

УДК 624.15

Геофизический анализ основания для инженерно-геологических целей с использованием методов многоканального анализа поверхности волн и микротолчка в районе Иерихона, Западный Берег, Палестина

Эль-Келани Р.Дж.^{1,2}, Ататри А.Т.², Аль Даббик Дж.Н.¹

¹Инженерный факультет, кафедра гражданского и архитектурного строительства,
Национальный университет Ан-Наджа,
г. Наблус, Палестина

²Палестинская сейсмологическая обсерватория, Национальный университет Ан-Наджа,
г. Наблус, Палестина

Аннотация. Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW-МАПВ) и наблюдение за микротолчками обеспечивают удобную оценку подземных пород и грунтов при геотехническом исследовании территории. Основной целью данной работы является оценка геотехнических характеристик грунтового основания для проектирования фундамента цементного завода в районе Иерихона. МАПВ использовался для определения скорости поперечной волны (V_s) на предлагаемом участке. Было выполнено шесть профилей для МАПВ, для измерения V_s и оценки класса участка. S-волны были получены с использованием техники МАПВ, 24-канального сейсмографа SUMMIT X Stream Pro, со смещением расстояния в 2–3 м и тремя взрывами. Полевые наблюдения проводились с использованием вертикального сейсмоприемника RT Clark низкой частоты (4,5 Гц), а программное обеспечение SWAN использовалось для обработки сейсмических данных. Наблюдения за микротолчками проводились в двух местах исследуемой территории, с применением методики Накамуры для определения преобладающей собственной частоты (F_0). Были обнаружены геосейсмические зоны как с низкой скоростью поперечной волны (V_s) в диапазоне от 300 до 650 м/с, так и до умеренно высоких скоростей, варьирующихся от 700 до 1200 м/с. Значения средней скорости S-волн для инженерно-геологических элементов, близких к поверхности (верхняя глубина 30 м VS30) показывают, что большинство оснований фундаментов имеют профиль грунта класса C, что делает их пригодными для инженерного проектирования. Результаты наблюдений за микротолчками показали преобладающую собственную частоту (F_0) от 7 до 11 Гц. Собственные частоты предлагаемой конструкции (F_b) не должны быть близки к значениям преобладающей частоты площадки (F_0) во избежание резонансных явлений.

Ключевые слова: многоканальный анализ поверхностных волн, микротолчки, грунтовые эффекты, метод Накамуры, геотехника, Палестина

Для цитирования: Эль-Келани Р.Дж., Ататри А.Т., Аль Даббик Дж.Н. Геофизический анализ основания для инженерно-геологических целей с использованием методов многоканального анализа поверхности волн и микротолчка в районе Иерихона, Западный Берег, Палестина // Строительные конструкции, здания и сооружения, 2024, № 3(8), с. 22-33.



Geophysical analysis of soil for geotechnical engineering purposes using Multichannel analysis of surface waves and microtremor approaches in Jericho region, West Bank, Palestine

El-Kelani R.J.^{1,2}, Atatri A.T.², Al Dabbeek J.N.¹

¹Faculty of Engineering, Civil & Architectural Engineering Department, An-Najah National University, Nablus, Palestine

²Palestinian Seismological Observatory, An-Najah National University, Nablus, Palestine

Abstract. Multichannel analysis of surface waves (MASW) and microtremor measurements provide a convenient site evaluation of subsurface rocks and soils for geotechnical site investigation. The main target of this work is to assess the geotechnical characteristics of subsurface soil for foundation purposes of a cement factory in Jericho region. MASW was used to delineate the shear wave velocity (V_s) in the proposed site. Six profiles for MASW was performed to measure the V_s for site class evaluation. S-waves were generated using MASW technique with seismograph of 24-channel model SUMMIT X Stream Pro with 2 to 3 m offset distance and three shooting. Fieldwork was undertaken implementing RT Clark vertical geophone of low frequency (4.5 Hz) and SWAN software was used for processing seismic data. Microtremor measurements were carried out at two locations in the study area and Nakamura's method was applied for determining dominant natural frequency (F_0). Low shear wave velocities (V_s) geoseismic zones were detected ranging between 300-650 m/s, to a moderately high velocities varying between 700-1200 m/s. The values of average S-waves velocity for near-surface geologic units (the top 30 m depth V_{s30}) show that the majority of foundation sites have a soil profile of class C, making them suitable for engineering design. The results of the microtremor measurements showed a dominant natural frequency (F_0) 7 to 11 Hz. The natural frequencies of the proposed construction (F_b) should not be close to the values of the dominant frequency of the site (F_0) in attempt to avoid the resonance phenomena.

Keywords: MASW, Microtremors, Soil effects, Nakamura's method, Geotechnical, Palestine.

For citation: El-Kelani R.J. , Atatri A.T., Al Dabbeek J.N. Geophysical analysis of soil for geotechnical engineering purposes using Multichannel analysis of surface waves and microtremor approaches in Jericho region, West Bank, Palestine // Construction, buildings and structures, 2024, № 3(8), pp. 23-33.

1. Введение.

Район Иерихона находится в восточной части Западного берега. Рассматриваемая толща в основном состоит из четвертичных отложений (рис. 1 и 2).

Исторические землетрясения за последние несколько сотен лет и инструментальный мониторинг землетрясений за полвека [1, 2] показывают, что разрушительные землетрясения были локализованы вдоль разлома Мертвого моря. Поэтому следует использовать все доступные методы для снижения риска ожидаемого средне-высокого уровня сейсмической опасности в палестинских регионах [3-5].

Сейсмологи и инженеры-строители все чаще принимают геофизические подходы для оценки сейсмических свойств массивов грунтов строительных площадок, поскольку они обеспечивают полное представление о геологической структуре и литологии [6-8]. Измерения микротолчков с помощью 2D многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ) являются геофизическими подходами для оценки характеристик сейсмобезопасности зданий и объяснения вопросов, связанных с подстилающими фундаментами дисперсными и скальными грунтами [9, 10]. МАПВ считается оптимальным подходом к определению скоростей поперечных волн (V_s), при котором полевые работы занимают меньше времени, а обработка данных выполняется быстрее [11], другой метод оценки сейсмичности участка был предложен в 1989 году Накамура [12]. Волновой эффект и значения V_s обеспечивают полезную основу для оценки движения грунта и собственных частот, связанных с его свойствами [13-15]. В любом месте определение



жесткости грунта является ключевой характеристикой для прогнозирования реакции сотрясения массива и полезно для проектных расчетов [16]. Определение динамических инженерных свойств скальных пород и дисперсных грунтов путем интерпретации V_s , определения вероятных причин повреждения структуры и расчета $VS30$ (усреднения V_s для самых верхних 30 м) с целью выявления класса участка. Таким образом, оценка характеристик геологической толщи и влияния окружающих слоев на деформацию грунта имеют жизненно важное значение [9, 10].

Основная цель данной работы — идентифицировать подстилающие горные породы и инженерно-геологические элементы посредством определения скоростей S-волн и оценки приповерхностных локальных эффектов участка. Это будет достигнуто путем объединения многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ) и наблюдений за микротолчками. Цель — проведение геотехнического инженерного анализа и снижение сейсмического риска для проектируемого цементного завода в районе Иерихона на Западном берегу, Палестина.

2. Материалы и методы.

Геология участка

Основные обнажения вокруг предполагаемого района исследования (рис. 1) представляет собой толщу известняка в 3 метра, кремнистых отложений толщиной 0,4-0,5 метра и меловых отложений до мергелистого мела толщиной 2 метра на одной стороне Вади. На другой стороне - последовательная стратиграфия кремнистого и мелового известняка, состоящего из складчатых и трещиноватых слоев. Кремнистый камень имеет серый цвет и трещиноватый тип, что связано с типом образования Иорданской рифтовой долины [17].

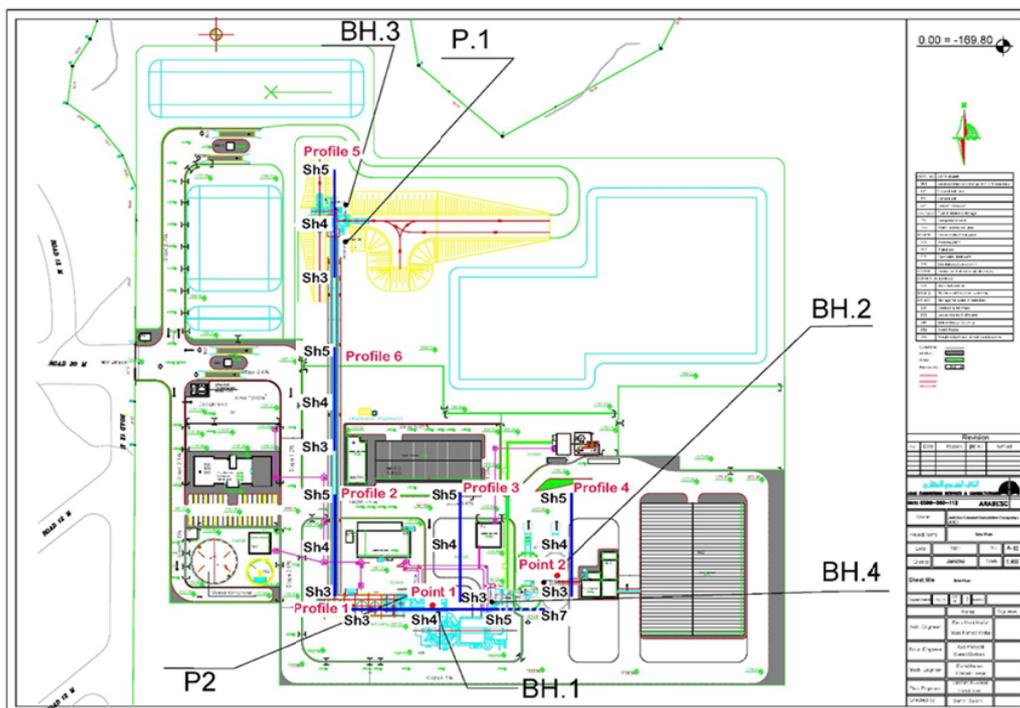


Рис. 1 Карта расположения исследуемого участка, также показано распределение профилей МАПВ (иллюстрация авторов)

Fig. 1 Map of the location of the studied area, also shows the distribution of MAPV profiles (illustration by the authors)

Как показано на рис. 2, типичные литологические слои в районе Иерихона состоят из:



- Группа Мертвого моря (Q(PE)-Lisan), которая в основном состоит из карбонатов; тонкослоистого мергеля с гипсовыми полосами и плохо отсортированного гравия и гальки, а также вулканических пород, относящихся к верхнечетвертичному периоду.

- Группа Абу-Дис (MZ(K-SN)-Nablus), которая в основном состоит из карбонатов, мела, а также включает другие отложения, такие как кремнистый камень, в дополнение к вулканическим породам, относящимся к верхнему мелу.

- Группа Ятта (MZ(K-CN)-BHY), которая в основном состоит из карбонатов; известняка, доломита, глины и мела, в дополнение к вулканическим породам, относящимся к верхнему мелу.

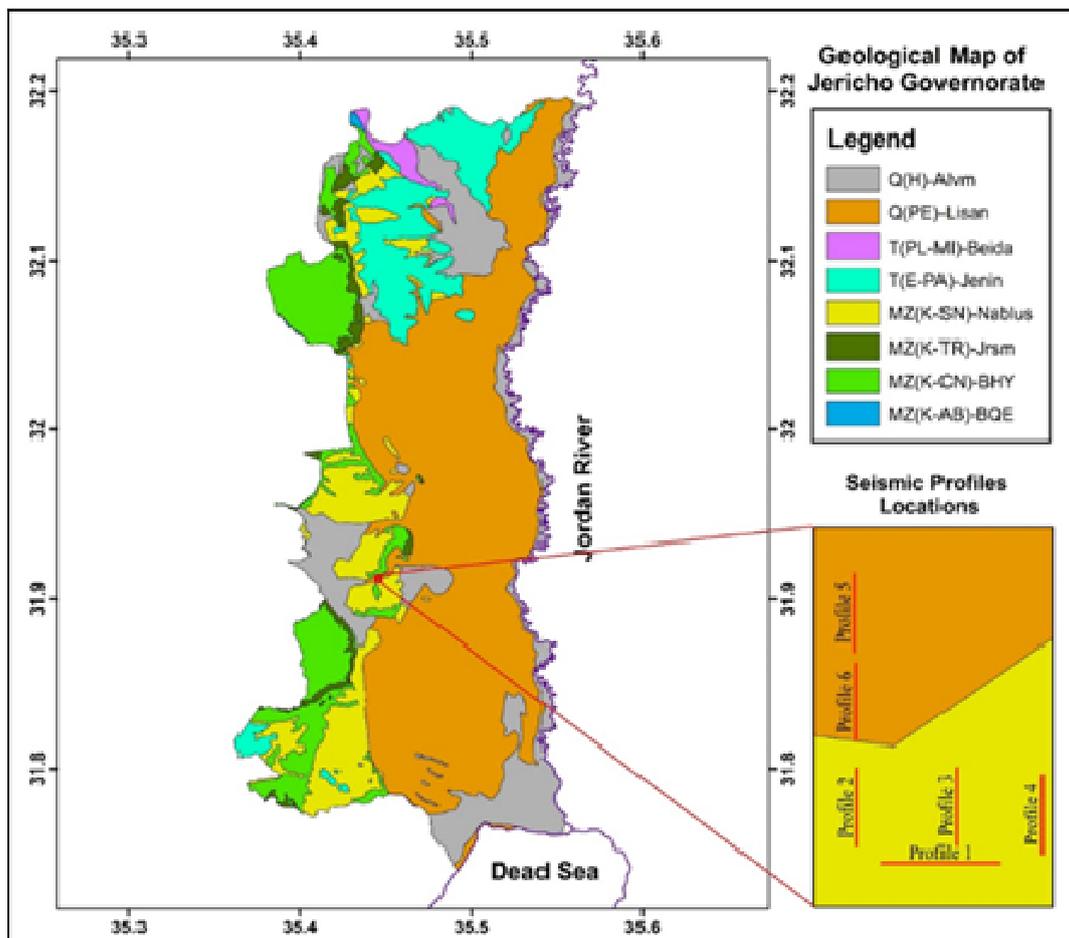


Рис.2. Геологическая карта района Иерихон (иллюстрация авторов)
Fig.2. Geological map of the Jericho area (illustration by the authors)

Изучение MASW (МАПВ)

В исследовании применялась технология МАПВ для генерации S-волн [11]. Использовалась линейная конфигурация расстановки; сейсмоприемники были расположены по прямой линии на земле и соединены распределенным кабелем (рис. 3). Существует много способов генерации сейсмической энергии, необходимой для исследований поверхностных волн с активным источником, но было рекомендовано использовать 8-килограммовую ударяющую по земле кувалду, поскольку является дешевым, легкодоступным предметом и, как правило, генерирующим достаточно энергии для большинства исследований вблизи поверхности с высоким разрешением [9, 10]. В качестве интерфейса между сигналом и приемником использовался триггерный переключатель для усиления отношения сигнал/приемник. Исследование поверхностных волн проводилось на шести профилях (рис. 1 и 2) с использованием 24-канального сейсмографа SUMMIT X Stream Pro; что приводит к длине спреда 69 м для профиля 1 и 46 м для других профилей за счет смещения на 3 м и 2 м соответственно. Как для обычных, так и для обратных замеров расстояние между первым и последним



сейсмоприемником составляет 5 м. Для полевых наблюдений использовались низкочастотные (4,5 Гц) вертикальные сейсмоприемники RT Clark с опорными пластинами.

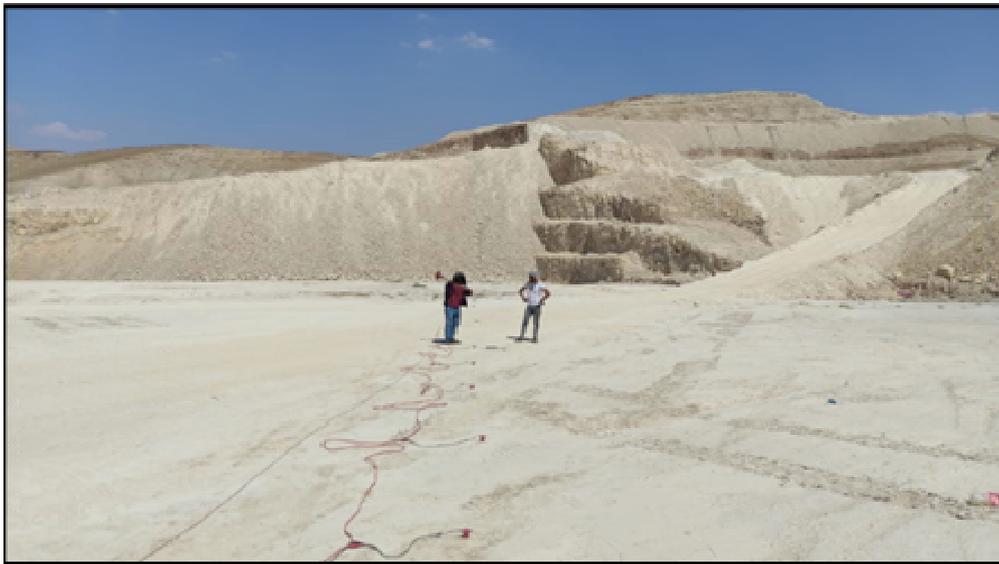


Рис.3. Фотография выполнения полевых работ показывает конфигурацию геофонов (иллюстрация авторов)

Fig.3. A photo of field work shows the configuration of geophones (illustration by the authors)

Методика Накамуры

Оценка реакции объекта имеет решающее значение в геотехнических исследованиях для целей сейсмостойкого строительства, такая оценка может быть получена методом наблюдения за микротолчком [18]. Применение метода наблюдения за микротолчками при оценке реакции грунта является разумным, поскольку метод является недорогим и быстрым [12]. Для получения результата реакции массива требуются только записи с одной трехкомпонентной станции, развернутой на интересующем участке, и не нужна опорная сейсмограмма подстилающей породы. Как отметил Накамура [12], данная методика была предназначена для оценки усиления S-волны из наблюдений за микротолчками. В данной однослойной задаче задействованы четыре компонента спектральных амплитуд, а именно горизонтальные компоненты движения на поверхности и дне осадочного слоя, обозначаемые как S_h и S_v , соответственно; и вертикальные компоненты движения на поверхности и дне, обозначаемые как S_x и S_y . Основная цель метода Накамуры — выделить эффект усиления, которому подвергаются горизонтальные компоненты движения основания. Для этого он сначала строит теоретические пропорции скважин, которые в общем рассматриваются как наиболее надежные оценки передаточной функции для горизонтальных и вертикальных компонентов, как указано ниже, соответственно:

$$S_h = \frac{H_s}{H_b} \quad (1)$$

$$S_v = \frac{V_s}{V_b} \quad (2)$$

С этими двумя пропорциями Накамура строит дополнительную передаточную функцию, которая формально дает коэффициент, при котором горизонтальная пропорция превышает вертикальную:

$$S_t = \frac{S_h}{S_v} = \frac{H_s/H_b}{V_s/V_b} \quad (3)$$

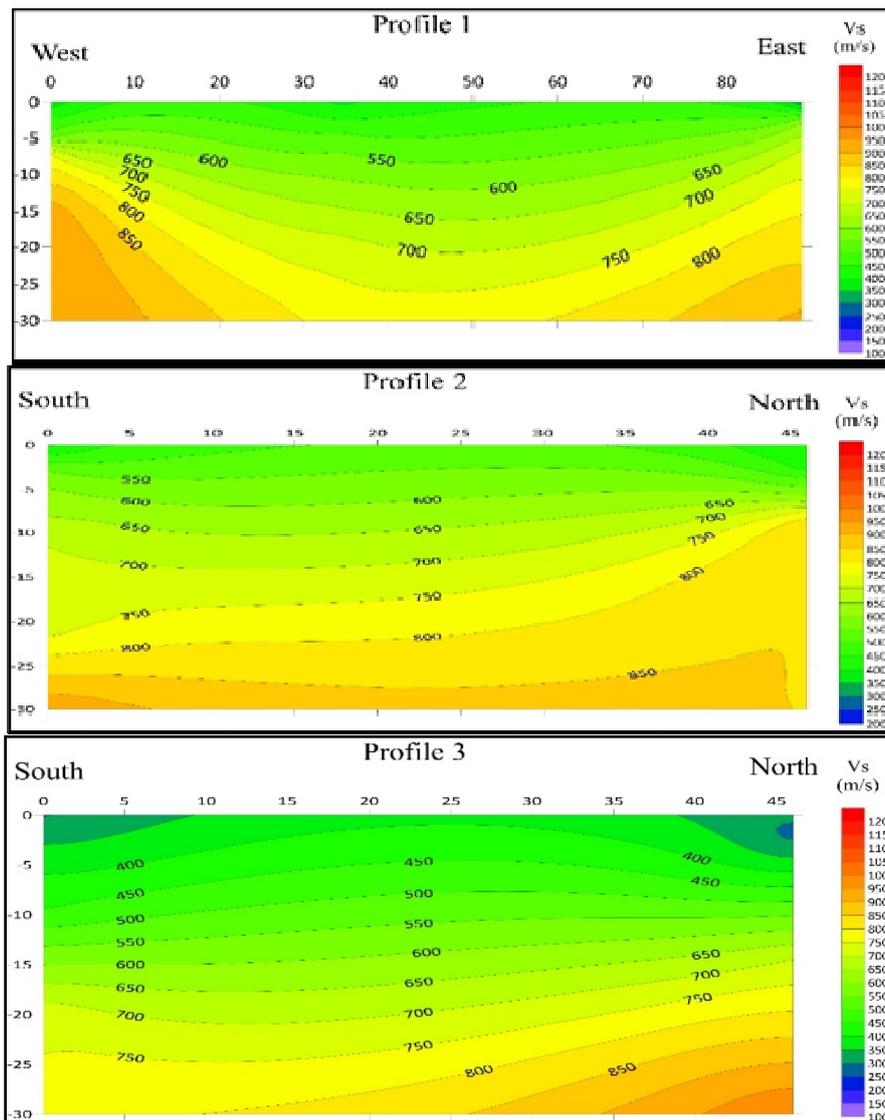
$$S_t = \frac{H_x/H_s}{H_b/V_b} \quad (4)$$



3. Результаты и обсуждение.

Анализ метода MASW (МАПВ)

Двумерная модель скорости S-волны была создана с использованием программного обеспечения SWAN; активный источник используется для ввода файла данных, который затем модифицируется для улучшения внешнего вида формы волны. Были установлены параметры для расчета фазовой скорости, построения дисперсионной кривой в требуемом диапазоне частот, создания предварительной модели V_s и запуска метода инверсии для нахождения окончательной модели V_s , которая соответствует дисперсионным кривым экспериментальных данных. Поскольку разные частоты влекут за собой разную толщину грунта и, таким образом, движутся с разной скоростью, дисперсия поверхностной волны часто соотносится со свойствами грунтовой толщи. Двумерные модели скорости вариаций S-волн (V_s) под исследуемым участком показаны на рис. 4.



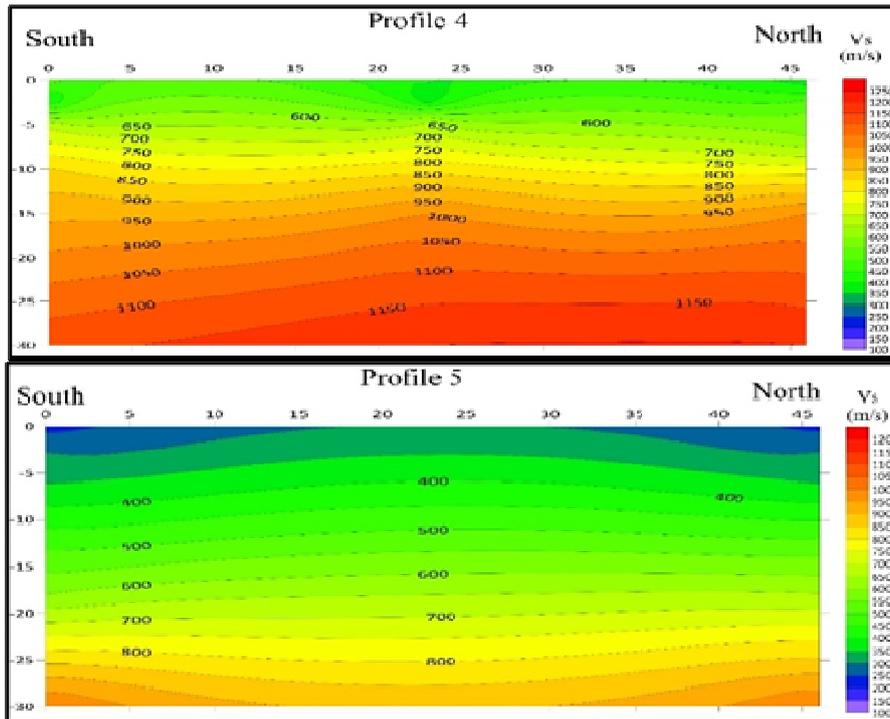


Рис. 4. Двухмерная модель скорости вариаций S-волн (V_s) под исследуемым участком (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Two-dimensional model of the velocity of S-wave variations (V_s) under the study area (illustration by the authors)

Среднее значение V_{S30}

Верхние отложения в основании, участвуют подвижках грунта и являются первопричиной всех инженерных проблем с конструкциями. Изучение характеристик верхних слоев грунтов имеет первостепенное значение для решения инженерных и экологических вопросов из-за их влияния на распространение сейсмических волн и свойства жесткости основания. Среднее значение V_{S30} относится ко времени прохождения от поверхности земли до самой 30-метровой глубины [9, 10, 19 и 20]. Согласно рекомендациям, данным в программном обеспечении SWAN, глубины проникновения могут достигать от 10 до 30 м в зависимости от материалов и условий участка, типов требуемых источников энергии, любого требуемого параметра сейсмоприемников. Можно предположить, что местоположения с одинаковым порядком класса обладают сопоставимыми характеристиками сейсмического воздействия.

Наблюдения за микротолчками и анализ

Состояние участка играет важную роль в установлении потенциального ущерба входящих сейсмических волн от крупного землетрясения. Существует несколько колебаний малой амплитуды, которые возникают на поверхности окружающей земли. Колебания с малыми периодами, менее 1 секунды, называются микротолчком [21]. Происхождение микротолчка, вероятно, может быть связано с движением транспортных средств, тяжелой техникой, бытовыми приборами и т. д., которые не связаны с землетрясениями; однако небольшие волны могут передаваться и от окружающих нас каждый день искусственных источников.

Система сбора данных состоит из трехкомпонентного высокочувствительного сейсмометра с естественным периодом в 1 секунду и цифрового регистратора (ноутбук). Система использовалась для записи горизонтальных и вертикальных компонентов микротолчка. Эффекты на месте были исследованы путем измерения окружающего шума в двух местах (рис. 1) с использованием короткопериодной сейсмической станции и проведения спектрального анализа с использованием программного обеспечения Geopsy. Для каждого измерения было создано временное окно в пятнадцать минут, сигналы были преобразованы в ряд Фурье и сглажены с использованием окна 0,3 Гц. В выбранных



точках были получены результаты спектральных коэффициентов на основании наблюдений за микротолчком и обработки данных (рис. 5 и 6).

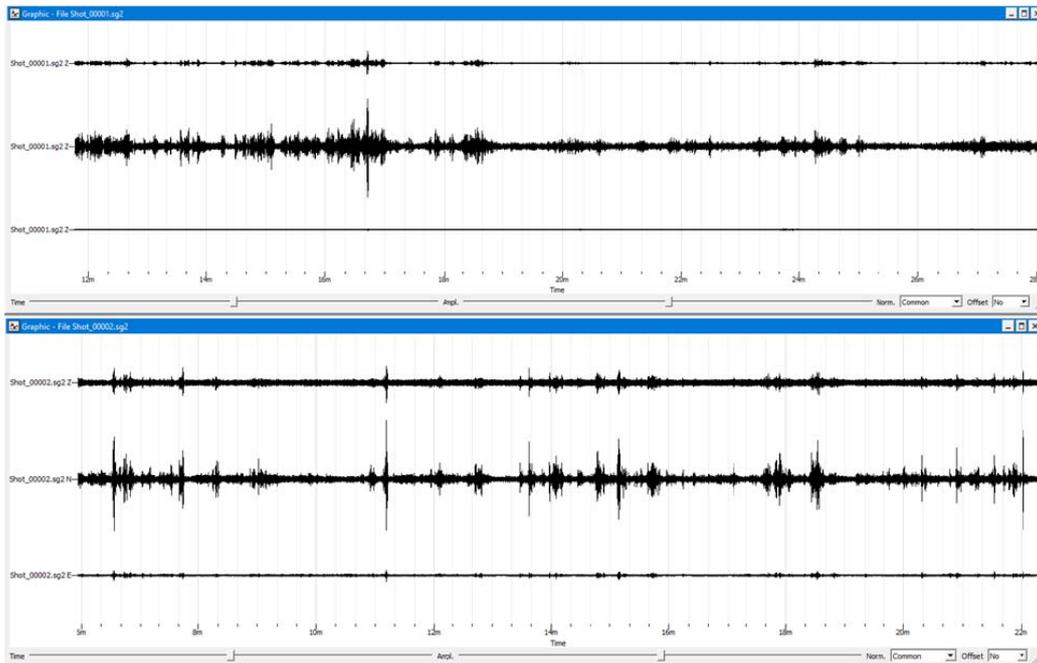


Рис. 5. Спектральный коэффициент определялся с использованием данных регистрации для точек 1 и 2 (иллюстрация авторов)

Fig. 5. The spectral coefficient was determined using the registration data for points 1 and 2 (illustration by the authors)

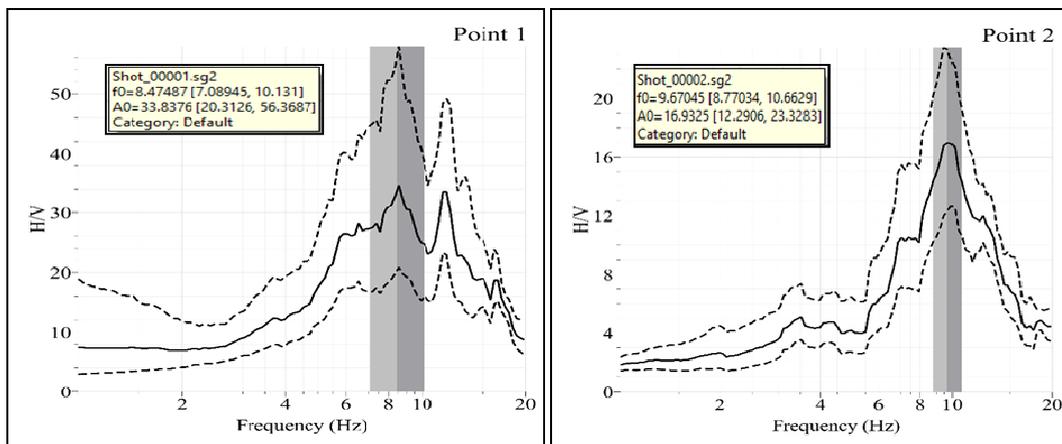


Рис.6. Спектральный коэффициент для точек 1 и 2 для выбранных точек, показанных на рис. 1 (иллюстрация авторов)

Fig.6. Spectral coefficient for points 1 and 2 for the selected points shown in Fig. 1 (illustration by the authors)

Интерпретация данных

Низкие скорости поперечной волны (V_s) западного участка профиля 1 (рис. 4) составляют 375 м/с, в то время как восточный участок показывает низкую скорость около 297 м/с. Скорость увеличивается с глубиной. В середине профиля 1 первый слой оценивался примерно в 6 метров, уменьшаясь до примерно 2,86 метров в восточном участке профиля. В то же время профиль 3 имеет низкую скорость поперечной волны в первом слое глубиной около 5 метров вдоль профиля 3, и эта глубина увеличивается в северном направлении. Первый слой профиля 2 демонстрирует низкую скорость поперечной волны от поверхности до глубины одного метра (рис. 4). В то время как скорость резко возрастает более чем на 900 м/с после глубины в 2 метра, причем скорость



продолжает увеличиваться с глубиной. Низкая скорость поперечной волны для первого слоя профиля 4 составляет 365 м/с в северной части на глубинах от 0 до 2,7 метров. Скорость поперечной волны для южной части профиля 4 снижается во втором слое на глубине около 2–5 метров. В то время как скорость вновь увеличивается после глубины 5 метров и определяется 640 м/с на глубине 5 метров. Скорость поперечной волны профиля 5 показывает 347 м/с на глубине 18 метров. В то время как скорость немного увеличивается до примерно 600 м/с для глубин от 18 до 30 метров. Профиль 6, по-видимому, имеет низкую скорость поперечной волны 360 м/с или менее для глубин от 0 до 4 метров. В южной части профиля 6 скорость увеличивается с глубиной значительно по сравнению с северной частью профиля. Согласно Единому строительному кодексу (УВС 1997), твердая порода классифицируется со скоростью поперечной волны выше 1500 м/сек, в то время как обычная порода оказывается в диапазоне от 760 до 1500 м/сек, тогда как для пластов мягких пород характерна низкая скорость поперечной волны от 360 до 760 м/сек. В результате профиль грунта под исследуемой территорией состоит из геологических образований от обычных до мягких пород. Характерный период участка (или доминирующая частота участка T_s), который зависит от толщины основания (H) и скорости поперечной волны (V_s) грунта, указывает период вибрации с наиболее значительным потенциалом усиления. Измерения вибраций окружающей среды были проанализированы для определения реакции спектрального соотношения на каждой площадке. Пример средних спектров Фурье для выбранных окон и связь между доминирующей частотой на участке и коэффициентом усиления (спектральным коэффициентом) представлены на рисунках 5 и 6. Значение доминирующей собственной частоты (F_0) варьируется от 7 до 11 Гц, как показано на рисунках 5 и 6. Во избежание резонансных явлений, значения основных собственных частот предлагаемых зданий и сооружений (F_b) на исследуемой территории не должны быть близки к значениям доминирующей частоты участка (F_0).

4. Заключение.

Многоканальный анализ поверхностных волн (МАПВ) является ценным геофизическим инструментом для определения различных характеристик недр и скоростно-глубинного моделирования, в то время как метод наблюдения за микротолчками является быстрым, экономически эффективным и предсказуемым инструментом, альтернативным для инженерных целей. На основе скоростной модели вариаций S-волн (V_s) под исследуемой территорией были обнаружены сейсмические зоны с низкими скоростями поперечных волн (V_s) в диапазоне от 300–650 м/с до умеренно высоких скоростей в диапазоне от 700–1200 м/с. Значения средней скорости поперечных волн (V_s) для верхних 30 м глубины обозначены как VS_{30} и указывает на то, что тип профиля почвы C присутствует по всему исследуемому участку. Тем не менее, профиль 5 почти классифицируется как тип D с V_s примерно 347 м/с на глубине 18 метров. Результаты скорости поперечной волны указывают на наличие умеренно твердо-мягкой породы и очень жесткого/очень плотного грунта; таким образом, она оценивается как грунт, подходящий для инженерных и строительных целей. Измерения вибраций окружающей среды определили спектральный коэффициент реакции участка, где преобладающая собственная частота (F_0) варьируется от 7 до 11 Гц. Во избежание резонансных явлений, проектировщик должен тщательно учитывать значения основных собственных частот предлагаемых зданий и сооружений (F_b) на исследуемом участке, которые не должны быть близки к значениям преобладающей частоты участка (F_0).

Благодарность

Измерения данных МАПВ и микротолчков были выполнены с использованием геофизических инструментов Центра городского планирования и снижения риска стихийных бедствий Национального университета Ан-Наджа в Наблусе, Палестина. Авторы выражают благодарность за сотрудничество и поддержку в проведении полевых работ.



Список литературы /References.

1. El-Kelani R. Arraf Sh. The Historical Earthquakes in the Dead Sea Rift Region. *Journal of Geographical Researches*, 2021, Vol. 33, P. 120-175.
2. El-Isa Z.H. The instrumental seismicity of the Jordan Dead Sea transform. *Arab J Geosci.*, 2017, Vol. 10, No. 9, P. 1-11. doi: 10.1007/s12517-017-3000-6.
3. Jardaneh, I. Evaluation of Ground Response Due to Earthquakes- Case Study. *Journal of Applied Sciences*, 2004, 4 (3): P. 364-368.
4. Al-Dabbeek J. El-Kelani R. Rapid Assessment of Seismic Vulnerability in Palestinian Refugee Camps. *Journal of Applied Sciences*, 2008, Vol. 8, P: 1371-1382.
5. El-Kelani R. Jardaneh I. Surface Soil Effects Study Using Microtremor Observations in Nablus City, Palestine. *The Islamic University Journal (Natural Studies and Engineering)*, 2011, Vol. 19, No. 2, P. 99-112.
6. Benson R. Yuhr L. Site Characterization Strates: Old and New. *Second Annual Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities*, Federal Highway Administration, 2002, P. 15-19.
7. Goldstein N. Expedited Site Characterization Geophysics: Geophysical Methods and Tools for Site Characterization. *Department of Energy by Lawrence Berkeley Laboratory, Univ. of California*, 1994, 124 p.
8. Borcherdt R.D. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthq. Spectra*, 1994, Vol. 10, P. 617–653.
9. Subramaniam P. Yunhuo Z. Yannick Y.C.H. Danovan W. Modal analysis of Rayleigh waves using classical MASW-MAM approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, Vol. 128, P. 1-11. doi.org/10.1016/j.soildyn. 105902.
10. Mohammeda M.A. Abudeifa A.M. Abd el-aal A.K. Engineering geotechnical evaluation of soil for foundation purposes using shallow seismic refraction and MASW in 15th Mayo, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, Vol. 162, P. 1-13. doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103721.
11. Park C.B. Miller R.D. Xia J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 1999, Vol. 64 (3), P. 800–808.
12. Nakamura Y.A. Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report, Railway Tech. Res. Institute*, 1989 Vol. 1, P. 25-33.
13. Bauer R.A. Kiefer J. Hester N. Soil amplification maps for estimating earthquake ground motions in the Central US. *Eng. Geol.*, 2001, Vol. 62, P. 7-17.
14. Hunter J. Woeller D. Addo K. Luternauer J. Pullan S. Application of shear wave seismic techniques to earthquake hazard mapping in the Fraser River delta, British Columbia. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. Society of Exploration Geophysicists, 1993, P. 501–503. https://doi.org/10.1190/1.1822533.
15. Tinsley J. Fumal T. Mapping Quaternary sedimentary deposits for areal variations in shaking response. *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Ron-An, Earth Science Perspective*, 1985, No. 1360. P. 101-126. https://doi.org/10.3133/pp1360.
16. Borcherdt R.D. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthq. Spectra*, 1994, Vol. 10, 617-653.
17. Rofe and Raffely Consulting engineers, Geological and hydrological report, Jordan Central. Water Authority, 1963, 79 p.
18. Gutierrez C. Singh K.A Site Effects Study in Acapulca, Guerrero, Mexico: Comparison of Results from Strong Motion and Microtremor Data. *Bull Seismol. Soc. Am.*, 1992 Vol. 82, P. 642-659.
19. Kanlı A. Tildy P. Prónay Z. Pınar A. Hermann L. VS 30 mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinarregion, SW Turkey. *Geophys. J. Int.*, 2006, Vol. 165, P. 223-235.
20. Dobry R. Borcherdt R. Crouse C. Idriss I. Joyner W. Martin G.R. Power M., Rinne E. Seed R. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. *Earthq. Spectra*, 2000, Vol. 16, 41–67.



21. Seo K. Application of microtremors to earthquake damage scenarios- lesson learned from recent damaging earthquakes, In Proc. of 11th World Conf. on Earthq. Eng., 1996, Paper No. 2062.

