому ожиданию) на

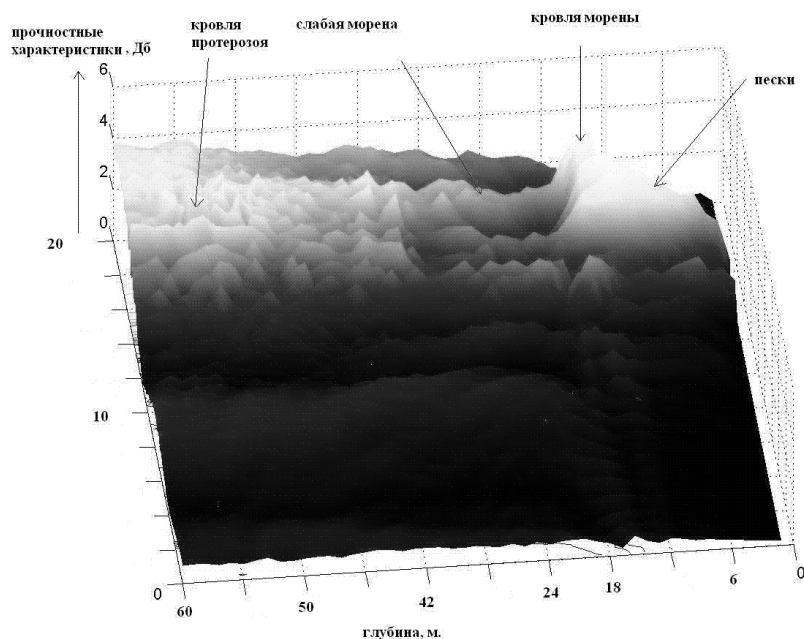


Рис.3. Вейвлет-спектр отраженного сигнала

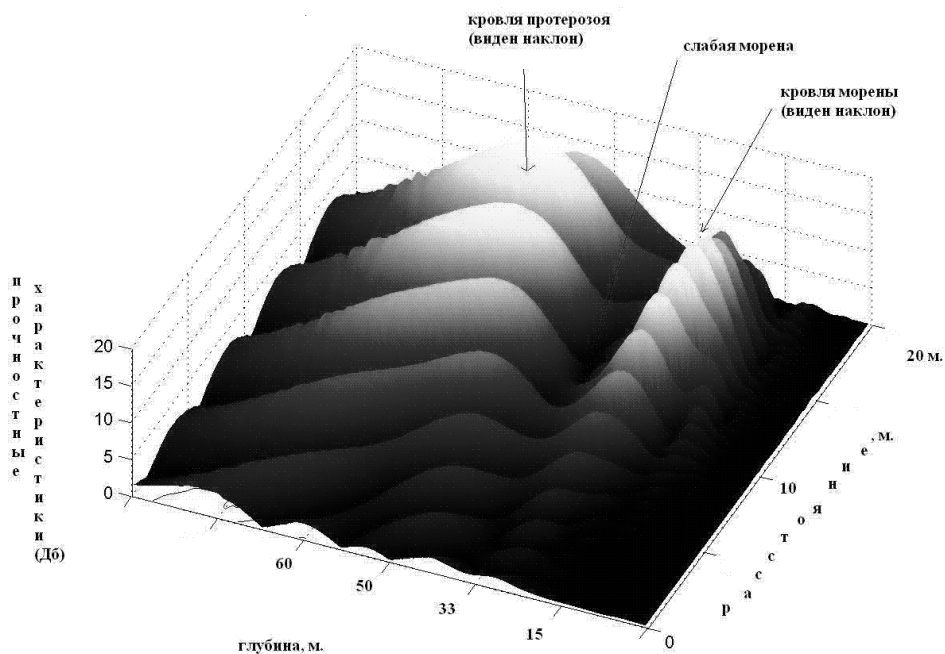


Рис. 4. Вейвлет-спектр отраженного сигнала

территории Орловского тоннеля и сравнение их со среднестатистическими по городу показал, что коэффициент сцепления у них в 3...4 раза, а угол внутреннего трения на 40...50 % меньше, чем у последних.

Таким образом, при определении сейсмических признаков размыва грунта в полевых условиях можно оперативно ориентировочно оценить снижение прочностных характеристик (в %), либо определить их нижний предел на глубинах до 30...60 м и рекомендовать места контрольного бурения геологических скважин. По этим данным был составлен эталон геологических и сейсмических данных в условиях размыва, который можно использовать для предварительных (предпроектных) инженерных изысканий в городе.

ВЫВОДЫ

1. Физически обоснованы и экспериментально выявлены признаки тектонических явлений в грунте с помощью измерений параметров вейвлет-анализа сейсмоакустических сигналов. К ним относятся:

а) изменение резонансной частоты в вейвлет-спектре, что соответствует изменению толщи морены; наличие склона в морене и протерозое (угол наклона 30...35°) на глубинах 30...60 м;

б) изменение резонансной частоты, соответствующей кровле морены и прослойкам в ее толще по синусоидному закону (волнистость), что соответствует условиям молодой тектоники;

в) отсутствие отражений на низкой частоте, т. е. сильное затухание энергии на глубине более 100 м (в чаше размыва, где твердые породы залегают на большей глубине).

2. Эти признаки подтверждены геологическими данными и представительной статистикой по изысканиям на территории тоннеля (50 скважин и 25 точек СРТ). Наибольшая корреляция (около 0,8) наблюдается у сейсмических данных с данными статического зондирования. Сравнительный анализ прочностных характеристик (по математическому ожиданию) грунта на территории тоннеля со среднестатистическими данными по городу показал, что в условиях размыва сцепление меньше в 3-4 раза, а угол внутреннего трения на 40...50 % меньше среднестатистических.

3. Приведенные сейсмические характеристики позволяют уточнить разделение литологических слоев по пространству и глубине, использовать относительные прочностные характеристики в слоях грунта для дисперсии оценки прочностных характеристик слоев (для большей надежности необходимо их использовать совместно с геологическими данными).

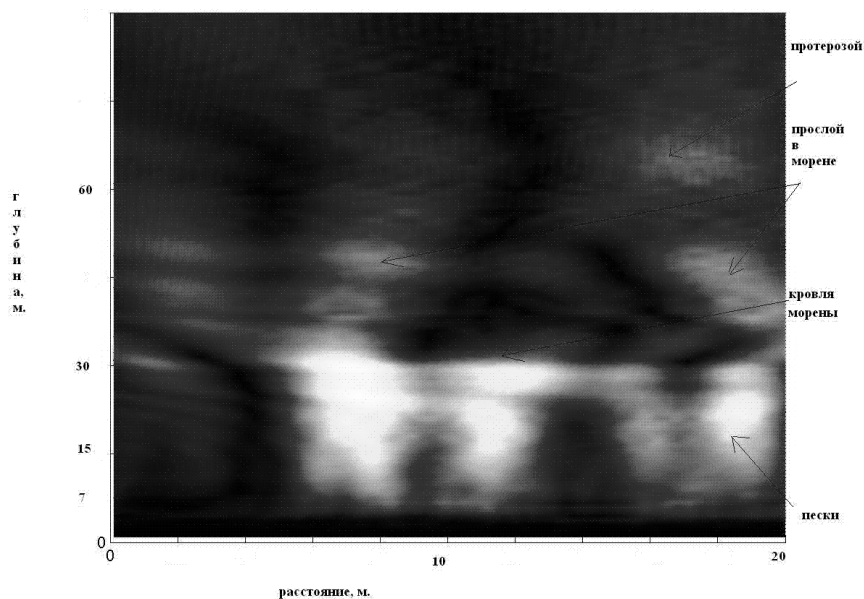


Рис. 5. Вейвлет-спектр отраженного сигнала

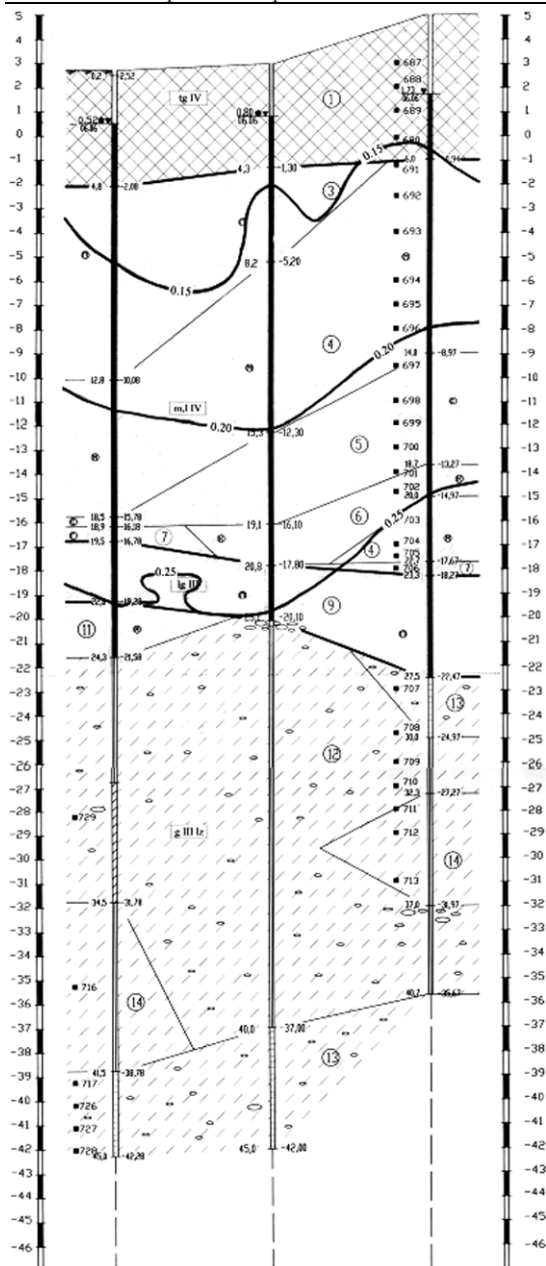


Рис. 6. Графики изменения скорости продольных волн V_p (км/с) с глубиной, совмещенные с геолого-литологическим профилем

4. По комплексным данным (СРТ, геология и сейсмика) был составлен эталон, который можно использовать при изысканиях и предпроектных геотехнических работах в Санкт-Петербурге. Рекомендуемая схема измерений: геофизические исследования (выявление признаков размыва, рекомендации по местам и глубине бурения скважин), контрольное бурение и СРТ.

5. Грунты в местах размывов обладают тиксотропными свойствами, и их прочностные характеристики изменяются при динамическом воздействии.

6. Полученные данные целесообразно использовать при строительстве тоннелей и высотных зданий, в том числе при определении длины и несущей способности свай, дополнительных конструктивных мер по укреплению стыков колец тоннеля, назначении поправочных коэффициентов при строительстве сооружений на склонах размыва и др.