

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ГРУНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
И ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС**

УДК 331.45

**Курилович Ирина Андреевна**

*Генеральный директор ЗАО «ГеоВИСТ», г. Санкт-Петербург, Россия,  
кандидат геолого-минералогических наук*

**Федоров Сергей Васильевич**

*Декан инженерно-строительного факультета Санкт-Петербургского  
филиала НОУ ДПО «ЦИПК», кандидат технических наук*

Для решения проблем безопасности строительства и эксплуатации атомных электростанций (АЭС) и сооружений повышенного уровня ответственности одной из важных задач является получение полной информации о подземном пространстве, на котором будет располагаться строящийся объект, то есть об инженерно-геологических, структурно-тектонических, гидрогеологических и геолого-литологических особенностях среды.

При проектировании модели оснований зданий и сооружений АЭС разрабатываются с учетом особенностей массива грунта (его слоистости, мощности и протяженности слоев, физических, упругопластических, вязких и инерционных свойств грунтов в каждом слое). Для этого требуются характеристики грунтов (пород) площадки АС во всем пространстве исследования, а именно: мощность, плотность, скорости распространения продольных и поперечных сейсмических волн; модуль сдвига (модуль поперечной упругости), модуль продольной деформации, коэффициент Пуассона. Кроме того, необходим контроль стабильности состояния и свойств геологической среды в период строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации АС, то есть проведение постоянного мониторинга подземного пространства. Мониторинг следует начинать при изысканиях для разработки предпроектной документации или проекта и продолжать в процессе строительства и эксплуатации объектов для оперативного реагирования на возможное развитие опасных геологических и инженерно-геологических процессов или существенные изменения экологической обстановки.

Как правило, изучение свойств грунтов преимущественно проводится по данным бурения в скважинах, или в шурфах, то есть по данным геологических испытаний образцов. Однако, результаты таких «точечных» испытаний не дают достаточно полную информацию о строении и состоянии пород (грунтов) по всей площади исследований. Поэтому, наряду со скважинными исследованиями, проводятся геофизические исследования, которые согласно нормативным документам (СП 11-105-97, ч. VI) рекомендуется выполнять в составе первоочередных работ.

Изучение геологического массива геофизическими методами имеет ряд преимуществ по сравнению с данными геологических испытаний за счет получения достаточно полной информации об объекте во всем пространстве исследований. Особенно это важно в условиях неоднородности геологического строения ВЧР, отличающейся невыдержанностью напластования грунтов по площади, наличием ослабленных зон и т.п. Основные особенности геофизических исследований состоят в следующем [2]:

- получаемая информация носит интегральный характер, т.е. относится к определенному объёму (а не к «точке») пород;
- геофизические методы позволяют проследить геологические границы непрерывно;
- геофизические исследования в большинстве случаев проводятся без нарушения сплошности изучаемой геологической среды и могут выполняться многократно (с любой заданной периодичностью) без изменения условий наблюдения, что позволяет эффективно использовать их для проверки получаемой информации и проведения мониторинга изменений геологической среды;
- геофизические наблюдения позволяют оценивать состояние пород и локализовать участки прогнозируемого изменения (например, напряжение, сплошность, влажность и пр.).

В результате комплексирования геофизических наблюдений с данными бурения скважин или статического зондирования можно установить корреляционные связи между геологическими свойствами горных пород и геофизическими характеристиками и распространить на всю изучаемую территорию. Так, например, на основе знания сейсмических свойств горных пород, к которым относятся скорости распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн и соответствующие коэффициенты (декременты) поглощения, рассчитываются следующие характеристики грунтов: динамический модуль Юнга ( $E_d$ ); модуль сдвига  $G$ ; коэффициент Пуассона ( $\nu$ ); модуль всестороннего сжатия ( $K$ ); акустическая (сейсмическая) жесткость ( $\rho V_p$  и  $\rho V_s$ ); отношение поперечных и продольных волн  $V_s/V_p$ . Различие скоростей распространения упругих волн и характеристик их поглощения обусловлено составом, свойствами и состоянием грунтов.

Для детального изучения строения, структурных особенностей и свойств геологических сред в объеме предлагается технология малоглубинной сейсморазведки на основе модификаций наземных и скважинных методов высокоразрешающей сейсморазведки. Полученные с использованием этой технологии данные позволяют проследить пространственную изменчивость свойств пород, а также получить информацию в любой точке изучаемого пространства.

Обычно сейсмические исследования верхней части разреза выполняются традиционными методами: МПВ (метод преломленных волн) или

МОВ (метод отраженных волн). Однако, в условиях отсутствия достаточно сильных преломляющих и отражающих границ или в случаях малоконтрастных или размытых границ с плавными изменениями упругих свойств горных пород в виде малых градиентов скорости, связанных с постепенным изменением вещественного состава породы или ее физических свойств – пористости, трещиноватости, увлажнения, промерзания или напряженного состояния, – традиционные сейсмические методы оказываются малоинформативными. Сейсмическое просвечивание на базе сейсмотомографии позволяет построить детальное изображение исследуемой среды на основании распределения скоростных параметров, полученных путем сканирования области исследования сейсмическими лучами. Под «сейсмотомографией» обычно понимают получение изображения объектов или геологических структур, расположенных в непрозрачной среде («томографический образ»), исключающей возможность физического контакта исследователя с объектом. Преимущество сейсмотомографического просвечивания (СТП) состоит в возможности выделения слабоконтрастных объектов, что позволяет решать широкий спектр задач, связанных с малоглубинными исследованиями. Технология СТП показала высокую эффективность в течение ряда лет при решении различного рода задач инженерной геофизики. Ниже рассмотрим примеры применения технологии СТП на стадии проектирования объектов повышенного уровня ответственности.

### **Результаты сейсмических наблюдений на площадке высотного строительства**

С целью исследования состояния грунтов при проектировании высотных зданий гостиничного комплекса в районе г. Санкт-Петербурга были проведены изыскания методами сейсмотомографического просвечивания и статического зондирования (СЗ). Сейсмические наблюдения выполнялись на двух профилях. Статическим зондированием было пройдено 17 точек.

По профилям исследования были построены сейсмотомографические модели (V). Большой интерес представил совместный анализ сейсмотомографических моделей и вариограмм зондирования в точках, расположенных вблизи сейсмических профилей. Сопоставление этих материалов показало хорошее совпадение характера изменения кривых лобовых сопротивлений и сейсмических скоростей с глубиной, что позволило создать сейсмогеологические разрезы по профилям, на которых чётко прослеживаются общая стратификация грунтового массива и его дифференциация в различных местах площадки, а также чётко проследить положение слабых неустойчивых слоёв, в том числе аномальной зоны плавунных грунтов в пределах площади изысканий (рис. 1).

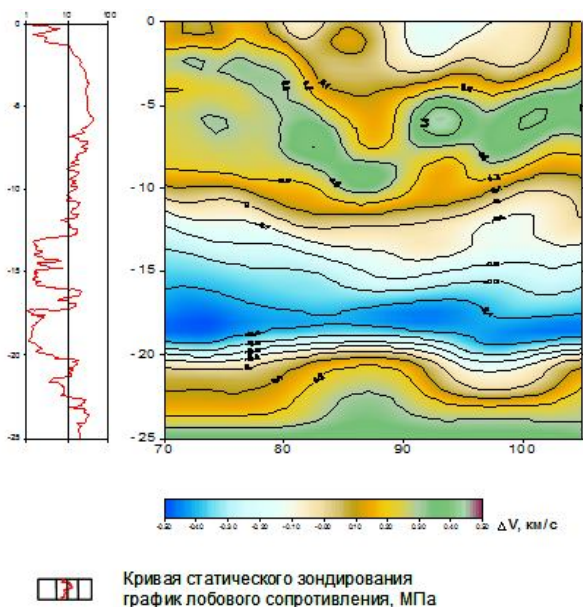


Рис.1. Сопоставление данных  $q_c$  и  $V_{sh}$

На основе результатов сейсмотомографии и данных зондирования были построены сейсмогеологические разрезы по профилям, где чётко прослеживаются общая стратификация грунтового массива и его дифференциация в различных местах площадки. Совместная интерпретация данных этих двух методов основывалась на высокой степени корреляции кривых статического зондирования и кривых скорости с глубиной.

Таким образом, были решены следующие задачи: определены положения границ литологических комплексов и их пространственного прослеживания в пределах площади изысканий, а также выделены скоростные неоднородности, связанные с разуплотнением, обводнением пород, чётко прослежено положение слабых неустойчивых слоёв. В пределах площади исследований околонулена аномальная зона плавунных грунтов, расположенная вдоль транспортной магистрали с интенсивным движением транспорта.

### Изучение скоростного строения среды в районе проектируемого строительства высотного здания («Охта-центр»)

Целью сейсмических исследований являлось выявление особенностей геологического строения верхней части фундамента и перекрывающей толщи пород на основе изучения ее скоростного строения в районе

проектируемого строительного комплекса, а также определение глубины залегания кровли кристаллического фундамента и литологических комплексов пород и выделение тектонических нарушений и ослабленных зон.

При изучении геологического строения по площади исследования применялась технология СТП в комплексе с другими модификациями сейсморазведки (ОГТ, ВСП), позволяющая получить объемную параметрическую модель с детальной информацией в любой точке пространства. Были проведены площадные наземные и наземно-скважинные сейсмические наблюдения СТП, в результате которых получены скоростные параметры среды в районе работ и построена объемная скоростная модель до глубины 270 м (рис.2). Детальные сейсмические исследования выявили особенности строения верхней части фундамента и перекрывающей толщи осадочных пород. Выделены зоны понижения скорости, связанные с участками менее плотных пород.

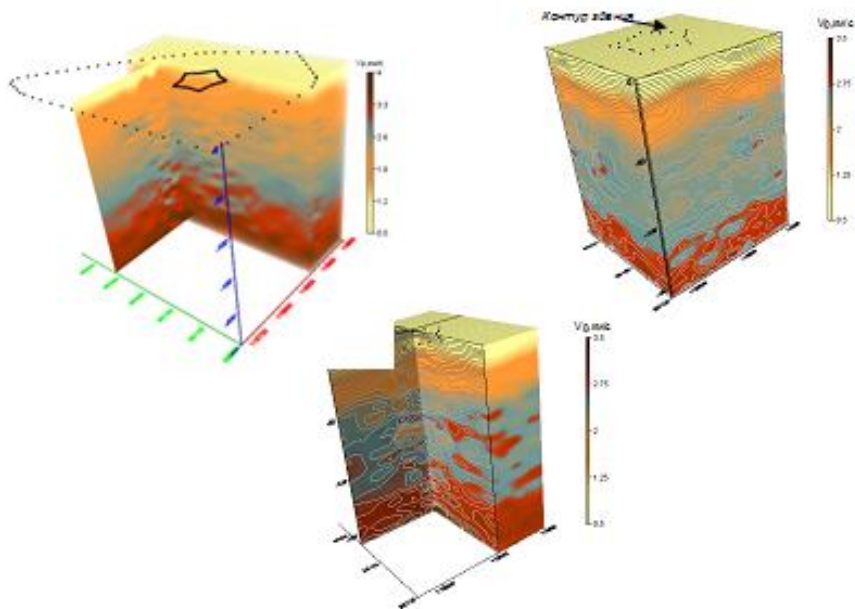


Рис.2. Объемная скоростная модель участка работ

Осадочная толща пород дочетвертичных отложений имеет складчатое строение. При этом наиболее выраженная складчатость наблюдается в породах нижнего венда. Скоростная модель осадочной толщи аппроксимируется слоисто-гетерогенной средой. Породы осадочной толщи (Vkt-Q) по характеру скоростного распределения и значениям скоростей

различаются на слои, залегающие в определенных интервалах глубин. Подробнее рассмотрим скоростное строение глубинного разреза на примере профиля IX (рис.3). По глубине залегания пород выделяются шесть основных пакет скоростных слоев, различающихся как по скоростным параметрам, так и скоростной дифференциацией внутри каждого слоя. Глубина скоростных границ, разделяющих эти интервалы, варьирует по площади исследований и расположена на глубинах: 40-50 м; 90-95 м; 110-115 м; 145-150 м; 170-180 м, 200-210 м. В целом, породы верхней части фундамента погружаются в западном направлении, что можно видеть на вертикальном сечении объемной модели по диагонали.

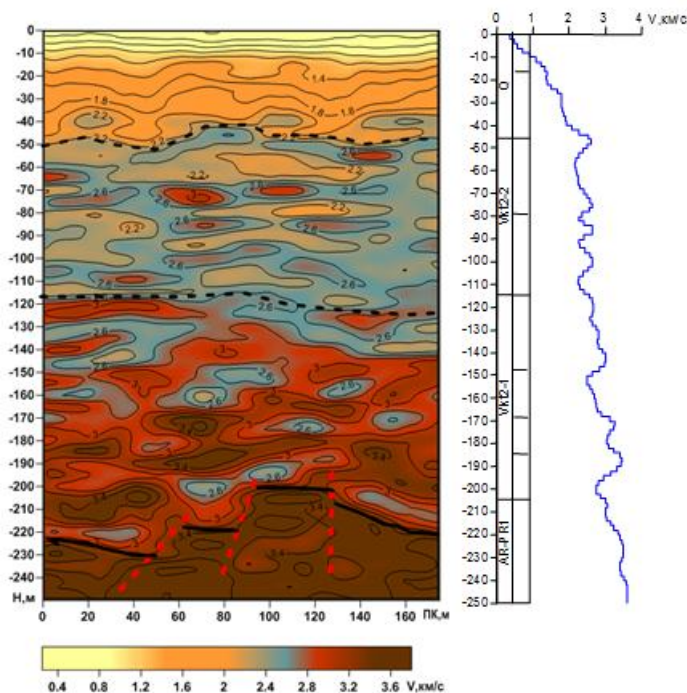


Рис.3. Особенности сейсмогеологического строения грунтов

В результате проведения сейсмических наблюдений на всей площади исследований была определена глубина залегания кровли кристаллического фундамента и литолого-стратиграфических комплексов пород. Кровля кристаллического фундамента (AR-PR) по данным сейсморазведки отмечается на глубинах 210-240 м с падением в западном направлении. Верхняя часть фундамента, представленная выветрелыми породами, имеет существенно блоковое строение, осложненное интенсивной текто-

нойкой. На горизонтальных сечениях, (рис. 4), где представлено скоростное распределение значений по площади на различных глубинах, можно проследить особенности скоростного строения по площади во всем объеме исследований.

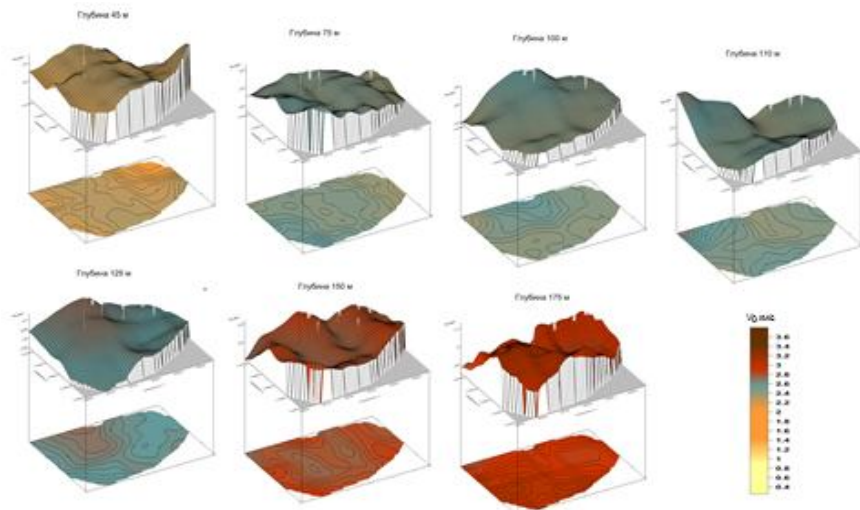


Рис.4. Горизонтальные сечения объемной скоростной модели

### Детальные инженерно-геофизические изыскания на объекте «Дом приема официальных гостей «Псехако» (п.Красная Поляна)

Проведение детального изучения строения и свойств грунтов по всей площади строительства является особенно необходимым при строительстве объектов повышенного уровня ответственности. На объекте исследования в условиях горного рельефа в составе инженерно-геологических изысканий были выполнены наблюдения СТП по наземным профилям (рис.5).

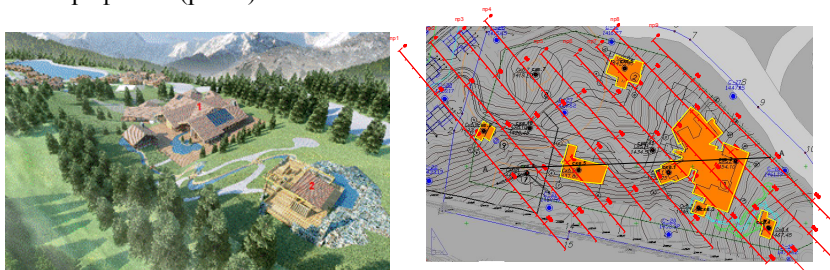


Рис. 5. Схема расположения профилей на участке

По результатам сейсмотомографического просвечивания по каждому профилю наблюдений были получены сейсмотомограммы ( $V_p$ ;  $V_s$ ;  $V_s/V_p$ ). На рис. 6 представлены сейсмотомограммы ( $V_s/V_p$ ) по профилям II и III с параметрами продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) скоростей и модуля Юнга ( $E$ ). На моделях отчетливо проявляются структурные особенности геологического разреза. Так, например, в верхних слоях разреза отмечается ступенчатообразная структура, что обусловлено условиями их формирования. По-видимому, в процессе перемещения пород на склонах происходило вымывание легких фракций этих пород, а более тяжелые, в виде щебня оседали, создавая террасы или ступенчатые структуры. Подстилающий эту пачку пород слой (желтый цвет) соответствует элювию глинистых сланцев. Мощность элювиальных отложений в пределах участка значительно меняется в зависимости от степени выветривания материнских пород.

По результатам наблюдений была построена объемная скоростная модель (рис. 7).

По линии AA, совпадающей с профилем скважин (скв. 1, 2, 5), по результатам сейсмических наблюдений и данным бурения был построен геолого-геофизический разрез (рис. 8), на котором с высокой степенью детальности отражено залегание литологических слоев по глубине, определены их мощность и рельеф границ.

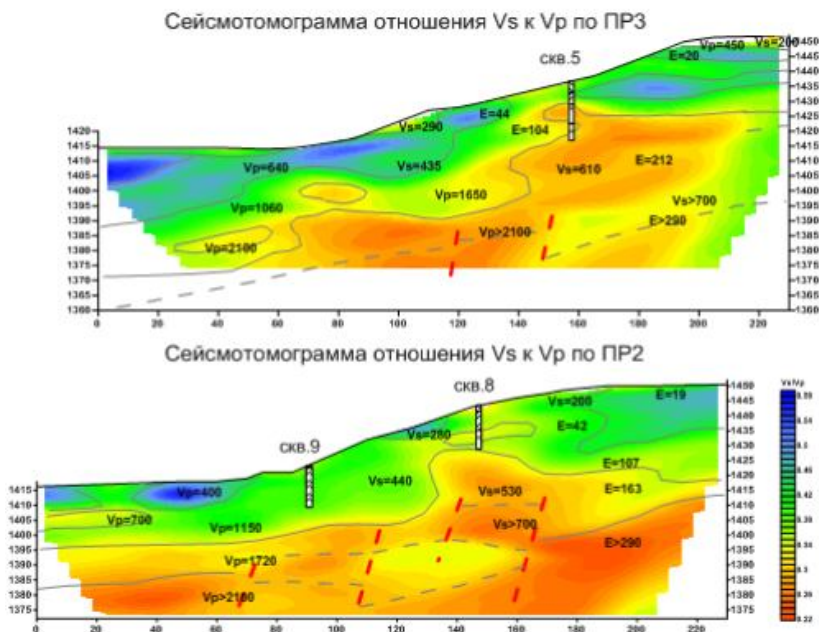


Рис. 6. Сейсмотограммы  $\gamma = V_s/V_p$



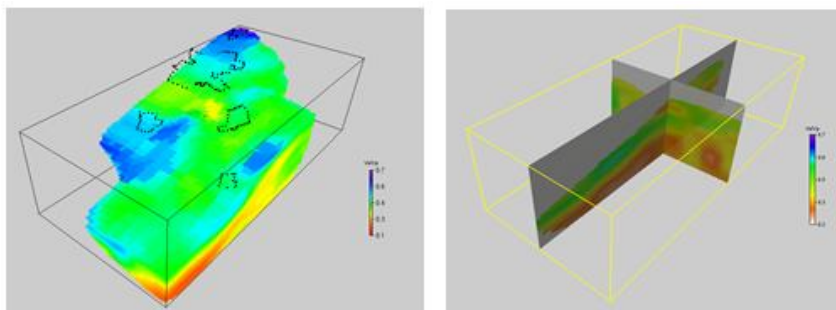


Рис. 7. Фрагменты объемной скоростной модели участка

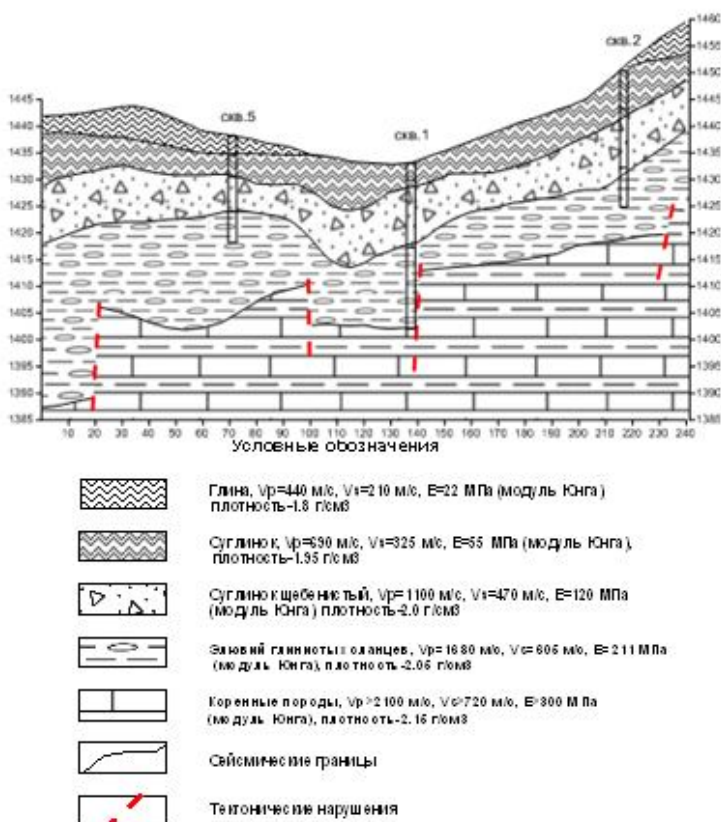


Рис. 8. Сейсмогеологический разрез по линии А-А

Скорость распространения упругих колебаний в породах зависит от целого ряда факторов, таких как: литологический состав, пористость, влагонасыщенность, гетерогенность, горное давление. Поэтому, например, в однотипных по литологии породах может происходить понижение скорости вследствие повышенной трещиноватости (пустотности). Наряду с этим, в слаботрещиноватых породах скорость может понижаться из-за иного литологического состава пород или других выше перечисленных факторов. Кроме того, при переходе от сухих к водонасыщенным породам значения скоростей продольных волн возрастают скачкообразно, а поперечных волн, соответственно, плавно. Таким образом, величина отношения скоростей ( $\gamma = V_s/V_p$ ) зависит не только от литологии, но и от фазового состояния горных пород. Поэтому, наряду со скоростными характеристиками массива необходимо иметь данные о физико-механических свойствах пород в естественных условиях залегания.

Современные методы сейсморазведки, в частности метод сейсмической томографии, позволяют определять параметры геологической среды в естественных условиях залегания (*in situ*), необходимые для целей геотехнических расчетов, такие как модуль сдвига ( $G$ ), коэффициент Пуассона ( $\nu$ ), модуль упругости ( $E$ ), модуль объёмной деформации ( $K$ ) и другие. На рис. 9 показаны вертикальное сечение объёмных моделей  $\nu$ , на рис. 10 соответственно горизонтальное сечение  $E$ .

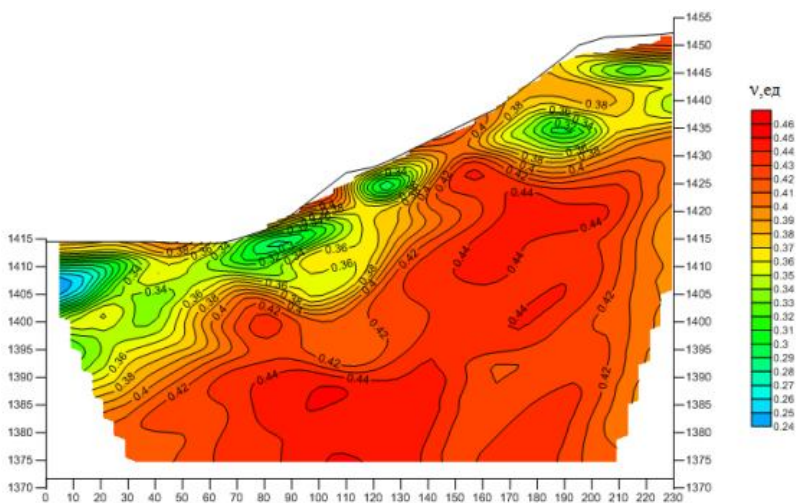


Рис. 9. Вертикальное сечение сейсмотомографической модели ( $\nu$ )

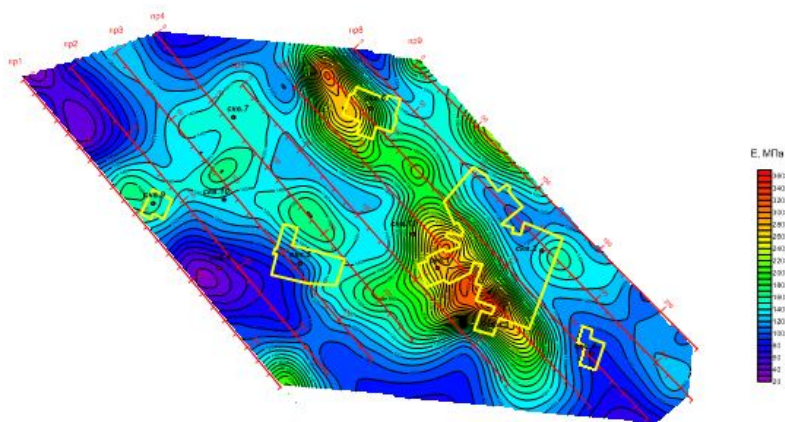


Рис. 10. Горизонтальное сечение объемной модели (E) на глубине 15 м

### Инженерно-геофизические изыскания на объекте «Центр оперативного управления по обеспечению безопасности и правопорядка»

На участке, расположенном в прибрежной части района г. Сочи, были проведены сейсмические исследования (СТП) с использованием технологии наблюдений, описанной в предыдущем примере. Объемная сейсмотомографическая модель, полученная в пределах участка работ, позволила получить представление, как о скоростном строении, так и о структурном залегании пород в объеме исследований, что очень важно при таком сложном геологическом строении, как на участке проведения работ. Как видно на 3D-модели (рис.11), кровля коренных пород изменяется по глубине залегания в значительных пределах участка работ. Наблюдается преимущественное падение пород по направлению к морю. Однако в средней части участка отмечается поднятие коренных пород.

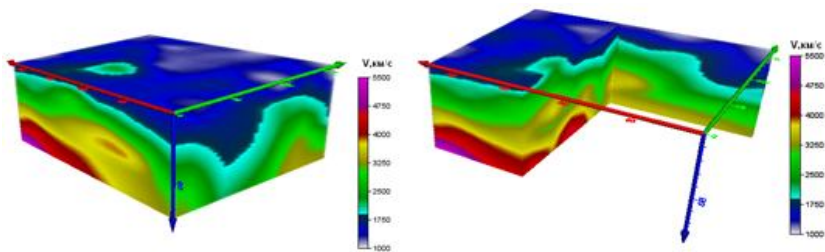


Рис. 11. Скоростные модели участка

На скоростной модели видно, что для всей площади исследований характерна интенсивная складчатость пород, обусловленная активной тектонической деятельностью. На основании данных о скоростях продольных и поперечных упругих волн были рассчитаны физико-механические характеристики пород во всем объеме сейсмических наблюдений, а также выполнен расчет приращения сейсмичности и построена карта приращения балльности на участке строительства (рис.12).

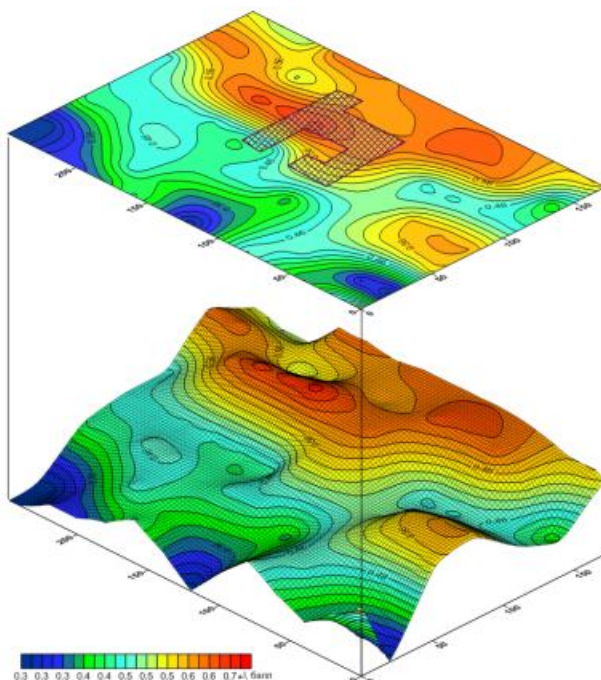


Рис. 12. Карта приращения сейсмичности

### Библиографический список

1. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ / Госстрой России. - М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.
2. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований /

- Госстрой России. - М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.
3. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций.
  4. РСН 60-86 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ.
  5. РСН 65-87 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ.
  6. РСН 66-87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка. Госстрой РСФСР.
  7. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981
  8. Сейсмическая томография. Пер. с англ./ Под ред. Г. Ноллета. – М.: Мир, 1990.
  9. Курилович И.А., Веселов В.Н. Использование высокоразрешающей сейсморазведки при решении инженерно-геологических задач, связанных с проблемами строительства и эксплуатации объектов и сооружений в городских агломерациях. В кн. Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов. Т.2. – Казань, 2007.
  10. Курилович И.А., Веселов В.Н. Возможность использования современных геофизических методов для исследования изменений свойств грунтов при техногенных воздействиях // Инженерные изыскания. – М.: ОАО «ПНИИИС», №4, 2009.