



Специализированное инженерно-геологическое судно «Изыскатель-3» ООО «Моринжгеология» при проведении инженерно-геологических работ в акватории Каспийского моря

## ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

### ТРИФОНОВ Б.А.\*

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия, igelab@mail.ru

Адрес: Уланский пер., д. 13, стр. 2, а/я 145, г. Москва, 101000, Россия

### МИНДЕЛЬ И.Г.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия

### СЕВОСТЬЯНОВ В.В.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия, igelab@mail.ru

### МИЛАНОВСКИЙ С.Ю.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия, svetmil@mail.ru

Адрес: ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

### НЕСЫНОВ В.В.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия, igelab@mail.ru

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 22.05.2019 / Принята к публикации 24.06.2019 / Дата публикации 28.06.2019

© ООО «Геомаркетинг», 2019

**Аннотация:** на участках расположения морских платформ, подводных трубопроводов и т.п., расположенных на морских акваториях, при проведении сейсмического микрорайонирования (СМР) по методу сейсмических жесткостей, а также для построения геосейсмических моделей, необходимых при определении параметров ожидаемых сейсмических воздействий с учетом грунтовых условий, требуется информация о скоростях поперечных волн ( $V_s$ ) в донных отложениях. Определение скоростей поперечных волн на морских акваториях сопряжено с большими трудностями, а часто практически невозможно. В этих случаях проводится определение значений  $V_s$  в песчано-глинистых грунтах по результатам лабораторных испытаний. При лабораторных испытаниях исследуется влияние динамического характера нагружения на параметры прочности и деформируемости грунтов. При этом определения  $V_s$  проводятся на ультразвуковых частотах, как правило, в образцах нарушенной структуры. Ishihara K. отмечает, что величины модулей, определенные в результате лабораторных испытаний, оказываются меньше, чем измеренные методом сейсмического каротажа в естественных условиях. Он связывает это явление с потерей части жесткости, утраченной из-за нарушения структуры при отборе, транспортировании и подготовки образцов для испытаний в лаборатории. Основываясь на выводах, которые сделаны в работах K. Ishihara, S. Nakanishi, Ken Gavin и других исследователей, авторы построили корреляционные зависимости между значениями модуля сдвига ( $G_0$ ) по данным сейсмоакустики и величиной сопротивления погружению конуса зонда ( $q_c$ ) по результатам статического зондирования. Показано, что для четвертичных песчано-глинистых грунтов, залегающих в естественном состоянии, можно успешно определять значения скоростей поперечных волн по результатам инженерно-геологических испытаний на основе полученных корреляционных зависимостей между удельным сопротивлением грунта под конусом зонда и динамическим модулем сдвига ( $G_0$ ). В условиях морских акваторий способ оценки  $V_s$  по данным статического зондирования является наиболее надежным по сравнению с другими способами косвенной оценки.

**Ключевые слова:** скорость поперечных волн; модуль сдвига; сопротивление грунта под конусом зонда; песчано-глинистые грунты; акватория северо-западной части Каспия; лабораторные испытания образцов; вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП); графики связи

**Ссылка для цитирования:** Трифонов Б.А., [Миндель И.Г.], Севостьянов В.В., Милановский С.Ю., Несынов В.В., 2019. Оценка значений скоростей поперечных волн в четвертичных песчано-глинистых грунтах по результатам статического зондирования. Инженерные изыскания, Том XIII, № 3, с. X–X, <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-3-xx-xx>.

# ESTIMATION OF SHEAR WAVE VELOCITIES IN QUATERNARY SANDY-CLAY SOILS FROM STATIC CONE PENETRATION TEST

**BORIS A. TRIFONOV\***

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy  
of Sciences, Moscow, Russia, igelab@mail.ru  
Address: Bld. 13, Pde 2, P.O. box 145, Ulansky Ln., 101000, Moscow,  
Russia*

**ISAAK G. MINDEL**

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy  
of Sciences, Moscow, Russia*

**VASILY V. SEVOSTYANOV**

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy  
of Sciences, Moscow, Russia, igelab@mail.ru*

**SVYATOSLAV Yu. MILANOVSKIY**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia, svetmil@mail.ru  
Address: Bld. 10, Pde 1, Bolshaya Gruzinskaya St., 123242, Moscow,  
Russia*

**VYACHESLAV V. NESYNOV**

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy  
of Sciences, Moscow, Russia, igelab@mail.ru*

*Original paper*

*Received 22 May 2019 / Accepted 24 June 2019 / Published 28 June 2019*

*© "Geomarketing" LLC, 2019*

**Abstract:** for offshore platforms, underwater pipelines, etc., located in marine areas during seismic micro zoning (SMZ) using the seismic stiffness method, as well as to build geoseismic models necessary for determining the parameters of expected seismic effects, taking into account ground conditions, the information is required about velocity of the shear waves ( $V_s$ ) in bottom sediments. The determination of shear wave velocities in marine areas is very difficult, and often practically impossible. In these cases,  $V_s$  values are determined in sandy-clay soils according to the results of laboratory tests. In laboratory tests, the influence of the dynamic nature of loading on the parameters of strength and soil deformability is investigated. In this case,  $V_s$  determinations are carried out at ultrasonic frequencies, as a rule, in samples with disturbed structure. K. Ishihara notes that the module values determined as a result of laboratory tests are less than those measured by the method of seismic logging in natural conditions. He associates this phenomenon with partial loss of the stiffness, lost due to structural failure during the selection, transportation and preparation of samples for testing in the laboratory. Based on the conclusions by K. Ishihara, S. Nakanishi, Ken Gavin and other, the authors constructed correlation dependences between the values of shear modulus ( $G_d$ ) according to seismic acoustics and the value of cone resistance ( $q_c$ ) based on the results of Static Cone Penetration Test. The article shows that for Quaternary naturally bedding sandy-clay soils, it is possible to successfully determine the values of shear wave velocities from the results of engineering-geological tests based on the obtained correlation dependencies between cone resistance ( $q_c$ ) and dynamic shear modulus ( $G_d$ ). For marine conditions, this method of estimating  $V_s$  from static testing data is the most reliable in comparison with other methods of indirect estimation.

**Key words:** shear wave velocity; shear modulus; cone resistance; sandy clay soils; water area of the Northwest Caspian Sea; laboratory testing of samples; vertical seismic profiling (VSP); communication graphs

**For citation:** Trifonov B.A., [Mindel I.G.], Sevostyanov V.V., Milanovskiy S.Yu., Nesynov V.V., 2019. Estimation of shear wave velocities in quaternary sandy-clay soils from static cone penetration test. *Engineering Survey*, Vol. XIII, No. 3, pp. X–X, <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-3-xx-xx>.

При проведении сейсмического микрорайонирования (СМР) по методу сейсмических жесткостей, а также для построения геосейсмических моделей, необходимых при определении параметров ожидаемых сейсмических воздействий с учетом грунтовых условий (расчетный метод СМР), надо иметь значения скоростей не только продольных ( $V_p$ ), но и поперечных ( $V_s$ ) волн согласно СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах». На территориях городов и населенных пунктов, на площадках строительства промышлен-

ных, энергетических, транспортных и др. объектов, ответственных зданий и сооружений значения скоростей упругих волн обычно определяются наземными и скважинными исследованиями сейсморазведочного типа, такими как метод преломленных волн (МПВ), вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), метод общей глубинной точки (ОГТ), которые хорошо зарекомендовали себя в практике инженерных изысканий<sup>1</sup> [4].

Сложнее дело обстоит в тех случаях, когда определение скоростей поперечных волн ( $V_s$ ) сопряжено с большими

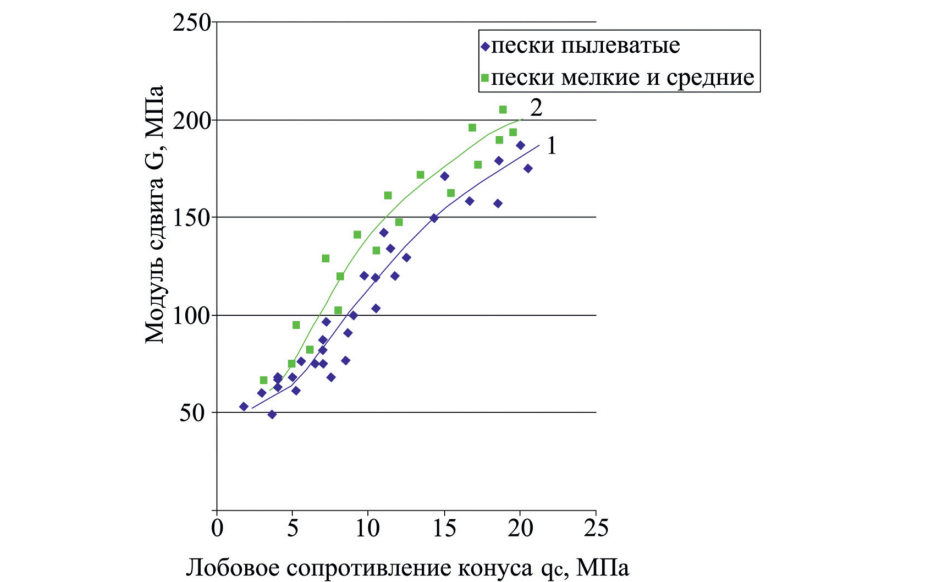
трудностями, а часто практически невозможно. Такими примерами могут служить участки расположения морских платформ, подводных трубопроводов и т.п., расположенных на морских акваториях, где требуется информация о скоростях поперечных волн донных отложений. Обычно в этих случаях проводится определение значений  $V_s$  в песчано-глинистых грунтах по результатам лабораторных испытаний по СП 11-114-2004 «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства нефтегазопромысловых сооружений». При лабораторных испытаниях

<sup>1</sup> Сейсморазведка. Справочник геофизика, 1990. Том I, II. Под редакцией В.П. Номоконова. Недра, Москва.

исследуется влияние динамического характера нагружения на параметры прочности и деформируемости грунта. Лабораторные определения  $V_s$  проводятся на ультразвуковых частотах, как правило, в образцах нарушенной структуры. Формирование образцов для лабораторных испытаний осуществляется из сухого материала (грунт, отобранный из отложений морского дна, предварительно высушивается), затем проводится их водонасыщение. Такая методика лабораторных испытаний образцов, на взгляд авторов, не полностью моделирует условия залегания исследованных грунтов в массиве морского дна, расположенного ниже уровня моря.

Динамические испытания образцов песчано-глинистых грунтов, залегающих в основании нефтяных платформ в северной и центральной частях Каспия, проводились Институтом геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) и ООО «ВНИИГ-Диагностика сооружений» для решения задач СМР. Были использованы результаты динамических испытаний, которые проведены на участках расположения объектов обустройства месторождения им. В. Филановского (семь стационарных платформ) в северной части Каспийского моря в 2009 и 2012 гг. Испытания образцов песчаных и глинистых грунтов проводились с использованием прибора английской фирмы «Wuksam Fagrance». Как отмечалось выше, испытания несвязных и слабосвязных грунтов (песков и супесей) проводились на образцах нарушенной структуры. Формирование образцов осуществлялось из сухого материала и затем проводилось водонасыщение, что не полностью соответствует условиям залегания исследованных грунтов в массиве. Испытуемые образцы песков и супесей после насыщения и консолидации имели плотность скелета  $1,58-1,60 \text{ г/см}^3$  и относительную влажность  $20-22\%$ . В расчетной модели грунтового основания объектов обустройства месторождения им. В. Филановского приводятся значения объемных плотностей песков разной крупности и супесей, лежащие в диапазоне  $\rho = 1,91-1,98 \text{ г/см}^3$ .

Результаты динамических испытаний на образцах грунтов были получены путем измерения динамического модуля сдвига  $G_d$  при различных объемных давлениях ( $\sigma_{\text{эф}}$ ), моделирующих условия нахождения грунтов на глубине изучения ниже дна моря. Максимальные значения  $\sigma_{\text{эф}}$  не превышали  $0,14 \text{ МПа}$  для песков, что соответствует глубине  $7-10 \text{ м}$ , для



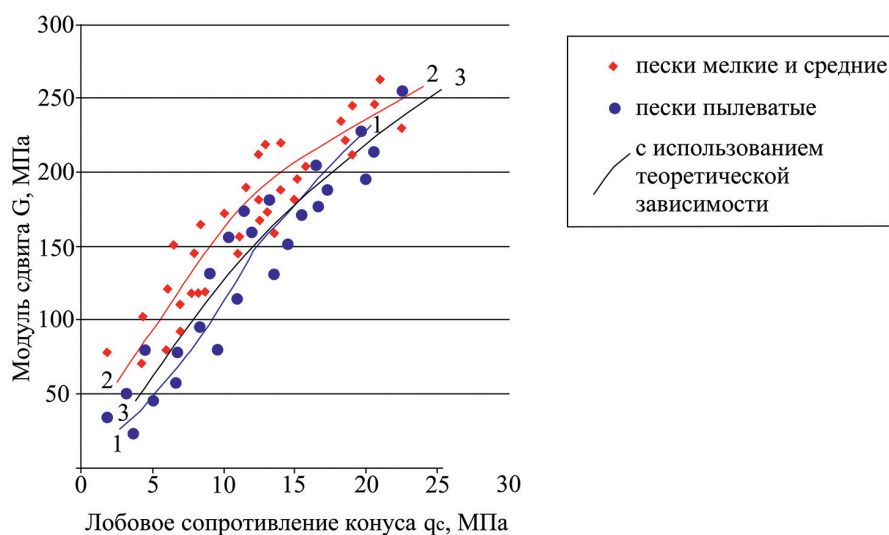
**Рис. 1.** Графики корреляционной зависимости между значениями модуля сдвига  $G_d$  (результаты сейсмоакустики) и величинами удельного сопротивления грунта под конусом зонда  $q_c$  (данные статического зондирования) получены для верхней  $15-20 \text{ м}$  толщи маловлажных четвертичных песков пылеватых (1), мелких и средних (2)  
 Fig. 1. Graphs of the correlation between the values of the shear modulus  $G_d$  (seismic acoustic data) and the values of the soil penetration resistance  $q_c$  (static cone penetration test) were obtained for the upper  $15-20 \text{ m}$  of low-moisture Quaternary silty sands (1), small and medium sands (2)

супесей  $0,30 \text{ МПа}$  (около  $15 \text{ м}$ ) и  $0,40 \text{ МПа}$  (около  $20 \text{ м}$ ) для глин. Глубины моря на изучаемой территории не превышали  $7-10 \text{ м}$ . В каждом конкретном случае учитывалось давление столба воды. Эти величины входили в задаваемые значения  $\sigma_{\text{эф}}$ . Скорости поперечных волн ( $V_s$ ) пересчитывались по значениям модуля сдвига с учетом плотности.

По результатам лабораторных исследований грунтов осадочной толщи морского дна были получены, как представляется авторам, невысокие (несколько заниженные) значения  $V_s$ . Так, для песчаных грунтов получены  $V_s = 105-225 \text{ м/с}$  при моделируемых напряжениях  $\sigma_{\text{эф}} = 20-140 \text{ кПа}$ , что соответствует глубинам  $1-7 \text{ м}$  от дна моря, и для супесей  $V_s = 100-220 \text{ м/с}$  при  $\sigma_{\text{эф}} = 20-295 \text{ кПа}$  (глубины  $1-15 \text{ м}$ ). В глинах от мягкопластичной до полутвердой консистенций ( $\rho = 1,89 \text{ г/см}^3$ ) на моделируемых глубинах  $0-10 \text{ м}$  иногда были получены невысокие значения  $V_s = 78-105 \text{ м/с}$ . Многолетние сейсморазведочные исследования авторов на глинистых грунтах, залегающих ниже уровня грунтовых вод (УГВ), показывают, что такие невысокие значения  $V_s \leq 100 \text{ м/с}$  обычно характерны для текучепластичных глинистых отложений и ближе всего к глинистым илам с объемным весом  $\rho = 1,49-1,69 \text{ г/см}^3$ . Ishihara K. в своей книге [8] также отмечал, что в делювиальных глинах при высоких значениях модуля сдвига ( $G \approx 50 \text{ МПа}$ ) величины модулей,

определенные в результате лабораторных испытаний, оказались на  $10-20\%$  меньше, чем измеренные методом сейсмического каротажа в естественных условиях. Он это объяснил потерей части жесткости, утраченной из-за нарушения структуры при отборе, транспортировании и подготовке образцов для испытаний в грунтовой лаборатории. Все сказанное выше указывает на то, что следует весьма осторожно подходить к оценке значений скоростей поперечных волн по результатам только лабораторных испытаний на образцах.

В экспериментально-теоретических работах K. Ishihara, S. Nakanishi, Ken Gavin и других исследователей [7-10] рассматриваются подходы и приводятся некоторые зависимости, используя которые можно определять значения  $V_s$  по результатам статического зондирования. При этом предлагается, как наиболее перспективное направление, искать связь между величиной  $V_s$ , получаемой при статическом зондировании, и модулем сдвига ( $G_d$ ) по данным сейсмоакустики. Основываясь на выводах, которые сделаны в этих работах, авторы, используя результаты многолетних своих исследований, построили корреляционные зависимости между значениями модуля сдвига ( $G_d$ ) по данным сейсмоакустики (ВСП) и величиной лобового сопротивления конусу ( $q_c$ ), получаемой при статическом зондировании. По известной из теории упругости зависимости, зная величины



**Рис. 2.** Графики корреляционной зависимости между значениями модуля сдвига  $G_d$  (результаты сейсмоакустики) и величинами удельного сопротивления грунта под конусом зонда  $q_c$  (данные статического зондирования) получены для верхней 15–25 м толщи водонасыщенных четвертичных и меловых песков: мелких, средних (2) и пылеватых (1). Кривая 3 построена для морских песчаных отложений северной части Каспийского моря с учетом работ [7, 10]

**Fig. 2.** Graphs of the correlation between the values of the shear modulus  $G_d$  (seismic acoustic data,) and the soil penetration resistance  $q_c$  (static cone penetration test) were obtained for the upper 15–25 m of Quaternary and Cretaceous water saturated sandy stratum: small and medium sands (2) and silty sands (1). Curve 3 obtained for marine sandy sediments of the northern part of the Caspian Sea, taking into account the works [7, 10]

модуля сдвига  $G_d$  и объемного веса  $\rho$ , рассчитываются значения  $V_s$ .

На рис. 1 и 2 приведены экспериментально полученные графики связи, обобщенные для четвертичных (аллювиальных и флювиогляциальных) и меловых песков сухих пылеватых (21 парное определение), мелких и среднезернистых (30 парных определений) и водонасыщенных (35 парных определений для пылеватых и 35 для средних с мелкими). Анализировались результаты проведенных исследований песчано-глинистых грунтов, слагающих территории Москвы и высокие террасы реки Б. Черемшан в г. Дмитровграде. Графики корреляционных зависимостей между значениями динамического модуля сдвига ( $G_d$ ) и величиной удельного сопротивления грунта под конусом зонда ( $q_c$ ) построены на основе парных определений по результатам инженерно-геологических полевых испытаний (статическое зондирование) и сейсмоакустики.

При рассмотрении рис. 1 и 2 видно, что при малых значениях  $q_c < 5$  МПа экспериментальные точки для пылеватых песков (1) аппроксимируются до-

статочно хорошо графиком степенной функции от 5 до 10 МПа для пылеватых, мелких и средних (2) маловлажных и водонасыщенных песков, зависимость близка к линейной с коэффициентами корреляции, соответственно, 0,53 и 0,50 для маловлажных, 0,55 и 0,58 для водонасыщенных. При возрастании значений  $q_c$  более 10 МПа графики корреляционных зависимостей приближаются к логарифмической функции. При этом с ростом  $q_c$  значения  $G_d$  также возрастают неравномерно: для рыхлых песков менее интенсивно в области малых значений  $q_c \leq 5$  МПа ( $G_d < 50$ –60 МПа для сухих и  $G_d < 30$ –50 МПа для водонасыщенных) и более заметно в срединной части графиков, где значения  $q_c$  относятся к пескам средней плотности и плотным. Так при  $5 \leq q_c \leq 15$  МПа значения  $G_d$  возрастают от 50–60 МПа до 150–170 МПа в сухих песках и несколько выше от 30–50 МПа до 170–200 МПа в водонасыщенных. При возрастании величины удельного сопротивления грунта под конусом зонда ( $q_c$ ) более чем 15 МПа (пески повышенной плотности при  $q_c > 15$  МПа) сравнительный

рост значений  $G_d$  замедляется, что хорошо видно на рис. 1 и 2.

Для сухих песков (см. рис. 1) в области малых значений  $q_c$  и  $G_d$  прослеживается закономерность сближения аппроксимирующих графиков и расхождение их при водонасыщении (см. рис. 2). Обратная закономерность прослеживается в области высоких значений  $q_c > 15$ –20 МПа при  $G_d > 170$ –200 МПа для сухих и  $G_d > 200$ –250 МПа для водонасыщенных.

Все графики корреляционных зависимостей для водонасыщенных песков располагаются выше графиков для маловлажных песков при  $q_c > 5$  МПа.

На рис. 3 приведены экспериментально полученные графики для четвертичных глинистых грунтов от мягкопластичной до тугопластичной консистенции (34 парных значений для глин и 24 для суглинков). Графики для глин и суглинков показаны соответственно синим и зеленым цветами.

Экспериментальные точки на рис. 3 можно с большой долей вероятности описать кривыми логарифмической функции. При малых значениях  $q_c$  графики связи для суглинков и глин практически совпадают (сближаются) и с возрастанием  $q_c$  расходятся. При этом, как можно видеть на рис. 3, практически всегда значения  $G_d$  в глинах превосходят значения в суглинках при прочих равных условиях.

Исследования показали, что в большинстве случаев сейсмические свойства (скорости  $V_p$  и  $V_s$ ) и вид уравнения  $G_d = f(q_c)$  в песчаных грунтах зависят прежде всего от их плотности и гранулометрического состава, а для глинистых грунтов определяющее значение приобретает их литологический состав и консистенция.

В нашей стране за последние 10–15 лет в практике инженерно-геофизических исследований при оценке в массиве деформационно-прочностных свойств песчано-глинистых грунтов по значениям упругих характеристик (скорости  $V_p$  и  $V_s$ , модули упругости  $E_d$  и сдвига  $G_d$ ) достаточно хорошо себя зарекомендовали зависимости, предложенные В.И. Бондаревым<sup>2</sup> [1] и другими авторами [5, 6]. Для массивов водонасыщенных песчано-глинистых грунтов в работах [1–3] приведены графики корреляционных зависимостей между значениями скоростей поперечных волн ( $V_s$ ) и величинами показателей деформационно-прочностных свойств. При назначе-

<sup>2</sup> Бондарев В.И., 1978. Сейсмический метод определения важнейших физико-механических характеристик нескальных грунтов. Дис. ... докт. геол.-мин. наук, Свердловский горный институт, Свердловск.

нии скоростей S-волн в слоях, глубже 10–15 м, обычно использовались зависимости между параметрами деформационных и прочностных свойств грунтов, известные в литературе и частично приведенными в СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства полевых работ».

Для построения геосейсмического разреза осадочной толщи морского дна под морскими нефтяными платформами необходимо знание значений скоростей поперечных волн ( $V_s$ ). Авторами было проведено сравнение значений  $V_s$ , полученных разными способами для объекта исследования (газово-нефтяные месторождения в северо-западной части Каспийского моря). Сравнивались результаты определения по графикам связи (рис. 1–3) с результатами лабораторных испытаний по определению динамического модуля сдвига  $G_d$  с последующим пересчетом его значений в  $V_s$ . Были использованы и другие известные в литературе зависимости [1, 2, 4] и уравнения связи для определения  $V_s$  по деформационно-прочностным показателям, которые частично приведены в

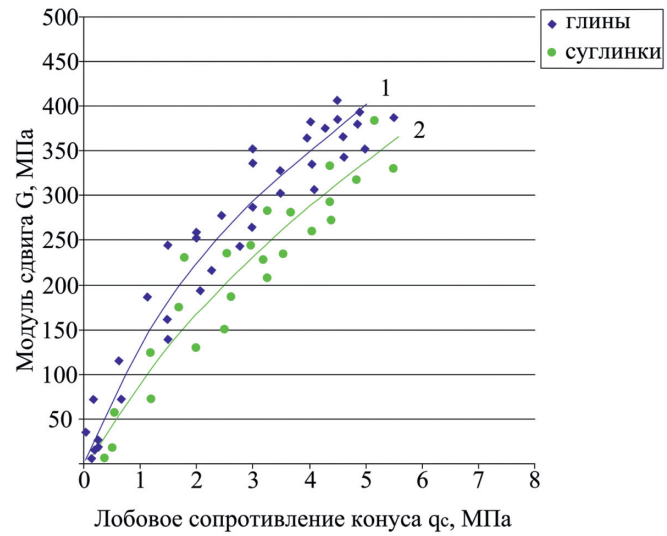


Рис. 3. Графики корреляционной зависимости между значениями модуля сдвига  $G_d$  (результаты сейсмоакустики) и величинами удельного сопротивления грунта под конусом зонда  $q_c$  (данные статического зондирования) получены для верхней 15–25 м толщи четвертичных глинистых грунтов (от мягкопластичной до тугопластичной консистенции): глины (1), суглинки (2)

Fig. 3. Graphs of the correlation between the values of the shear modulus  $G_d$  (seismic acoustic data) and the values of the soil penetration resistance  $q_c$  (static cone penetration test) were obtained for the upper 15–25 m of Quaternary clay soils (from soft plastic to stiff consistency): clay (1), clay loam (2)

СП 11-105-97, часть VI, приложение Е. Исследовались слои водонасыщенных песчано-глинистых грунтов (глубины до 20 м от поверхности дна моря). Ре-

Таблица 1  
Table 1

**Пример сравнительной оценки значений  $V_s$ , полученных по разным зависимостям для песчаных и глинистых грунтов (ниже УГВ)**

An example of comparative evaluation values  $V_s$  obtained for different dependencies for sands and clay soils (below GWL)

№ п/п	Характеристика грунтов	Глубина исследования Н, м	По графикам связи (см. рис. 1–3)		Лабораторные динамические испытания по определению $V_s$ , м/с	По графикам корреляционных зависимостей В.И. Бондарева <sup>2</sup> [1]				СП 11-105-97, часть VI, приложение Е	
			$V_s$ от $q_c$			$V_s$ от Едеф		Ед ( $V_p/V_s$ ) от Едеф		$V_s$ от Едеф	
			$q_c$ , МПа	$V_s$ , м/с		Едеф по трехосному испытанию, МПа	$V_s$ , м/с	Едеф по трехосному испытанию, МПа	$V_s$ , м/с	Едеф, МПа	$V_s$ , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Песчаные грунты ниже УГВ											
1	Пылеватые	1–3	6–8	180–200	140–170	7–12	160–200	12	190	7–12	170–210
2	Мелкие и пылеватые, плотные	7–10	14–16	290–320	180–225	26–30	270–310	26	290	26–30	290–320
3	Пылеватые и мелкие	2–5	10–12	240–270	150–190	18–20	230–280	18	240	18–20	240–260
4	Мелкие и средние, плотные	10–15	20–25	340–360	225–250	32–35	320–370	32	330	32–35	320–360
Глинистые грунты ниже УГВ											
5	Суглинок мягкопластичный	10–11	1,5–2	250–280	150–190	12–20	170–225	12	180	12–20	195–245
6	Глина тугопластичная	10–16	2–3	300–360	170–220	15–21	190–230	15	200	15–21	220–260
7	Глина и суглинок тугопластичные и полутвердые	15–20	3–4	360–400	–	20–30	200–280	20	220	20–30	250–320
8	Глина текучая (ил)	1–2	0,26–0,36	120–130	80–100	2–3	100–110	–	–	–	–

Таблица 2  
Table 2

**Пример сравнения значений Vs, полученных при прямых полевых испытаниях (сейсмоакустические исследования), с результатами определения скоростей по графикам связи**  
**An example of comparing the values of Vs obtained in direct field tests (seismic acoustic studies) with the results of determining the velocities from communication graphs**

№ п/п	Характеристика грунта	Глубина исследования, м	Плотность ρ, г/см³	С учетом графиков связи			Сейсмоакустические исследования (ВСП)	
				q <sub>c</sub> , МПа	G <sub>d</sub> , МПа	V <sub>s<sub>гс</sub></sub> , м/с	V <sub>p<sub>всп</sub></sub> , м/с	V <sub>s<sub>всп</sub></sub> , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Песчаные грунты								
1	Песок пылеватый до мелкого (ниже УГВ)	3–6	1,96	10–14	130–160	250–280	1500–1550	250–300
2	Песок средний, плотный с включением обломков до 10–15% (ниже УГВ)	12–13	2,05	25–27	260	360	1560–1600	350–400
Глинистые грунты								
3	Суглинок тугопластичный (выше УГВ)	2–4	1,99	2	150–160	260–280	600–650	300–350
4	Глина твердая с прослоями песка (ниже УГВ)	14–17	2,12	4,5–5,0	380–400	420–440	1600–1700	400–450

зультаты анализа исследований приведены в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 (столбец 5) величины Vs по результатам статического зондирования (рис. 1–3) оказались выше по значениям, чем определенные в результате лабораторных испытаний, когда моделировались внешние нагрузки (столбец 6). На площадке исследования при инженерно-геологических изысканиях было выполнено стандартное статическое зондирование по ГОСТ 20069-81 «Грунты. Метод полевого испытания статическим зондированием».

По значениям Едеф из результатов лабораторных трехосных испытаний были оценены скорости поперечных волн Vs (столбец 8) по графикам корреляционных зависимостей для песчано-глинистых грунтов из работ В.И. Бондарева<sup>2</sup> [1]. В столбце 10 приведены величины Vs, полученные при пересчете из значений Ед (модуль упругости) определенных по графикам корреляционных зависимостей между Едеф и Ед [1] с использованием значений Vp и Vp/Vs. В расчетах для четвертичных песчаных грунтов ниже УГВ значения Vp принимались равными 1500 м/с, для глинистых 1600 м/с. В табл. 1 (столбец 12) приведены значения Vs, ориентировочно определенные по уравнениям связи из приложения Е части VI СП 11-105-97 для толщ песчано-глинистых грунтов, расположенных ниже УГВ. Во

всех расчетах Vs (столбцы 8, 10, 12) использовались значения Едеф, взятые из результатов лабораторных трехосных испытаний образцов грунтов с площадки исследования.

Значения Vs из работ В.И. Бондарева<sup>2</sup> [1] в большинстве случаев не превышают значения Vs, полученные при пересчете из G<sub>d</sub> по графикам связи (см. столбец 5). Следует отметить, что самые малые значения Vs были получены при лабораторных испытаниях, когда моделировались внешние нагрузки, соответствующие σ<sub>эф</sub> для естественных условий залегания песчано-глинистых грунтов в массиве. Особенно заметна разница в значениях скоростей Vs при моделировании нагрузки на глубинах ниже 7–10 м от поверхности морского дна. В величинах Vs, полученных по зависимостям из диссертации<sup>2</sup> и [1], а также по уравнениям связи из СП 11-105-97 (см. столбцы 8, 10 и 12), не наблюдается значительного разброса значений. Эти величины Vs были приняты при построении геосейсмической модели осадочной толщи морского дна под морскими нефтяными платформами на площадке расположения объектов обустройства месторождения им. В. Филановского.

Было также проведено сравнение (сопоставление) значений Vs<sub>всп</sub>, полученных при прямых полевых испытаниях (сейсмоакустические исследования методом ВСП), с результатами определе-

ния значений скоростей поперечных волн Vs<sub>гс</sub> в четвертичных песчано-глинистых грунтах по графикам связи (см. рис. 1–3) с учетом значений q<sub>c</sub>. Пример результатов такого сравнения при инженерно-геофизических работах на участке Карамышевского гидроузла приведен в табл. 2. На территории гидроузла при инженерно-геологических исследованиях были получены значения удельного сопротивления грунта под конусом зонда при статическом зондировании (q<sub>c</sub>, МПа) и величины объемных плотностей (ρ, г/см³) во встреченных разновидностях четвертичных песчано-глинистых грунтов, слагающих инженерно-геологический разрез сооружения шлюза. По значениям q<sub>c</sub> были оценены величины G<sub>d</sub>, а с учетом значений объемных плотностей, и величины Vs<sub>гс</sub> по известной формуле теории упругости:

$$G_d = V_{s_{гс}}^2 \times \rho$$

где G<sub>d</sub> — модуль сдвига, Vs — значение скорости поперечных волн, ρ — объемная плотность.

На момент написания статьи не закончена обработка результатов определения показателей деформационно-прочностных свойств встреченных на площадке гидроузла разновидностей песчано-глинистых грунтов, значения которых входят в расчетные формулы определения Vs [1] и некоторых зависи-

мостей, частично приведенных в СП 11-105-97, часть VI, приложение Е.

По этой причине в табл. 2 приведено сравнение  $V_s$ , полученных при прямых полевых сейсмоакустических испытаниях (ВСП), только с результатами определения скоростей с учетом данных  $q_c$  (по графикам связи, см. рис. 1–3).


Видна хорошая сходимость (см. табл. 2) результатов определения  $V_s$  между значениями, полученными при прямых полевых сейсмоакустических испытаниях  $V_{s_{всп}}$  и  $V_{s_{гс}}$ , определяемыми по результатам инженерно-геологических исследований с учетом значений  $q_c$ . Сравнительно близкие значения  $V_{s_{гс}}$  и  $V_{s_{всп}}$ , а также результаты определения значений  $V_s$  по другим различным зависимостям, позволяют предположить, что для косвенной оценки значений  $V_s$  в песчано-глинистых грунтах, когда невозможно применять прямые методы

сейсморазведочных наблюдений, использование для этих целей результаты статического зондирования ( $q_c$ ), имеет хорошие перспективы. Опыт авторских исследований показывает, что в массиве песчано-глинистых грунтов (на глубинах до нескольких десятков метров), по построенным графикам корреляционных зависимостей (см. рис. 1–3) можно оценивать значения скоростей поперечных волн, которые пересчитываются из значений модуля сдвига ( $G_d$ , МПа).

#### Заключение

В книге К. Ishihara [8] на основе рассмотренных результатов других исследователей отмечалось, что определение скоростей поперечных волн в дисперсных грунтах по результатам только лабораторных испытаний может значительно отличаться в сторону уменьшения от геофизических измерений на том

же грунте в массиве. В ряде случаев, используя подходы, изложенные в экспериментально-теоретических работах К. Ishihara, S. Nakanishi, Ken Gavin и других исследователей, для четвертичных песчано-глинистых грунтов можно успешно определять значения  $V_s$  по результатам инженерно-геологических исследований (графики корреляционных зависимостей между значениями  $q_c$  и  $G$ , приведенными в статье).

В условиях Каспийского шельфа при небольших глубинах моря в несколько десятков метров способ косвенной оценки значений  $V_s$  в выделенных инженерно-геологических элементах по данным статического зондирования (анализ значений параметра  $q_c$ ) имеет хорошие перспективы использования и является наиболее приемлемым по сравнению с другими способами косвенной оценки  $V_s$ . 

#### Список литературы

1. Бондарев В.И., 1997. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов. Изд-во УГГА, Екатеринбург.
2. Бондарев В.И., 1974. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. Стройиздат, Москва.
3. Бондарев В.И., Писецкий В.Б., Агеев В.Н., Вербицкий Г.Г., 1976. Рекомендации по применению вертикального сейсмического профилирования в инженерно-геологических скважинах с целью оценки физико-механических свойств рыхлых грунтов. Стройиздат, Москва.
4. Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А., 2005. Сейсморазведочные методы изучения свойств грунтов в основании зданий и сооружений, в том числе после улучшения их методами инженерной подготовки. Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика, Труды Международной конференции по геотехнике, Санкт-Петербург, 2005, с. 307–311.
5. Миндель И.Г., Севостьянов В.В., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А., 2016. Особенности изучения деформационно-прочностных свойств дисперсных грунтов сейсмоакустическими методами. Геоэкология, № 5, с. 461–476.
6. Миндель И.Г., 1975. Методика сейсмоакустических исследований физико-механических свойств связанных и несвязанных грунтов. Методика геофизических исследований при инженерно-геологических изысканиях, Труды института ПНИИИС, Вып. 36, с. 3–26.
7. Gavin K., O'Kelly B., Adekunle A., Casey B., Donohue S., 2005. Use of the Cone Penetration Test to derive parameters for shallow foundation design. Soil-Structure Interaction: Calculation Methods and Engineering Practice, Proceedings of the International Conference, Saint-Peterburg, 2005, Vol. 1, pp. 455–460.
8. Ishihara K., 1996. Soil behaviour in earthquake geotechnic. Oxford University Press, USA.
9. Oqura K., Nakanishi S., 1980. Development of the suspension S-wave logging system. OYO Corporation Technical Report, No. 2, pp. 37–50.
10. Schnaid F., Lehane B.M., Fahey V., 2004. In situ test characterization of unusual geomaterials. In Viana da Fonseca A., Mayne P. (eds.), Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterization (ISC-2), Porto, Portugal, Vol. 1, pp. 49–75.

#### References

1. Bondarev V.I., 1997. Seismic method for determining the physicommechanical properties of non-rock soils. Publishing house of the Ural State Mining and Geological Academy, Yekaterinburg. (in Russian)
2. Bondarev V.I., 1974. Recommendations on the use of seismic exploration for the study of physical and mechanical properties of loose soils in natural occurrence for construction purposes. Stroyizdat, Moscow. (in Russian)
3. Bondarev V.I., Pisetsky V.B., Ageev V.N., Verbitsky G.G., 1976. Recommendations for the use of vertical seismic profiling in geotechnical wells to assess the physicommechanical properties of loose soils. Stroyizdat, Moscow. (in Russian)
4. Mindel I.G., Trifonov B.A., Ragozin N.A., 2005. Seismic methods for studying the properties of soils at the base of buildings and structures, including after improving them using engineering training methods. The interaction of structures and foundations: calculation methods and engineering practice, Proceedings of the International Conference on Geotechnics, Saint-Petersburg, 2005, pp. 307–311. (in Russian)

5. Mindel I.G., Sevostyanov V.V., Trifonov B.A., Ragozin N.A., 2016. The study of deformability and strength of fine-grained soils by seismoacoustic methods. *Environmental Geoscience*, No. 5, pp. 461–476. (in Russian)
6. Mindel I.G., 1975. Methods of seismic acoustic studies of the physico-mechanical properties of cohesive and non-cohesive soils. *Methods of geophysical research in engineering-geological surveys*, Proceedings of the Geological Research Institute for Construction (PNIIS), Vol. 36, pp. 3–26. (in Russian)
7. Gavin K., O’Kelly B., Adekunle A., Casey B., Donohue S., 2005. Use of the Cone Penetration Test to derive parameters for shallow foundation design. *Soil-Structure Interaction: Calculation Methods and Engineering Practice*, Proceedings of the International Conference, Saint-Peterburg, 2005, Vol. 1, pp. 455–460.
8. Ishihara K., 1996. *Soil behaviour in earthquake geotechnic*. Oxford University Press, USA.
9. Oqura K., Nakanishi S., 1980. Development of the suspension S-wave logging system. OYO Corporation Technical Report, No. 2, pp. 37–50.
10. Schnaid F., Lehane B.M., Fahey V., 2004. In situ test characterization of unusual geomaterials. In Viana da Fonseca A., Mayne P. (eds.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterization (ISC-2)*, Porto, Portugal, Vol. 1, pp. 49–75.

#### Информация об авторах

##### **ТРИФОНОВ БОРИС АФАНАСЬЕВИЧ**

Ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

##### **МИНДЕЛЬ ИСААК ГЕНРИХОВИЧ**

Ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.т.н., г. Москва, Россия

##### **СЕВОСТЬЯНОВ ВАСИЛИЙ ВСЕВОЛОДОВИЧ**

Заведующий лабораторией инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

##### **МИЛАНОВСКИЙ СВЯТОСЛАВ ЮРЬЕВИЧ**

Ведущий научный сотрудник лаборатории прикладной геомеханики отделения планетарной геофизики и геодинамики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, к.ф.-м.н., г. Москва, Россия

##### **НЕСЫНОВ ВЯЧЕСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ**

Ведущий инженер лаборатории инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия

#### Information about the authors

##### **BORIS A. TRIFONOV**

Leading research scientist of the Laboratory Engineering Geophysics and Seismic Microzonation, of Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

##### **ISAAK G. MINDEL**

Leading research scientist of the Laboratory Engineering Geophysics and Seismic Microzonation, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Technics), Moscow, Russia

##### **VASILY V. SEVOSTYANOV**

Head of the Laboratory Engineering Geophysics and Seismic Microzonation, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

##### **SVYATOSLAV Yu. MILANOVSKIY**

Leading research scientist of the Laboratory of Applied Geomechanics, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Physics and Mathematics), Moscow, Russia

##### **VYACHESLAV V. NESYNOV**

Leading engineer of the Laboratory Engineering Geophysics and Seismic Microzonation, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia



Из фототеки А.С. Локтева