

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

**В.К. Хохлов, И.А. Кандидатов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
e-mail: ivan.kandidatov@gmail.com

*На основе модели распространения сейсмических колебаний в грунте проанализировано решение дифференциального уравнения движения грунта. Показано, что затухание и собственная частота колебаний грунта зависят от упругих и вязких свойств среды, влияние которых на характеристики сейсмических сигналов, в свою очередь, проанализировано на моделях сейсмического приемника и распространения сейсмических колебаний в грунте. Показано, что при повышении влажности увеличивается присоединенная масса источника сейсмических волн, следовательно, меняется и собственная частота колебаний системы грунт-излучатель, введенная в модели. Также показано, что наиболее информативным параметром климатических условий применения является влажность грунта. Показана необходимость введения в сейсмическую систему распознавания адаптивного канала для функционирования системы в широком диапазоне климатических параметров.*

**Ключевые слова:** сейсмический сигнал, климатические условия, влажность грунта, полоса сигнала.

## STUDYING THE INFLUENCE OF SOIL PROPERTIES ON SEISMIC SIGNAL CHARACTERISTICS

**V.K. Khokhlov, I.A. Kandidatov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
e-mail: ivan.kandidatov@gmail.com

*A solution to the differential equation of soil motion is analyzed using the model of seismic vibration propagation in the soil. It is shown that damping and eigenfrequency of the soil vibration depend on the medium's elastic and viscous properties, the influence of which on seismic signal characteristics, in turn, is analyzed using models of the seismic receiver and the seismic vibration propagation in the soil. It is shown that when the dampness increases, the attached mass of the seismic-wave source grows, hence the eigenfrequency of vibrations of the soil-radiator system, which is introduced into the model, changes too. The soil dampness is shown to be the most informative parameter of climatic conditions. The necessity to introduce an adaptive channel into the seismic system recognition to provide the system functioning within a broad range of climatic parameters is shown.*

**Keywords:** seismic signal, climatic conditions, soil dampness, signal range.

Задача построения адаптивной системы распознавания сейсмосигналов в настоящее время приобретает большую актуальность, поскольку сейсмические системы могут использоваться во многих сферах человеческой деятельности, таких как охранные сигнализации, применяемые для контроля ограниченных площадей, разведывательные информационные системы и т.п. Существующие сейсмические системы распознавания работают в широком диапазоне климатических

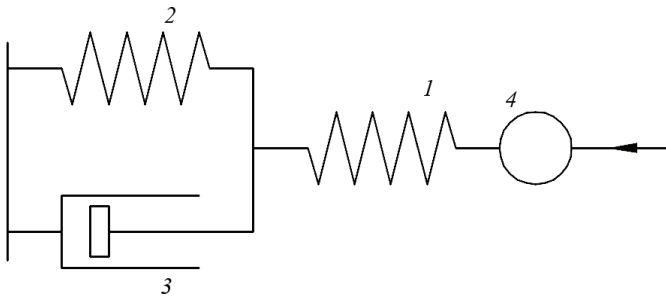
условий. Для обеспечения работоспособности сейсмических систем в требуемых условиях применения необходима адаптивная к климатическим параметрам обработка сигналов.

На распространение сейсмических волн в грунте влияют такие параметры, как влажность, температура, порозность грунта, а также его гранулометрические характеристики и химический состав [1]. Влажность грунта — одна из важных характеристик, оказывающая влияние как на частотный спектр сейсмического сигнала, так и на его амплитуду.

При решении динамических задач широко применяются методы моделирования, основанные на замене реальных грунтов некоторыми моделями, учитывающими основные свойства грунтов. Такими свойствами грунтов являются упругость, вязкость, пластичность. Поскольку реальные тела имеют одновременно упругие, вязкие и пластические свойства, модели для них строятся путем последовательного или параллельного соединения нескольких простейших элементов.

При вибрационных нагрузках сравнительно небольшой интенсивности с напряжениями и ускорениями, не превышающими предела упругости и порога виброуплотнения, грунты испытывают в основном упругие деформации, поэтому моделью среды могут служить параллельно соединенные упругость, масса, соответствующая объему породы, примыкающей к излучателю, и активное сопротивление, противодействие которого пропорционально скорости смещения частиц среды. Как показано в ряде работ [2], эта модель хорошо отражает основные особенности поведения грунтов под действием вибрационных нагрузок. Для решения динамических задач при интенсивных импульсных нагрузках наибольшее распространение получили упруговязкие модели, учитывающие лишь упругие и вязкие свойства грунтов. Связано это со сложностью учета пластичности грунтов, а также с тем, что упруговязкие модели позволяют во многих случаях получать удовлетворительное совпадение расчетных и теоретических данных.

Наибольшее распространение получила линейная упруговязкая модель среды, состоящая из пружины 1, к которой присоединены упругий и вязкий элементы 2 и 3, соединенные параллельно (рис. 1). Однако эта модель не учитывает сил инерции грунта, взаимодействующего с излучателем, и рабочей плиты излучателя, которые участвуют в движении и оказывают влияние на характер протекающих процессов. Для учета этих сил к элементу 1 присоединим массу 4, включающую в себя массы рабочего элемента излучателя и некоторого объема грунта, участвующего в движении. Полученную модель будем называть линейной упруговязкой инерционной моделью грунта. Под действием внешних динамических нагрузок она работает следующим образом.



**Рис. 1. Реологическая модель грунта**

В момент приложения силы происходит сжатие пружины 1, что соответствует деформированию реальных грунтов, наблюдаемому при работе излучателей.

Чаще всего предполагают, что деформация пружины 1 носит упругий характер и она связана с напряжением законом Гука:

$$\varepsilon_1 = \sigma / E_1,$$

где  $E_1$  — модуль упругости пружины 1, соответствующий модулю упругости среды при динамических нагрузках;  $\sigma$  — напряжение, развиваемое излучателем.

В общем случае деформации  $E_1$  могут носить неупругий характер и определяться как сумма упругих и остаточных деформаций.

В момент приложения нагрузки пружина 2 не деформируется, так как ее сжатию препятствует демпфер 3 (см. рис. 1). По мере действия нагрузки происходит деформирование и упруговязкого элемента модели. Если обозначить его смещение  $\varepsilon_2$ , то зависимость между деформацией и напряжением для упруговязкого элемента модели будет

$$\sigma = E_2 \varepsilon_2 + \eta \dot{\varepsilon}_2,$$

где  $E_2$  — модуль упругости пружины 2;  $\eta$  — вязкость грунта, т.е. коэффициент пропорциональности между силой сопротивления демпфера и скоростью деформации среды.

Общая деформация элемента грунта определяется по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2.$$

Рассмотренная модель достаточно полно отражает поведение неводонасыщенных грунтов под действием сил, характерных для существующих импульсных поверхностных источников сейсмических колебаний, и может быть использована для создания основ теории излучателей.

Интенсивность и форма начального импульса сейсмического колебания зависят от ряда факторов, в том числе от характера взаимодействия излучателя с грунтом и значения действующей на грунт

силы. Рабочий излучающий элемент любого импульсного излучателя может быть представлен в виде жесткой, несжимаемой плиты, которая воздействует на поверхность грунта, выводя определенный объем его из положения равновесия. Время взаимодействия рабочей плиты импульсного излучателя с грунтом оказывается небольшим, однако скорость движения контактирующих тел изменяется на конечную величину, и среде передается определенная часть энергии, которая расходуется на образование упругих и неупругих остаточных деформаций. Вследствие этого силы, действующие в системе плита–грунт, носят ударный характер.

Воздействие ноги человека на грунт при ходьбе и беге также является импульсным. Поэтому модель сейсмических колебаний, возникающих при движении человека, можно строить на основе теории импульсных излучателей сейсмических колебаний [2].

В теории удара в качестве меры взаимодействия тел рассматриваются не сами силы, а их импульсы:

$$I = \int_0^{t_{\text{уд}}} F_{\text{уд}} dt \approx \tilde{F} t_{\text{уд}},$$

где  $F_{\text{уд}}$  и  $\tilde{F}$  — действующая сила и средняя сила за время удара  $t_{\text{уд}}$ .

Сумма всех действующих на тело импульсов равна изменению его количества движения. Таким образом, изменение количества движения тела (точки) за время удара равно сумме всех действующих на него импульсов. Это основное уравнение теории удара.

Однако импульсы, возникающие при взаимодействии двух или нескольких тел, определяются не только массами и скоростями, но и упругими свойствами этих тел, которые характеризуются коэффициентом восстановления

$$k = \frac{u_1 - u_2}{v_1 - v_2},$$

где  $v_1, v_2$  и  $u_1, u_2$  — скорости двух взаимодействующих тел в начале и в конце удара.

Коэффициент  $k$  может меняться от единицы до нуля. При  $k = 1$  разности скоростей у обоих тел в конце и начале удара одинаковые и удар называется абсолютно упругим. При  $k = 0$  скорости соударяющихся тел в конце удара равны друг другу, тела движутся вместе и удар называется абсолютно неупругим. Для реальных грунтов коэффициент восстановления оказывается весьма небольшим ( $k = 0,1-0,2$  [2]) и для практических расчетов может быть принят равным нулю, т.е. предполагается, что при взаимодействии рабочей плиты излучателя с

грунтом удар носит неупругий характер и после него плита и прилегающие к ней слои грунта движутся вместе. В этом случае ударный импульс, действующий в системе плита–грунт, имеет вид

$$I = \frac{M_{\text{гр}}m_{\text{пр}}(v_1 - v_2)}{M_{\text{гр}} + m_{\text{пр}}},$$

где  $M_{\text{гр}}$  — масса рабочей плиты излучателя (груза ударного механизма, действующего на грунт);  $m_{\text{пр}}$  — масса грунта, вовлекаемая в движение в процессе удара (присоединенная масса грунта);  $v_1$  и  $v_2$  — скорости плиты и грунта в начале удара.

Поскольку плита ударяет по неподвижному грунту ( $v_2 = 0$ ), выражение преобразуется к виду

$$I = \frac{M_{\text{гр}}m_{\text{пр}}v_1}{M_{\text{гр}} + m_{\text{пр}}}.$$

При неупругом ударе кинетическая энергия плиты передается грунту и расходуется на его деформацию.

Рассмотрим теперь более детально характер процессов, протекающих в грунте, при ударе рабочей плиты-штампа по его поверхности. Началом удара принято считать тот момент времени  $t_1$ , когда штамп начинает двигаться вместе с прилегающими к нему частицами грунта. К этому времени штамп приобретает определенное количество движения и энергию, которые он передает грунту. Воспринимаются они некоторым объемом грунта, который находится во взаимодействии с рабочим органом излучателя и в котором развиваются упругие и неупругие деформации. В результате этого в среде возникают силы сопротивления, уменьшающие скорость движения штампа и тормозящие его. В определенный момент времени  $t_2$  скорость движения штампа падает до нуля, а деформации грунта достигают наибольших значений. Этот момент принято считать концом удара. Разность времен  $t_{\text{уд}} = t_2 - t_1$  характеризует длительность удара — время, в течение которого штамп вместе с прилегающими к нему частицами грунта проходит путь

$$l = \int_0^{t_{\text{уд}}} v(t) dt,$$

где  $v(t)$  — скорость движения штампа.

Путь  $l$  определяется интенсивностью нагрузки, физическими свойствами и деформируемостью грунта. После завершения удара плита вместе с грунтом начинает обратное движение за счет сил восстановления. На этом процесс удара заканчивается, и среда начинает совершать собственные движения, которые и приводят к образованию

упругих волн в ней. Время, в течение которого плита излучателя находится в контакте с грунтом, меняется от 20 до 40 мс. Время удара обычно меньше и не превышает  $t_{уд} \approx 10$  мс [2].

Время контакта ударного механизма импульсного излучателя с грунтом при условии упругопластической деформации грунта вытекает из уравнения сохранения энергии системы плита–грунт:

$$t_{уд} = 1,57 \frac{M_{гр} v_0}{2E p_{ср}},$$

где  $E p_{ср}$  — средняя сила реакции грунта.

Наибольшая глубина действия нагрузки, в пределах которой еще имеют место упругие и остаточные деформации пород [2], определяется как

$$h_d \approx 3,5d_{ш},$$

где  $d_{ш}$  — диаметр штампа.

Остаточные деформации, как правило, распространяются на глубину менее  $h_d$ , и при повторяющихся нагрузках локализуются в определенной части грунта, называемой активной зоной. На этом основании будем определять присоединенную массу грунта как массу пород, входящих в активную зону излучателя. Для нахождения размеров активной зоны необходимо знать ее глубину  $h_a$ , так как горизонтальные размеры ее принимаются равными диаметру плиты излучателя. Глубина этой зоны контролируется целым рядом факторов: диаметром штампа, контактными давлениями, влажностью грунта и т.д. Наибольшие значения  $h_a$  реализуются при  $\sigma = \sigma_p$  и при оптимальной влажности грунтов  $w = w_0$ . При других условиях глубина активной зоны уменьшается [3].

Для вычисления глубины активной зоны предложена формула [2]

$$h_a = \alpha B \frac{\omega}{\omega_0} \left( 1 - e^{-\beta \frac{\sigma}{\sigma_p}} \right),$$

где  $B$  — поперечный размер контактной поверхности излучателя;  $\sigma_p$  — предел прочности грунта;  $\omega$  и  $\omega_0$  — влажность грунта и ее оптимальное значение;  $\alpha$  и  $\beta$  — безразмерные коэффициенты.

Коэффициент  $\alpha$  зависит от скорости нагружения (уменьшается с ее увеличением) и принимает значения  $1,1 \leq \alpha \leq 2,0$ . Коэффициент  $\beta$  зависит от вида грунта, и для большинства связных грунтов  $\beta = 3,7$  [2].

При контактных давлениях, близких к динамическому пределу прочности пород  $\sigma = \sigma_p$ , небольших скоростях деформации и оптимальной влажности  $\omega = \omega_0$  глубина активной зоны определяется в основном диаметром штампа.

В результате взаимодействия рабочего органа излучателя с поверхностью земли определенная часть грунта деформируется, выводится из положения равновесия и начинает совершать колебательные движения, которые распространяются во все стороны от точки приложения нагрузки.

Реальный излучатель с точечным характером приложения нагрузки может быть заменен некоторым объемным источником упругих колебаний, на поверхности которого выполняется условие  $\sigma = \sigma_s$ . Размеры и форма его определяются плотностью и вязкостью пород, слагающих верхнюю часть грунтового полупространства, характеристикой направленности излучателя и другими его параметрами (интенсивностью воздействия, площадью плиты и т.д.).

Для идеального источника в однородном полупространстве урвненная поверхность будет представлять собой полусферу с радиусом  $r_0$  и вершиной в точке приложения силы. Размеры ее в реальных грунтах невелики, так как в самой верхней, рыхлой части разреза контактные давления быстро уменьшаются. Поэтому значение  $r_0$  не превышает нескольких метров. Очевидно, что уплотнение грунта в результате повторных воздействий напряжения ведет к увеличению  $r_0$ .

Для уплотненного грунта уравнение кривой изменения напряжения с глубиной может быть представлено в виде

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_0} = \frac{1}{1 + L (h/d_{ш})^a},$$

где  $\sigma_h$  — напряжение под штампом на глубине  $h$ ;  $\sigma_0$  — контактное напряжение на поверхности грунта;  $d_{ш}$  — диаметр штампа;  $L$  и  $a$  — коэффициенты.

Коэффициент  $a$  меняется от 1,4 до 1,65 и в 70% случаев близок к 1,5. Значение  $L$  колеблется в более широких пределах — от 1 до 10 в зависимости от скорости приложения силы и удельной нагрузки от рабочей плиты излучателя на грунт. Расчеты показывают, что для импульсных установок с  $\sigma < 5 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup> и  $v = 10 \dots 20$  м/с давление на глубине  $z = 8 \dots 10$  м падает до  $(1,5 \dots 2) \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup> и становится близким к пределу упругости грунта. Таким образом, полусфера с  $r = 5 \dots 10$  м может рассматриваться как эффективный источник упругих сейсмических колебаний [2].

На больших расстояниях от источника, значительно превосходящих длину возбуждаемых колебаний, можно считать, что точки среды совершают только упругие колебания со сферической симметрией. Это обусловлено тем, что, во-первых, на таких расстояниях напряжения оказываются небольшими и геологические среды ведут себя как



абсолютно упругие тела и, во-вторых, размеры эффективного источника становятся во много раз меньше расстояния до излучателя, а область источника может быть принята за точку.

Поведение частиц среды в этом случае определяется волновым уравнением.

В ближней к источнику зоне наблюдается довольно сложное волновое поле, образованное наложением упругой и пластической волн, форма и интенсивность которого изменяются по мере удаления от точки приложения нагрузки. Многочисленные эксперименты, выполненные со взрывами зарядов и ударами по поверхности грунта, подтверждают сложный характер волновой картины, возбуждаемой наземными излучателями сейсмических колебаний.

В соответствии со схемой работы импульсного поверхностного излучателя предположим, что жесткая плита массой  $M_{\text{гр}}$  и площадью поперечного сечения  $S$  под действием вертикальной силы  $F(t)$  давит на грунт, деформируя его с некоторой начальной скоростью  $v_1$ . Составим дифференциальное уравнение движения системы. Для этого заменим реальный грунт его реологической моделью и рассмотрим силы, действующие в системе рабочая плита излучателя–грунт. Среду в точке приложения нагрузки представим в виде линейной упруговязкой инерционной модели, у которой к первой пружине присоединена масса:

$$M = M_{\text{гр}} + m_{\text{пр}}.$$

Приложение нагрузки к поверхности грунта приводит к его деформации и возникновению колебаний в среде. В рамках выбранной модели значения деформаций зависят от интенсивности нагрузки и от упругих и демпфирующих параметров среды.

Для составления дифференциального уравнения движения грунта рассмотрим силы, действующие на массу  $M$ . В каждый момент времени на нее действуют (см. рис. 1):  $F(t)$  — сила, развиваемая излучателем;  $M\ddot{\varepsilon}$  — сила инерции грунта и плиты излучателя;  $E_1\varepsilon$  — сила восстановления пружины 1;  $E_2\varepsilon_2 + \eta\dot{\varepsilon}_2$  — сила сопротивления упругого и вязкого элементов 2 и 3;  $E_1$  и  $E_2$  — обобщенные коэффициенты сжатия упругих элементов 1 и 2;  $\eta$  — коэффициент неупругого сопротивления грунта (коэффициент вязкости демпфера 3).

Приравняв к нулю сумму всех действующих в системе сил, получим дифференциальное уравнение движения рабочей плиты излучателя и присоединенной массы грунта:

$$M\ddot{\varepsilon} + E_1\varepsilon_1 + E_2\varepsilon_2 + \eta\dot{\varepsilon}_2 = F(t).$$



Если предположить, что модули упругости пружин 1 и 2 равны ( $E_1 = E_2 = E$ ), то уравнение можно представить в виде

$$M\ddot{\varepsilon} + \eta\dot{\varepsilon} + E\varepsilon = F(t) + \frac{\dot{\sigma}\eta}{E}.$$

Разделив обе части равенства на  $M$ , получим

$$\ddot{\varepsilon} + 2H\dot{\varepsilon} + f^2\varepsilon = F(t) + \frac{2\dot{\sigma}H}{E}, \quad (1)$$

где  $2H = \eta/M$  и  $f^2 = E/M$  — соответственно затухание и собственная частота колебаний системы.

Из полученных соотношений следует, что затухание и собственная частота колебаний системы зависят от упругих и вязких свойств среды, а также от  $M$ .

Рассмотрим особенности решения уравнения (1) для импульсных излучателей.

Под действием внезапно приложенной силы система плита–грунт будет совершать свободные колебания, которые описываются уравнением (1) без правой части. Характер движения системы определяется соотношением между затуханием  $H$  и собственной частотой  $f$ . Поэтому система будет совершать затухающие колебательные движения:

$$\varepsilon = A_0 e^{-Ht} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где

$$\omega = \sqrt{f^2 + H^2} \approx f.$$

Значения  $A_0$  и  $\varphi$  (амплитуду и фазу) находят из начальных условий. Если отсчитывать время от начала движения грунта под действием плиты излучателя и считать, что  $\varepsilon = \varepsilon_0$  и  $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$  при  $t = 0$ , получим следующие выражения для  $A_0$  и  $\varphi$ :

$$A_0 = \sqrt{\varepsilon_0^2 + \frac{(\dot{\varepsilon}_0 + H\varepsilon_0)^2}{f^2}}; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\varepsilon_0 f}{\dot{\varepsilon}_0 + f\varepsilon_0},$$

где  $\varepsilon_0$  — начальная деформация грунта;  $\dot{\varepsilon}_0$  — скорость движения плиты в начальный момент времени.

С учетом (2) уравнение (3) преобразуется к виду

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_0^2 + \frac{(\dot{\varepsilon}_0 + H\varepsilon_0)^2}{f^2}} e^{-Ht} \sin(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет определять смещения (деформации) грунта для любого момента времени  $t$ .

Оценим значения наибольших отклонений системы от положения равновесия, так как очевидно, что они определяют интенсивность возбуждаемых колебаний. Наибольшее отклонение системы определяется по формуле

$$\varepsilon_{\max} = \sqrt{\varepsilon_0^2 + \frac{(\dot{\varepsilon} + H\varepsilon_0)^2}{f^2}}.$$

Полученное выражение для  $\varepsilon_{\max}$  оказывается достаточно сложным для практических расчетов.

Значение  $\dot{\varepsilon}$  может быть найдено на основе теории взаимодействия двух тел. Из нее следует, что если скорость движения плиты в начале удара известна, то в результате взаимодействия с грунтом она окажется равной

$$\dot{\varepsilon} = v_1 (1 + k) \frac{M_{\text{гр}}}{M},$$

где  $v_1$  — скорость движения рабочей плиты излучателя в момент удара.

Предполагая, что деформации пород в уплотненном грунте носят обратимый, упругий характер, можно найти наибольшее напряжение, возникающее в среде при действии импульсного излучателя:

$$\sigma_{\max} = E\varepsilon_{\max} = v_1 M_{\text{гр}} \sqrt{\frac{E}{M}}.$$

Таким образом, получена модель колебаний грунтового полупространства, образованного присоединенной массой. Как следует из рассмотренной теории, параметры колебаний системы присоединенная масса–плита (нога человека) зависят от многих факторов, определяющих состояние грунта, площадь и интенсивность воздействия.

На распространение сейсмических волн в грунте оказывают влияние следующие параметры: влажность, температура, порозность грунта, а также его гранулометрические характеристики и химический состав [1].

Учет температуры возможен только в случае мерзлых грунтов или грунтов, лежащих в пределах вечной мерзлоты. При замерзании связанной и свободной воды в грунте его физико-механические свойства приближаются к свойствам твердых пород. Процесс замерзания происходит практически скачкообразно; вязкость воды при сезонных изменениях температуры меняется мало, поэтому влиянием температуры практически можно пренебречь (за исключением замерзания воды).

Влажность грунта — важная характеристика, оказывающая влияние как на частотный спектр сейсмосигнала, так и на амплитуду последнего.

Особенно сильно влияние влажности сказывается на распространении сейсмических волн в слабосвязанных дисперсных грунтах (песчаниках и т.п.). В связных грунтах (суглинках) влияние влажности менее заметно. Это обусловлено тем, что при увеличении концентрации влаги в грунте (особенно в слабосвязанном) его звукопроводящие свойства плавно меняются от свойств твердой породы к свойствам воды.

Влажность в большей степени оказывает влияние на плотность грунта [3]:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0,01\omega},$$

где  $\omega$  — влажность грунта;  $\rho_d$  — плотность сухого грунта.

При повышении влажности увеличивается присоединенная масса источника сейсмических волн, следовательно, уменьшается собственная частота колебаний системы грунт–излучатель, введенная в модели.

Заполняя воздушные поры в грунте, влага влияет на свойство дисперсии сейсмических волн, благодаря этому меняется коэффициент затухания волны.

Вследствие того, что физико-механические характеристики различных грунтов меняются по-разному, в настоящее время нет строгих аналитических зависимостей упругих модулей и других важных параметров от влажности. Существуют лишь приближенные эмпирические зависимости для определенных типов почв. Так, например, при изменении процентного состава глинистых частиц в песчаном грунте зависимости поменяют свой вид.

Поскольку влажность грунта оказывает значительное влияние на характеристики сейсмического сигнала, она является информативным параметром для адаптации системы распознавания. Поэтому для такой системы необходим адаптивный канал, учитывающий влияние влажности.

В основу модели возбуждающего воздействия человека на грунт положена реологическая модель среды, описанная ранее, для которой получена модель импульсного источника. Модель строилась на основе следующих предположений:

- 1) грунт — неводонасыщенный, дисперсный, обладает вязкоупругими свойствами;
- 2) воздействие на грунт — скачкообразное (как было отмечено, при импульсном воздействии на грунт форма импульса практически не влияет на параметры образующегося гармонического процесса);
- 3) площадь контакта с грунтом считается постоянной.

Следует отметить, что формулы, описывающие модель, справедливы для импульсного воздействия ноги человека на грунт. В реальности

оно имеет вид короткого гауссового импульса длительностью  $2t_{\text{уд}}$ :

$$t_{\text{уд}} = 1,57 \frac{mv_0}{\sigma S},$$

где  $2t_{\text{уд}}$  — время воздействия ноги на грунт;  $m$  — масса ноги человека;  $v_0$  — скорость ноги перед воздействием на грунт;  $\sigma$  — амплитуда напряжений в грунте при воздействии;  $S$  — площадь воздействия. Как показывает расчет,  $t_{\text{уд}} \approx 1 \dots 5$  мс, что значительно (на порядок) меньше периода колебаний грунта. Таким образом, воздействие можно считать импульсным и для его определения использовать формулу

$$\delta r(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} e^{-0,5\left(\frac{t-t_r}{\sigma_r}\right)^2}.$$

Сейсмический приемник (СП) интерпретируется как электромеханическая колебательная система. При этом считается, что датчик работает на согласованную нагрузку (усилитель). Подобная модель отвечает подавляющему большинству сейсмических датчиков (в том числе и кабельных). Различия наблюдаются только в резонансной частоте и затухании.

Передаточная функция СП определяется по формуле

$$W = M \frac{-\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta\frac{j\omega}{\omega_0} + 1},$$

где  $\omega_0$  — собственная частота колебаний приемника;  $\zeta$  — коэффициент затухания;  $M$  — коэффициент электромеханической связи.

Остановимся лишь на временной модели сейсмического поля вблизи датчика и напряжения на выходе датчика.

Без учета фильтрующих свойств почвы поле вблизи СП будет иметь вид [1]

$$\xi_{\Sigma}(t, r) = k_P \xi_P(t, r) + k_S \xi_S(t, r) + k_R \xi_R(t, r);$$

$$\xi_{S,P}^0(t, r) = \frac{1}{4\pi} \left( F^2(r) f\left(t - \frac{r}{V_{S,P}}\right) + \frac{1}{V_{S,P}} F(r) f'\left(t - \frac{r}{V_{S,P}}\right) \right);$$

$$\xi_R^0(t, r) = \frac{1}{2\pi} \left( F(r) f\left(t - \frac{r}{V_R}\right) \right).$$

Фильтрующее воздействие среды будет выражено в виде фильтра с частотной характеристикой (АЧХ и ИХ, рис. 2). Для нахождения поля вблизи датчика с учетом фильтрующих свойств вычислим свертку аддитивного поля с импульсной характеристикой фильтра среды:

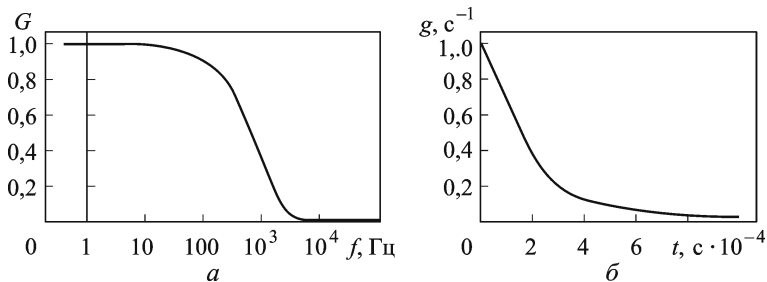


Рис. 2. АЧХ (а) и ИХ (б) фильтра — почвы

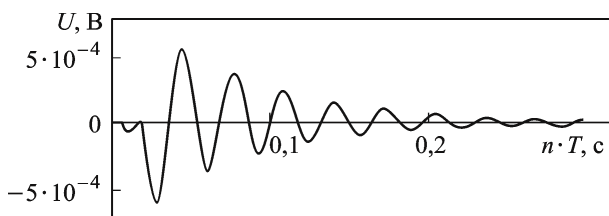


Рис. 3. Напряжение на выходе СП при импульсном воздействии на грунт

$$G(f) = e^{-\mu_p |f|^r}, \quad (5)$$

$$g_0(t) = \frac{1}{\pi} \frac{\mu_p r}{(\mu_p r)^2 + t^2}, \quad g(t) = \frac{(\mu_p r)^2}{(\mu_p r)^2 + t^2}.$$

где  $\mu_p$  — постоянная затухания среды.

Дискретная свертка будет иметь вид

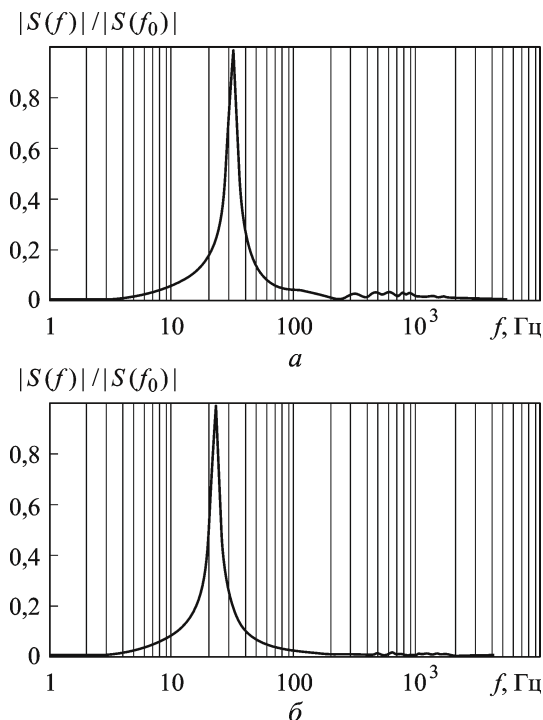
$$s_j = \sum_{n=0}^N g(nT) f \Sigma(jT - nT).$$

Действие среды будет играть роль ФНЧ, поэтому на графике, представленном на рис. 3, моменты первого вступления составляющих несколько сгладятся, образуя пологий фронт.

Таким образом, получен результат моделирования импульсного сейсмического сигнала от локализованного объекта.

Рассмотрим влияние влажности грунта на затухание и частоту колебаний грунта. Полученные в результате моделирования сейсмические сигналы и их спектры представлены на рис. 4.

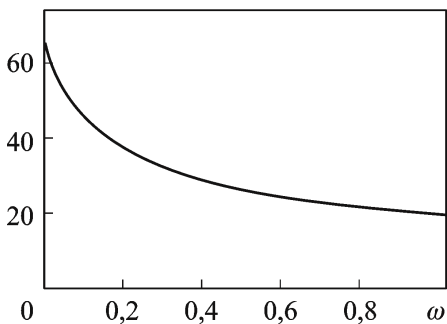
Для того чтобы сейсмическая система распознавания работала в широком диапазоне климатических параметров, необходимо в эту систему ввести адаптивный канал. Этот канал содержит датчики влажности и фильтр с перестраиваемой нижней частотой в полосе пропускания, так как частота спектра сейсмического сигнала существенно зависит от влажности (рис. 5). Необходимость адаптации обусловлена еще и тем, что в низкочастотной области лежит спектр шумов корней деревьев.



**Рис. 4. Спектры сейсмического сигнала:**

влажность грунта 40% (а) и 80% (б)

$f$ , Гц



**Рис. 5. Зависимость нижней частоты спектра от влажности**

спектра. Такие же выводы были сделаны и при моделировании физических процессов формирования сейсмосигналов с учетом влажности. Соответственно для распознавания сейсмических сигналов необходима такая система, которая учитывала бы данные изменения.

Спектр сейсмосигнала существенно меняется при увеличении влажности грунта, изменяется нижняя частота спектра входной реализации сигнала. Наиболее информативным параметром для адаптации является влажность грунта.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что спектр сейсмосигнала существенно меняется при увеличении влажности. Изменяется средняя частота

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1980. 551 с.
2. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки / Под ред. М.Б. Шнерсона. М.: ОАО "Издательство "Недра", 1998. 527 с.

3. *Ананьев В. П., Потапов А. Д.* Инженерная геология: Учеб. для строит. спец. вузов. М.: Высш. шк., 2005. 575 с.

## REFERENCES

1. *Gurvich I. I., Boganik G. N.* Seysmicheskaya razvedka [Seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1980, 551 p.
2. *Shneerson M. B.*, ed. Teoriya i praktika nazemnoy nevzryvnoy seysmorazvedki [The theory and practice of non-explosive seismic ground exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1998, 527 p.
3. *Anan'ev V. P., Potapov A. D.* Inzhenernaya geologiya [Engineering geology]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2005, 575 p.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012

Валерий Константинович Хохлов — д-р техн. наук, профессор кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области обработки сигналов в системах ближней локации. Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

V.K. Khokhlov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specialist in the field of signal processing in short-range radar systems. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Иван Анатольевич Кандидатов — аспирант кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области обработки сигналов в системах ближней локации. Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

I.A. Kandidatov — post-graduate of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of signal processing in short-range radar systems. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.