

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СОВЕТА МИНИСТРОВ БССР  
ПО ДЕЛАМ СТРОИТЕЛЬСТВА  
(ГОССТРОЙ БССР)  
БЕЛОРУССКИЙ ДОРОЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
(БЕЛДОРНИИ)

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЛЕДОВАНИЮ  
БОЛОТ МЕТОДАМИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Согласованы постановлением Государст-  
венного комитета Совета Министров БССР по  
делам строительства от 2 апреля 1976 г.,  
№ II

Минск 1976

"Методические рекомендации по инженерно-геологическому обследованию болот методами сейсморазведки" содержит указания по применению геофизических методов при дорожных изысканиях в заболоченной местности. Предназначены для руководства при зондировании болот и определения физико-механических свойств болотных грунтов инженерам-геологам, знакомым с общими принципами геофизической разведки, и инженерам-геофизикам, работающим в дорожных изыскательских партиях.

"Методические рекомендации по инженерно-геологическому обследованию болот методами сейсморазведки" составлены на основе теоретических исследований и практического опыта геофизических изысканий Белдорнии с учетом действующих методических и нормативных документов в области дорожных инженерно-геологических изысканий и общих геофизических инженерных изысканий.

"Методические рекомендации...", составил инженер В.Е.Сельков под руководством и при участии канд. техн. наук В.Н.Ярмыно. Общее редактирование осуществлено канд. техн. наук И.Е.Бягеньевым.

При составлении "Методических рекомендаций..." учтены замечания Соловдорнии, Соловдоррента, Белгипродора, БелГИИЗа, Белорусского научно-исследовательского института мелиораций и водного хозяйства и других организаций.

Оформы и предложения по "Методическим рекомендациям..." просим присылать по адресу: Г.Минск, Типографская, 28; Белдорнии.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. "Методические рекомендации по инженерно-геологическому обследованию болот методами сейсморазведки" содержат указания по определению глубины болотной залежи и физико-механических свойств составляющих ее грунтов методами инженерной сейсморазведки. Они предназначены для практического применения при инженерно-геологическом обследовании болот для целей проектирования новых и реконструкции существующих автомобильных дорог.

1.2. Для определения мощности болотной залежи, а также толщины существующего земляного полотна применяют методы сейсмовондирования и сеймопрофилирования.

1.3. Физико-механические характеристики болотных грунтов — влажность, коэффициент пористости, объемная масса скелета, сжимаемость, упругие и диссипативные характеристики — определяют методами сейсмического просвечивания и сеймомарштажа с использованием функциональных и корреляционных зависимостей между сейсмическими и физико-механическими свойствами грунтов.

1.4. Аппаратура, используемая при вондировании и определении физико-механических свойств сейсмометодами, описана в приложении I. Предложенные методы разработаны для глубины болотной залежи до 15 м (при ударном возбуждении колебаний грузом массой до 10 кг).

1.5. Основными физическими предпосылками использования методов инженерной сейсморазведки при обследовании болот является: скоростная дифференциация распространения упругих волн в болотных грунтах и грунтах минерального дна болота; различие акустических жесткостей болотных грунтов и грунтов минерального дна ( $\rho_B \cdot V_B \neq \rho_M \cdot V_M$ , где  $\rho_B \cdot V_B$  и  $\rho_M \cdot V_M$  соответственно плотность и скорость упругих волн в болотных и минеральных грунтах); зависимость скоростей упругих волн от состава и состояния болотных грунтов.

1.6. Методы инженерной сейсморазведки целесообразно применять в комплексе со стандартными методами, что значительно повышает точность и достоверность получаемых характеристик болотных грунтов. На стадии предварительных изысканий, а также при одностадийном проектировании дорог IV—V технических категорий методы сейсморазведки можно применять в качестве основных. Применение методов сейсмовондирования дает наибольший эффект при определении толщины существующей насыпи на болоте, а также при наличии плотного минерального осыя или осыя морачоты на поверхности болота (приложение 5).

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ВОЛОТНОЙ ВАЛЕЖИ

2.1. Сейсмические методы определения глубины болотной валежи целесообразно применять на всех этапах инженерно-геологического обследования болот<sup>2</sup>.

На первом этапе — разведочно-исследовательском — при соответствующем технико-экономическом обосновании (земные работы, реконструкция дороги и т.п.) сейсмовондирование проводят на коротких локальных поперечниках, выбранных в наиболее характерных местах намеченного перехода через болото.

На втором этапе — подробных изысканий — сейсмопрофилирование служит дополнением к стандартным методам. Получение непрерывного профиля на поперечниках через 25–50 м, а также профиля по оси трассы целесообразно осуществлять сейсмометодами в комплексе со статическим вондированием в 1–2 точках на каждом поперечнике. При наличии существующей насыпи или слоя минерального грунта, либо при изысканиях в зимний период с помощью сейсмовондирования можно сократить трудоемкость работ в 1,5–2 раза за счет уменьшения объема бурения.

2.2. Обследование болот производят методами преломленных волн (МПВ) — продольными  $V_p$  и поперечными  $V_s$ , поверхностных и отраженных волн. С помощью МПВ можно выделить только те границы между слоями, на которых скорость упругих волн возрастает с глубиной ( $V_n > V_{n-1}$ ).

2.3. В особых случаях сочетаний слоев могут наблюдаться явления выпадения слоя, взвешивания. Во избежание ошибок рекомендуется производить контрольное механическое вондирование в отдельных точках (при однослойном разрезе через 200 м, двухслойном — 100 м и трехслойном и более — через 50 м) с целью проверки строения валежи.

2.4. В ветреную погоду для уменьшения помех сейсмоприемники рекомендуются устанавливать в прямых и присыпать грунтом.

2.5. Возбуждение упругих колебаний при вондировании болот производят ударным способом, который позволяет получать все типы волн.

<sup>2</sup>Содержание этапов см. в "Методических указаниях по инженерно-геологическому обследованию болот при изысканиях автомобильных и железных дорог". М., Совмедтрени, 1973.

При ударном способе продольные волны возбуждаются вертикальными ударами, которые наносят по специальной подставке (удар  $Z$ ).

Поперечные волны  $SH$  возбуждаются или аналогичным вертикальным ударом, или горизонтальным ударом (по направлению сейсмического профиля), который производит по вертикальной стенке специально выкопанной ямки или по вкопанной подставке (удар  $X$ ).

Поперечные волны  $SH$  возбуждаются горизонтальным ударом, но в направлении, перпендикулярном сейсмическому профилю (удар  $Y$ ).

Регистрация продольных волн производится сейсмоприемниками, расположенными вертикально (по направлению  $Z$ ), поперечных волн  $SH$  сейсмоприемниками, расположенными горизонтально, по линии профиля (по направлению  $X$ ), поперечных волн  $SH$  — сейсмоприемниками, расположенными горизонтально, но перпендикулярно линии профиля (по направлению  $Y$ ).

2.6. Непрерывные профили рекомендуется разбивать на опорных поперечниках или, в случае необходимости, через все болото. Длина сейсмического профиля определяется глубиной и строением болота, а также гидрогеологическими условиями и должна быть не меньше учетверенной глубины болота.

2.7. Сейсмоприемники расставляются по профилю с интервалом  $\Delta X$  (рис. I). Рекомендуются следующие расстояния (в метрах) от сейсмоприемника до пункта возбуждения (ПВ): 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 18, 22, 24, или 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, или 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24.

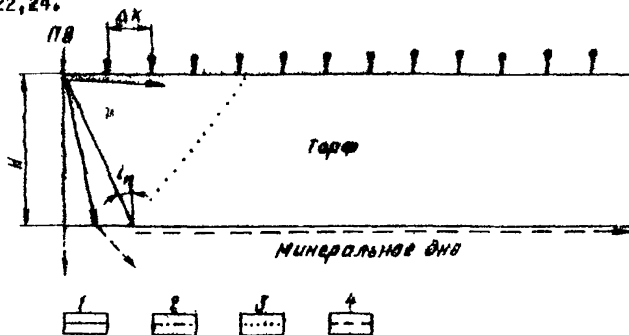


Рис. I. Схема сейсмического профиля:

1 — прямая волна; 2 — проходящая; 3 — преломленная; 4 — огибающая

2.8. Для более точного определения глубины валежи используют встречные и набегающие системы (особенно на существующих насыпях).

**В о т р е ч н о й** системой для некоторой преломленной волны называется система, при которой возбуждение колебаний производят с двух сторон профиля, длина которого обеспечивает приход данной волны в каждый ПВ.

**И в г о н я щ а я** система для данной волны — это система, при которой два ПВ расположены с одной стороны профиля на некотором расстоянии один от другого.

2.9. Выбор системы наблюдений определяется особенностями строения грунтовой толщи:

а) болота I типа с однородным составом торфа и уклоном минерального дна менее  $10^{\circ}$ . Скорости упругих волн по глубине почти не меняются. Граница торф — минеральное дно обычно является сильной преломляющей границей для поперечных и продольных волн (возрастание скорости больше 1,33).

Для определения общей мощности болотных отложений работы следует проводить по методике продольного или поперечного сейсмоиндирования с использованием схем  $Z-Z$  или  $V-V$ . Встречные системы не применяют. Полоса используемых частот (фильтрация) обычно 25–100 Гц или широкополосная. При использовании поверхностных волн следует применять только широкополосную фильтрацию;

б) болота I типа с однородным составом торфа и уклоном минерального дна более  $10^{\circ}$ . Для повышения точности определения глубины валежи необходимо применять встречные системы;

в) болота I типа с неоднородными слоями, скорости упругих волн возрастают с глубиной. В данном случае может наблюдаться рефракция волн. Системы наблюдения рекомендуется применять встречные по схеме  $Z-Z$ ;

г) болота II и III типов, где торф подстилается органико-минеральными грунтами различной консистенции. Сильные преломляющие границы отсутствуют. Скорости упругих волн растут с глубиной, в результате наблюдается рефракция волн. Рекомендуется применять продольное профилирование по схеме  $Z-Z$  с применением встречных систем;

д) болотный грунт перекрыт минеральной насыпью или естественным слоем минерального грунта.

Граница насыпь — болотный грунт в большинстве случаев является

слабой, и преломленная продольная волна быстро затухает. Преломленные поперечные волны от этой границы не образуются. Граница болотный грунт — минеральное дно может быть сильной (болото наполовну полностью торфом) и слабой (болото с органико-минеральными грунтами). Рекомендуется применять встречные и нагоняющие системы.

2.10. Интерпретация данных сейсмических наблюдений при зондировании болот проводится в два этапа: 1 — о е й о м и ч е о к а я и н т е р п р е т а ц и я, включающая определение времени вступления различных типов волн на сейсмограммах или на экране осциллоскопа, построение годографов, вычисление граничных скоростей, построение преломляющих границ и 2 — г в о л о г и ч е о к а я и н т е р п р е т а ц и я, включающая построение геологического профиля по данным границ слоев, полученным на первом этапе.

2.11. Каждый тип волн характеризуется на сейсмограммах следующими параметрами: периодом (T), амплитудой (A) и затуханием ( $\lambda$ ). Различные типы волн обычно отделяются друг от друга на сейсмограмме периодами относительного спокойствия, но иногда они могут и накладываться друг на друга на отдельных трассах сейсмограммы из-за разной скорости распространения, вследствие чего преломленные волны, соответствующие разным границам раздела, сменяют друг друга в первых вступлениях на сейсмограмме. Критериями смены волн являются: изменение кажущихся скоростей, резкое изменение амплитуды волны без значительного изменения ее периода, изменение формы записи на сейсмограмме.

2.12. По времени прихода выделенных волн строят годографы — графики зависимости времени пробега сейсмической волны от расстояния между источником возбуждения и сейсмоприемником.

Для построения годографов по полученным сейсмограммам проводится корреляция волн — последовательное прослеживание особенностей прохождения волн от трассы к трассе луча на сейсмограмме. Корреляция проводится по первым вступлениям и фазам волн.

2.13. В зависимости от строения болотной залежи получаемые при зондировании годографы имеют три характерные формы строения: прямолинейные (см. п.2.9,а); криволинейные (см. п.2.9,г); комбинационные — болотная залежь имеет ярко выраженные градиентные свойства (торф переходит в ил; минеральное дно, как "однородный" слой).

2.14. Скорости волн находят по наклону годографа, по перемещению, методом разностного годографа и т.п. (приложение 2).

Построение сейсмических границ для прямолинейных годографов производят методами оредных и пластовых скоростей, а для комбиназированных и криволинейных — облабая градиентная среда — методами О.К.Кондратьева, опособом и др. (см.приложение 2).

Для определения глубины болота по методу поверхностных волн используется связь между фазовой и групповой скоростью волны и отношением длины волны к толщине слоя  $1/n$  или периодом, отнесенном по времени пробега поперечной волны поперек слоя (см.приложение 2).

2.15. Геологическая интерпретация полученных результатов заключается в построении геосейсмических профилей с выделением глубины минерального дна болота. На геологические профили наносят высотные отметки поверхности, дна болота, кровли олов, определенные при геофизической интерпретации и контрольном механическом зондировании. Пример геосейсмической интерпретации дан в приложении 4.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БОЛОТНЫХ ГРУНТОВ (СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОСВЕЧИВАНИЕ И СЕЙМОКАРОТАЖ)

3.1. Для определения физико-механических показателей болотных грунтов по сейсмическим характеристикам (скорости упругих волн и их затухание) применяют сейсмическое просвечивание (рис.2а) или сеймокаротаж (рис.2б), позволяющий определить фактические скорости в болотной вылежи.

Сейсмическое просвечивание и сеймокаротаж применяют на этапе подробных исследований и совмещают со статическим зондированием. Сейсмические методы в отличие от стандартных дают не дискретные (в отдельных точках), а непрерывные характеристики между заданными ПВ и приемниками колебаний. Применение сейсмических методов увеличивает объем информации и повышает достоверность данных о физико-механических свойствах грунтов, позволяет получить ряд характеристик в полых условиях, без применения лабораторных методов, что снижает стоимость работ в 3-5 раз.

3.2. При определении скоростей и коэффициента затухания упругих волн по вертикали вылежи (сеймокаротаж) сейсмогенетромтр при



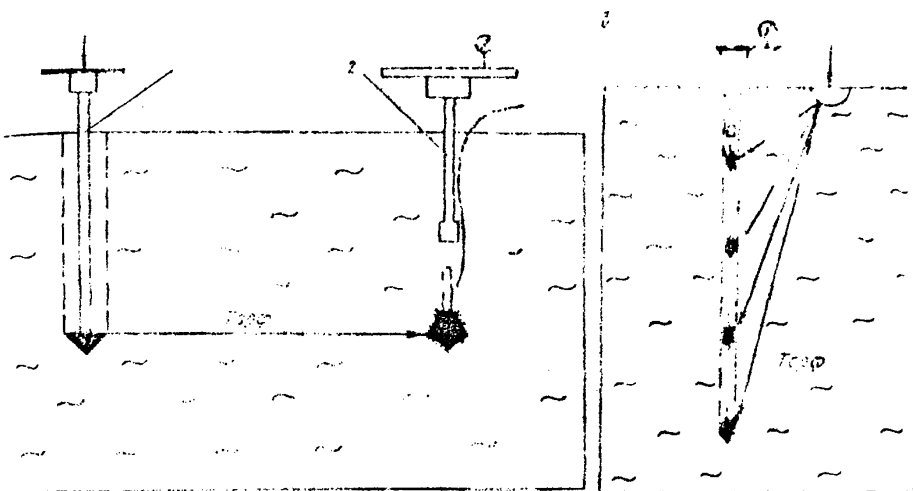


Рис. 2. Способы измерения скоростей упругих волн в залежи: а) схема сейсмопросвечивания; 1 — устройство для возбуждения колебаний; 2 — устройство для приема колебаний; б) схема сейсмокаротажа

помощи штанг вдавливают на требуемую глубину (приложение I). Во время погружения сеймопенетromетра через установленные интервалы (0,2-0,5 м) по индикатору регистрируется лобовое усилие вдавливания конуса. После достижения заданной глубины штангу навлекают и производят возбуждение (на поверхности залежи) и запись колебаний. Возбуждение колебаний осуществляют ударом кувалды по подставке  $\pm 0,5 - 1,0$  м от места погружения.

Регистрируется время прихода продольных и поперечных волн; при ударе по схеме X-Z получают продольные, по схеме Y-Y — поперечные волны. После этого навлекают на болотного грунта сеймопенетromетр, соединяют его штангой и погружают до следующей отметки. Интервал измерений через 1,0 м.

3.3. При измерении скоростей упругих волн и их затухания по горизонтали (сейсмическое просвечивание) возбуждение колебаний производят колушым наконечником на расстоянии 1-4 м от сеймопенетromетра, погруженного на ту же глубину.

Работы производят в следующем порядке:

Навинчивают (рис. 7, приложение I) конус I и подставку У на штангу 2 и погружают на требуемую глубину. Подставка должна возвышаться над поверхностью валежи на 0,3–0,4 м, чтобы не возбуждать колебаний на поверхности валежи. В отверстие 7 вставляют направляющую штангу 4 с грузом 5, зафиксированным в верхнем положении.

Для регистрации волн на расстоянии 1–4 м от пункта возбуждения на эту же глубину погружают сейсмопенетромтр (см. рис. 2а), включают регистратор и производят возбуждение колебаний. Таким же образом производят работы по всей глубине валежи, обычно через 1,0 м.

3.4. Поперечные волны на расстоянии двух–трех длин волн от источника возбуждения выделяются четко. Выделение волн  $\frac{S}{S}$  (удар и прием  $Y-Y$ ) производят по признаку инверсии фаз при перемене знака воздействия, а также интенсивности волн при ориентации сейсмоприемников по линиям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

3.5. По полученным записям — осциллограммам — (рис. 3) определяют скорости упругих волн и их затухание в валежн.

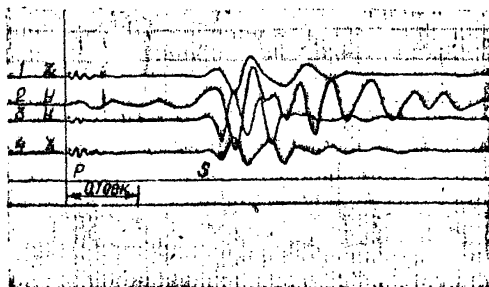


Рис. 3. Осциллограмма прореживания болотной валежи при  $X = 3\text{ м}$   
1–2 — сейсмоприемники расположены на поверхности валежи на расстоянии  $\lambda = 3$  м от ПВ; 3–4 — сейсмоприемники расположены в сейсмопенетромтре на глубине  $H = 3$  м и на расстоянии  $\lambda = 3\text{ м}$  от ПВ

В случае измерения скоростей упругих волн по вертикали (сейсмокаротаж) составляют сводную сейсмограмму (рис. 4а), по которой строят годографы (рис. 4б). По годографам определяют скорости упругих волн в залежи по формуле  $V = \frac{\Delta h}{\Delta t}$  ( $\Delta h$  — расстояние от ПВ до сейсмопенетратора,  $\Delta t$  — время прохождения волной расстояния  $\Delta h$ ), а также среднюю скорость в залежи по формуле  $\bar{V} = \frac{h}{t}$  ( $h$  — мощность залежи,  $t$  — время прохождения волны через залежь).

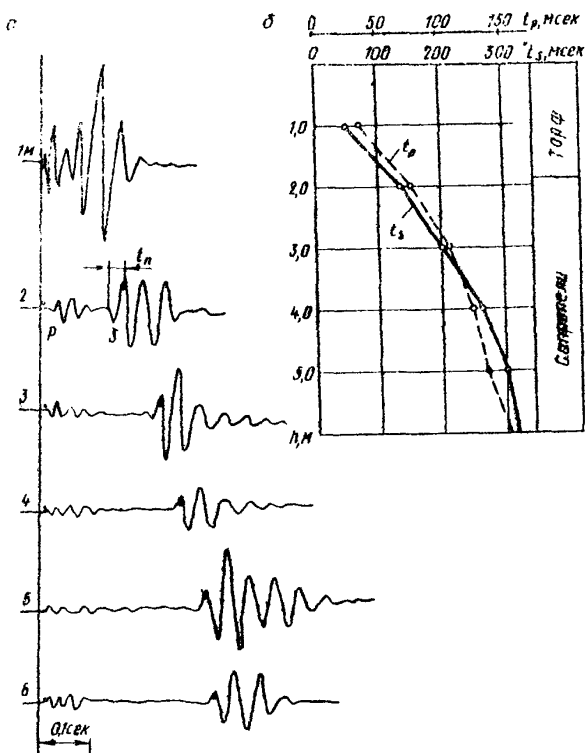


Рис. 4. Результаты измерения скоростей упругих волн по вертикали болотной залежи: а) сводная осциллограмма по результатам сейсмокаротажа болотной залежи; б) вертикальные годографы и геологическая колонка

При измерении скоростей упругих волн по горизонтали (сейсмическое просвечивание) по полученным осциллограммам (см. рис. 3) определяют время прихода колебаний и по формуле  $v = \frac{r}{t}$  ( $r$  — расстояние от ПВ до приемника;  $t$  — время прихода колебаний) находят скорости упругих волн на данной глубине.

По результатам испытаний строят графики изменения скоростей продольных и поперечных волн, усилий вдавливания конуса по глубине болотной валежки (рис. 5). Далее по функциональным и корреляционным зависимостям (приложение 3) находят физико-механические характеристики болотных грунтов.

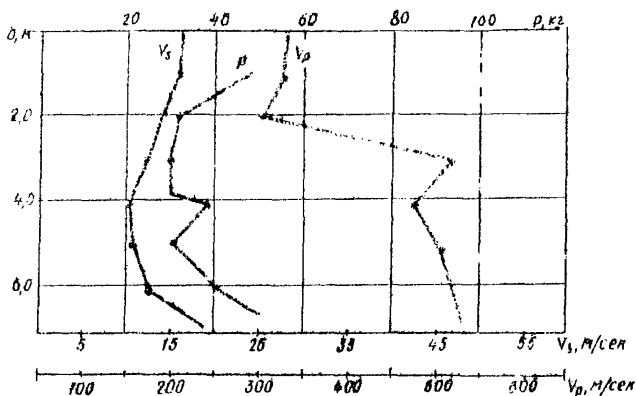


Рис. 5. Графики, построенные по результатам сейсмодосвечивания

#### Приложение I. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ АППАРАТУРА

При зондировании болотной валежки рекомендуется применять два вида аппаратуры: многоканальные установки (при обследовании реконструируемых дорог и осушенных болот) и одно-, трехканальные (при обследовании новых трасс на неосушенных болотах). В качестве многоканальной установки можно использовать серийно выпускаемую сейсмостанцию "Поиск-1-6/12-АСМ", которая имеет фотосейсмографическую и магнитную записи. Станция смонтирована на автомобиле ГАЗ-69, но в случае необходимости ее можно переоборудовать в переносную.

В качестве одноканальных установок рекомендуется использовать серийно выпускаемые установки ОДУ-2, ДОДУ-1 и регистратор эхолота ВП-1. Для этих установок смонтирован специальный пульт управления, что позволяет использовать коду с 12-16 сейсмоприемниками, а также осуществлять фильтрацию в диапазоне частот 0-150 Гц.

Комплекта аппаратуры, применяемой при зондировании болотной залежи, представлен на рис.6.

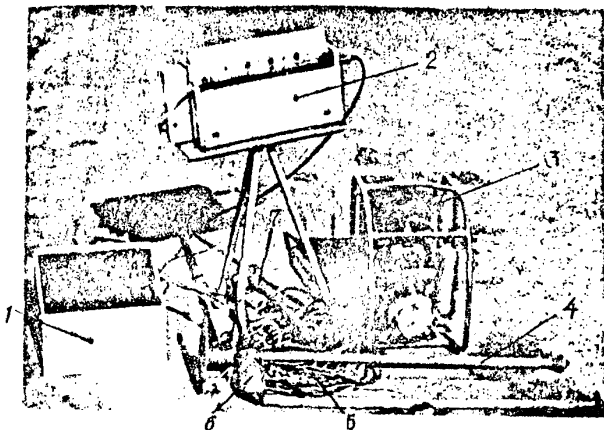


Рис.6. Комплект аппаратуры и оборудования:  
1 — пульт управления; 2 — регистратор колебаний; 3 — переносная электростанция; 4 — устройство для возбуждения колебаний внутри болотной залежи; 5 — кабель для подсоединения сейсмоприемников к регистратору (кода); 6 — конусный зонд сейсмопенетрометра; 7 — держатель

Масса регистратора эхолота ВП-1 8 кг, запись ведется чернилами, что позволяет сразу контролировать качество осциллограмм.

В качестве трехканальных установок можно использовать осциллограф Н-700 с трехканальным усилителем и регистратор Н-327-3.

Питание переносной аппаратуры осуществляется от электростанции мощностью 0,5 кВт, напряжением 24 или 220 В, массой 20 кг.

При сейсмоинжендировании болот рекомендуется использовать следующие типы сейсмоприемников: ОПЭД-56, СВ-10, СВ-20, СГ-1-10 и СГ-1-20. Для установки сейсмоприемников используют специальные держатели (см. рис. 6), позволяющие ориентировать сейсмоприемники в трех плоскостях ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Держатели погружают в торф на 30-40 см, что обеспечивает хороший контакт сейсмоприемников с болотным грунтом. Для соединения сейсмоприемников с регистрирующей аппаратурой используют коды на 6, 12 и 16 сейсмоприемников. Возбуждение колебаний осуществляют ударом кувалды (масса 10 кг) по металлической или деревянной подставке.

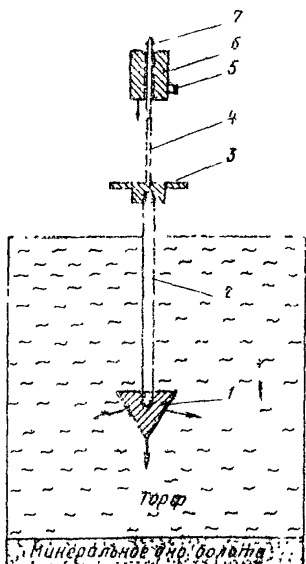


Рис. 7. Устройство для возбуждения колебаний внутри болотной залежи

продольные и поперечные волны. При помощи этого устройства можно возбуждать колебания в различных слоях болотной залежи и на любой глубине.

Для измерения скоростей прямых волн в болотной залежи разработаны специальные устройства для возбуждения и приема колебаний (способ конуса, сейсмоинтенсометр, держатели).

Возбуждение упругих волн внутри слоев осуществляют устройством (рис. 7), которое состоит из конусного наконечника 1 с углом  $\alpha = 60-90^\circ$  и сечением 20 см<sup>2</sup>; штанги для погружения конуса 2; металлической подставки 3, по которой производится удар падающим грузом; направляющей 4; контактов, замыкающей во время удара 5; груза массой 5 кг 6; фиксатора высоты падения груза 7.

Возбуждение колебаний производится конусным наконечником, на который через соединительные штанги передается удар падающего груза. Под воздействием удара конус создает импульсное усилие по вертикали  $Z$  и горизонталям  $X$  и  $Y$ , возбуждая

Для приема упругих волн используют специально разработанный прибор — сейсмопенетрометр (рис.8), который позволяет проводить статическое зондирование слоев болотных грунтов с измерением по глубине сопротивления сдавливанию конуса и скоростей упругих волн.

Сейсмопенетрометр состоит из следующих основных частей (см.рис.8): конусного наконечника с углом  $\alpha = 90^\circ$  и сечением  $40 \text{ см}^2$  1, в котором помещены три сейсмоприемника, расположенные в трех плоскостях ( $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $Z$ ) 2; уловостовика 3 с отверстием для кабеля 9 и переходником для соединения со штангами; штанг для задавливания 4 с рукояткой 5 и механического измерительного устройства 7 конструкции Л.С.Амаряна; приспособления для извлечения сейсмопенетрометра 6; регистрирующей аппаратуры 8.

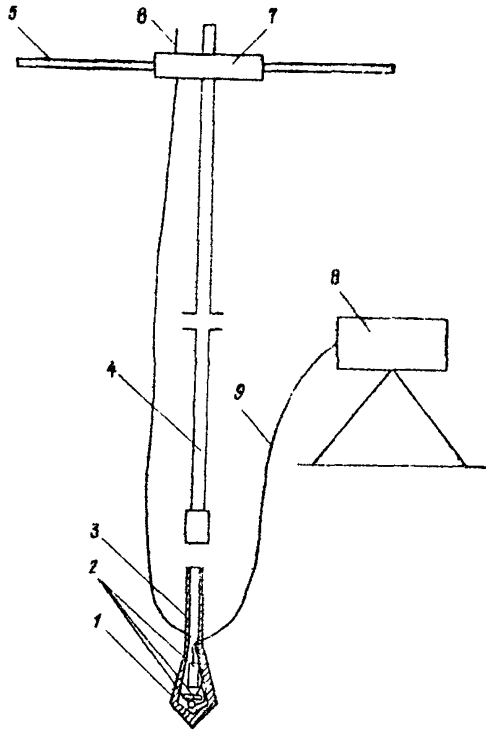


Рис.8. Схема сейсмопенетрометра

Регистрирующей аппаратуры 8.

## Приложение 2. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

### 1. Определение скоростей по годографам преломленных волн (прямолинейные годографы)

Для двухфазной среды с горизонтальной границей раздела (однородный торф) характерны прямолинейные годографы (рис.9). В этом

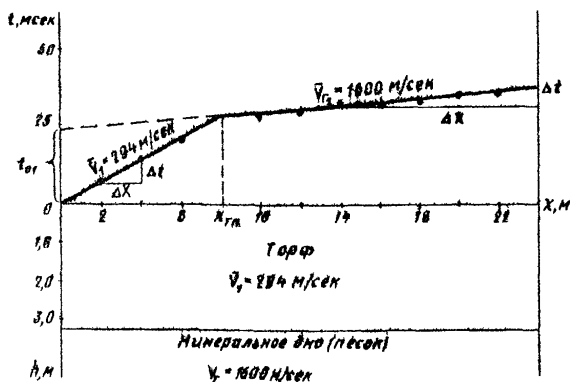


Рис. 9. Определение скоростей и  $t_0$  по прямолинейному годографу первых возмущения продольной волны

в случае граничные скорости можно определять по наклону стрелок и по формуле

$$V^x = \frac{\Delta X}{\Delta t},$$

где  $\Delta X$  — расстояние по годографу;  $\Delta t$  — время по годографу.

Здесь кажущаяся скорость  $V^x$  равна граничной скорости  $V_1$ . Вообще же кажущаяся скорость равна  $V^x = \frac{V_1 \sin \psi}{\cos \psi}$ , где  $\psi$  — угол между касательной к фронту волны и поверхностью земли.

Средняя скорость прямой волны определяют по перегибу годографа,

в случае наклонных границ для определения граничных скоростей применяют два основных способа: точный метод поля времени и приближенный метод равноотного годографа [1, 2, 18]. Обычно в инженерно-геологических изысканиях используют более простой метод равноотного годографа, который обеспечивает достаточную точность при малом угле наклона границ  $\psi$ . Метод требует встречной системы наблюдений и увязанный во времени точный годограф; причем равноотный годограф строят лишь на участке перекрытия встречных



годографов (рис. 10)  
 Положение любой точки с координатой  $X$ , лежащей на линии равноостного годографа, определяется равенством

$$\bar{t}_{\text{рав}} = \bar{t}_{(A)} - \bar{t}_{(B)} + T,$$

где  $\bar{t}_{(A)}$  и  $\bar{t}_{(B)}$  — время по двум встречным годографам;

$T$  — время прихода волны во взаимных точках.

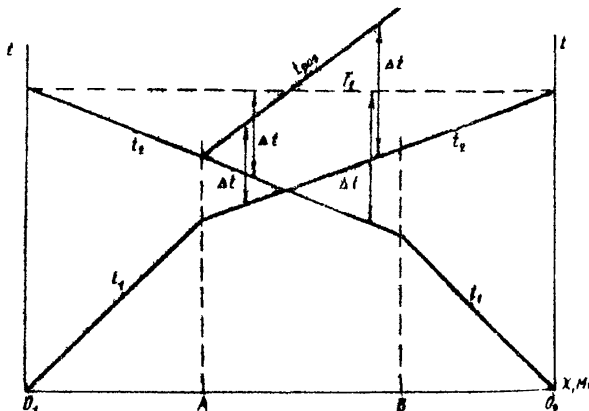


Рис. 10. Построение равноостного годографа  $\bar{t}_{\text{рав}}$

Равноостный

годограф строят следующим образом (см. рис. 10).

Измеряют отрезок  $\Delta t$  от одного из встречных годографов до горизонтальной прямой, соединяющей взаимные точки, и откладывают этот отрезок по ординате от другого годографа. В результате получают точку, принадлежащую равноостному годографу. Таким же образом получают и другие точки.

Граничную скорость определяют по формуле

$$V_r = 2 V_{\text{рас}} \cdot \cos \varphi,$$

где  $V_{\text{рас}}$  — скорость по равноостному годографу;

$\varphi$  — угол наклона границы. При малых наклонах границ им можно пренебречь.

В случае отсутствия перекрытого участка у встречных годографов значение  $V_r$  приближенно вычисляют из следующей формулы:

$$\frac{2}{V_r} = \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2},$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — значения кажущихся скоростей по встречным годографам.

В случае наличия перекрытого участка, но неувязанной системы годографов (для волны  $\xi$ ) скорость  $V_{\text{рас}}$  находят по рис. 11. Для оп-

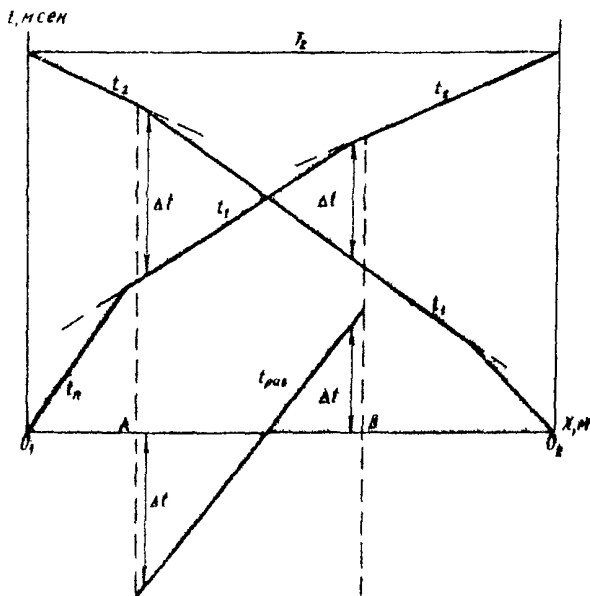


Рис. II. Построение равноостного годографа  $t_{рас}$  (для волны  $t_1$ ) в случае неувязанной системы годографов

При простом строении (двухслойная среда, горизонтальная граница) залежи можно применять и другие упрощенные способы, основанные на ряде допущений /3/.

#### Способ средних скоростей /1, 2, 3/

Все слои, лежащие выше коковых преломленных границ, рассматривают как один однородный слой с постоянной скоростью распространения „ругих волн. Для построения границ необходимо иметь значения  $V$ ,  $\bar{V}$  и  $t_0$ .

$V$  находят по одному из способов, описанных выше;  $\bar{V}$  — по перегибу годографа (точка пересечения прямой и преломленной волны) и  $t_0$  — продолжением годографа преломленной волны на ось времени (рис. I2a).

ределения  $t_{рас}$  измеряют величину  $t_{(x)} - t_{(0)}$  и откладывают ее от любой линии, параллельной оси абсцисс.

#### 2. Построение преломляющих границ

Глубины преломляющих границ можно определить двумя способами: менее точным, но более быстрым способом средних скоростей ( $\bar{V}$ ) и более точным, но более громоздким способом пластовых скоростей ( $V_n$ ). Оба эти способа являются упрощенными модификациями точного способа полей времени /2/.

Для  $n$ -го слоя границу находят по формуле

$$h_n = \frac{\bar{V}_n \cdot t_{on}}{2\sqrt{T - (\bar{V}_n / V_{cn})^2}},$$

где  $\bar{V}_n$  — средняя скорость до  $n$ -й границы;

$$\bar{V}_n = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{h_1/V_1 + h_2/V_2 + \dots + h_n/V_n},$$

$V_{c,n}$  — граничная скорость вдоль этой границы;

$t_{on}$  — значение  $t_0$  для  $n$ -й границы.

Для первой границы раздела

$$h_1 = \frac{\bar{V}_1 \cdot t_{01}}{2\sqrt{T - (\bar{V}_1 / V_{c1})^2}}.$$

Для первой границы можно использовать также формулу

$$h_1 = \frac{X_{гп}}{2} \sqrt{\frac{V_{c1} - V_1}{V_{c1} + V_1}},$$

где  $X_{гп}$  — точка переосечения годографа прямой и преломленной волны.

Приближенно глубину можно определить (горизонтальная граница, двухслойная среда) по положению точки перегиба ( $X_{гп}$ ), как  $h \approx (0,33 + 0,4) \cdot X_{гп} / 3$ .

Если имеется система встречных годографов, увязанных во взаимных точках, то глубину залежи в любой точке профиля (имеющего перекрытый участок) можно определить по построенной линии  $t_0(x)$ , которую находят из соотношения

$$t_0(x) = \bar{t}(x) + \bar{t}'(x) - T.$$

Построение показано на рис. 12б.

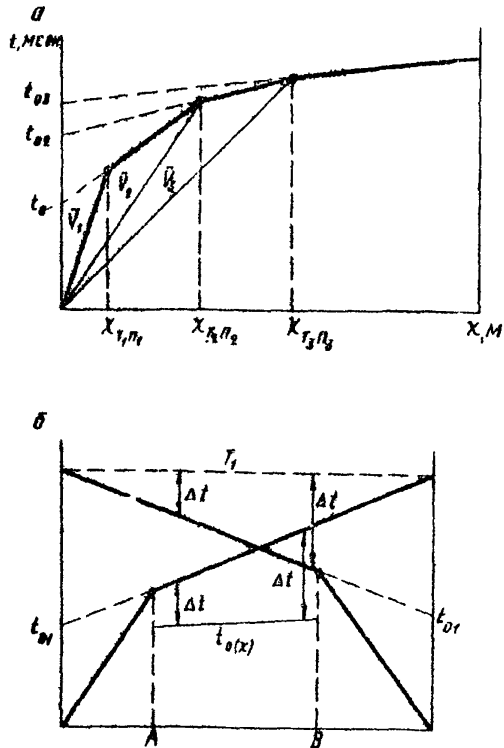


Рис. 12. Определение средних скоростей и  $t_0$  для многослойного разреза (а) и построение линии  $t_0(x)$  при встречной системе с перекрытыми участками (б)

Способ пластовых скоростей /1,2,3/

Для определения мощности каждого ола необходимо знать  $t_0$  и  $V_i$  для каждой границы.

Мощность первого ола определяют способом, описанным выше.

Мощность второго ола

$$h_2 = \frac{V_1}{2 \cos i_{23}} \cdot (t_{02} - \frac{\cos i_{23}}{\cos i_{21}} \cdot t_{01}),$$

где  $i_{21} = \arcsin V_1/V_2$ ;  $i_{23} = \arcsin V_1/V_3$ ;  $t_{20} = \arcsin V_2/V_3$ .

Мощность третьего ола

$$h_3 = \frac{V_2}{2 \cos i_{34}} \cdot [t_{03} - t_{02} \frac{\cos i_{34}}{\cos i_{23}} - (t_{02} - \frac{\cos i_{23}}{\cos i_{21}} \cdot t_{01}) \frac{\cos i_{34}}{\cos i_{23}}],$$

где  $i_{34} = \arcsin V_2/V_4$ ;  $i_{24} = \arcsin V_2/V_4$ ;  $i_{34} = \arcsin V_3/V_4$ .

$t_{01}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_{03}$  — соответственно время, отсекаемое на оси времени продолжениями первого, второго и последнего отрезков годографов преломленных волн.

Аналогичные формулы выводятся и для следующих олов.

Глубины преломлящих границ находят суммированием мощностей выходящих выше олов.

Для приближенного определения  $V_i$  в методе пластовых скоростей можно использовать формулу /15/

$$V_{rc} \approx \left( \frac{2\bar{V}^n \cdot \bar{V}^n}{\bar{V}^n + \bar{V}^n} \right) c$$

где  $\bar{V}^n$  и  $\bar{V}^n$  — кажущиеся скорости преломленных волн от одной и той же границы, зарегистрированные по подъему и падению ее.

При использовании одноканальных установок (при двухолной среде) целесообразно определять положение наклонной границы по годографам из одной точки пункта возбуждения по способу расстояний (рис. 13) /4/.

Наклон границы определяют по формуле

$$\sin \varphi = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

где

$$a = \frac{X_1^{\delta} \cdot X_2^{\delta}}{X_2^{\delta} - X_1^{\delta}}, \quad b = - \left( \frac{X_1^{\delta} \cdot X_1^{\eta}}{X_1^{\delta} - X_1^{\eta}} + \frac{X_1^{\delta} \cdot X_1^{\eta}}{X_2^{\delta} - X_1^{\eta}} \right);$$

$$c = \frac{X_1^{\delta}}{2},$$

а ее глубину — по формуле или как показано на рис. 14.

$$h = \frac{X_1^{\delta} \cdot X_1^{\eta}}{X_1^{\delta} - X_1^{\eta}} \cdot \sin \varphi,$$

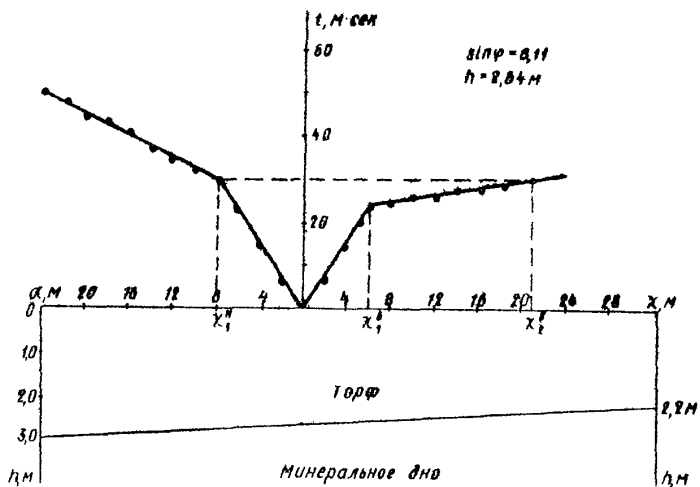


Рис.13. Определение угла наклона и глубины валежи из одной точки пункта возбуждения

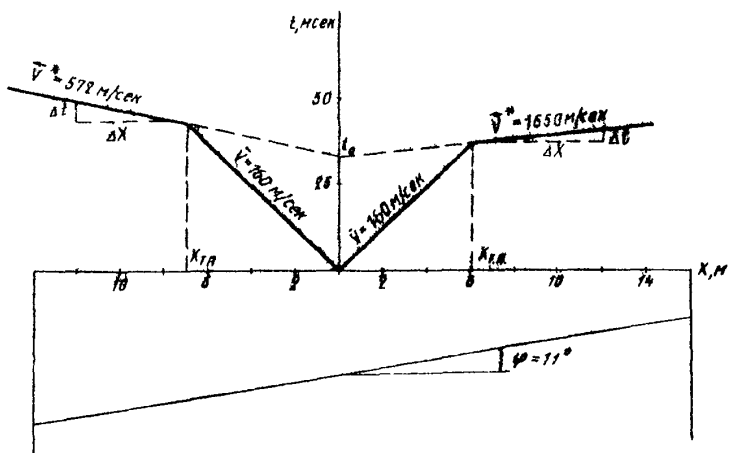


Рис.14. Упрощенный аналитический способ определения скоростей и глубины валежи с центральным пунктом возбуждения

$$\bar{V} = \frac{X_{гн}}{t_{гн}} = 160 \text{ м/сек}; \quad \bar{V}' = \frac{\Delta X}{\Delta t} = 1650 \text{ м/сек};$$

$$\bar{V}'' = \frac{\Delta X}{\Delta t} = 572 \text{ м/сек};$$

$$\varphi = \frac{1}{2} (\arcsin \frac{\bar{V}}{\bar{V}'} - \arcsin \frac{\bar{V}}{\bar{V}''}) = \frac{1}{2} (\arcsin \frac{160}{572} - \arcsin \frac{160}{1650}) = 11^\circ;$$

$$i = \frac{1}{2} (\arcsin \frac{\bar{V}}{\bar{V}'} + \arcsin \frac{\bar{V}}{\bar{V}''}) = 21'40''.$$

### 3. Интерпретация годографов рефрагированных волн

В случае градиентной среды (нарастание скоростей упругих волн по глубине валежи или частичное нарастание в первом слое) получают комбинированные, или криволинейные, годографы.

По годографам рефрагированных волн можно определять скоростное строение валежи и  $t_{0r}$  по схеме, показанной на рис. 15.

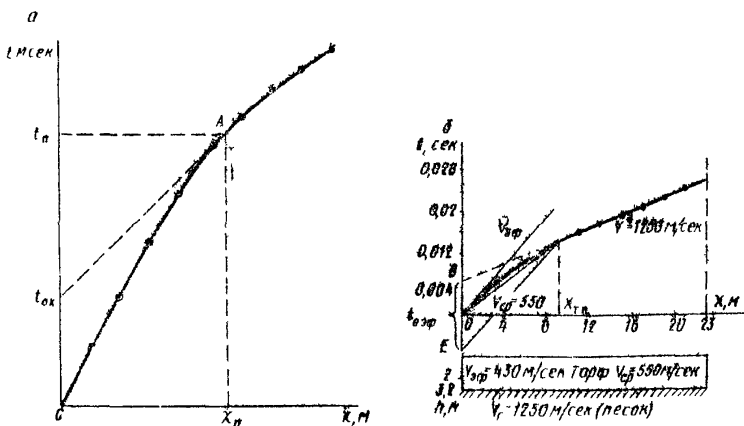


Рис. 15. Способы обработки криволинейных (а) и комбинированных (б) годографов

Глубину определяют по формулам /5,6/:

$$h = K(\bar{V}_n) \cdot t_0 = \frac{V_n \cdot t_{0n}}{2 \cos i}, \quad i = \arcsin \frac{\bar{V}_n}{V^x}; \quad K = \frac{1}{2} \cos i.$$

где

$$\bar{V}_n = \frac{1}{2} \left( \frac{X_a}{t_a} + \sqrt{V^x \cdot \frac{X_a}{t_a}} \right),$$

где  $X_a$  и  $t_a$  — координаты точки на годографе рефрагированной волны;  
 $\bar{V}_n$  и  $V^x$  — пластовая и кажущаяся скорости.

За величину  $V^x$  принимают значение кажущейся скорости в точке наблюдения (в точке  $X_a$ ), за величину  $t_{0n}$  — значение времени, отсекаемое на оси  $t$  касательной к криволинейному годографу в данной точке (см. рис. 15а). Для сильноградиентной среды более точные результаты дает формула Н.И.Павленковой и Т.В.Смелянкой:

$$\bar{V}_n = \frac{2X_a \cdot t_a + \sqrt{X_a \cdot t_a \cdot V^x}}{3};$$

Может быть использован также способ, основанный на аппроксимации криволинейного годографа отрезками прямых линий /13,16/. Годограф разбивают на ряд участков. По заданным координатам  $X_n$ ,  $t_n$  вычисляют пластовую скорость

$$V_n = \frac{X_n - X_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}$$

и значения  $t_{0n}$ , отсекаемые продолжением соответствующих линейных отрезков на оси времен:

$$t_{0n} = t_n - \frac{X_n}{V_n}.$$

По значениям  $V_1$ ,  $V_2$  и  $t_{02}$  находят мощность первого слоя:

$$h_1 = \frac{V_1 \cdot t_{01}}{2 \sqrt{1 - (V_1/V_2)^2}}.$$

Мощность последующих слоев находят из выражений

$$h_{n-1} = \frac{t_{n-1} \cdot V_{n-1}}{2 \sqrt{1 - (V_{n-1}/V_n)^2}},$$

где

$$t_{n-1} = t_{0n} - \sum_{k=1}^{n-2} \tau_{kn} = t_{0n} - \sum_{k=1}^{n-2} \frac{2h_k}{V_k} \cdot \sqrt{1 - (V_k/V_n)^2}.$$

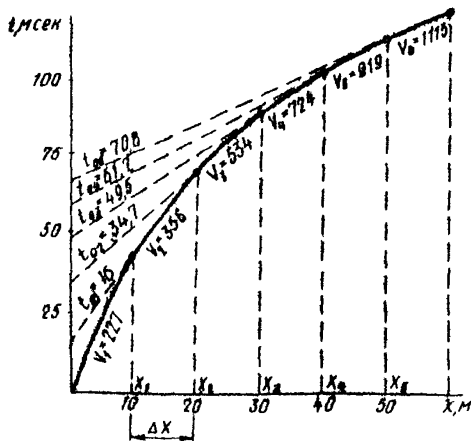
Пример расчета по этому способу показан на рис. 16. Расстояние

$\Delta X$  между выбранными точками следует выбирать из условия

$$\Delta X \leq 2l \cdot \sqrt{\frac{V^x \cdot \Delta t}{V^x \cdot t - l}},$$

где  $\Delta t$  — среднеквадратическая ошибка измерения времени ( $\Delta t = 0,001-0,003$  сек);

$V^x$  — кажущаяся скорость по годографу в точке  $X$ .



1	2	3	4	5	6
$V_1=227$	$V_2=356$	$V_3=534$	$V_4=724$	$V_5=919$	$V_6=1119$
	$t_{01}$ 16	$t_{02}$ 34,7	$t_{03}$ 49,8	$t_{04}$ 61,2	$t_{05}$ 70,8
	$h_1$ 2,4	$h_2$ 3,7	$h_3$ 4,8	$h_4$ 7,7	$h_5$ 8,3
		$\tau_{12}$ 18,7	$\tau_{23}$ 17,8	$\tau_{34}$ 19,1	$\tau_{45}$ 19,6
		$h_6$ 3,7	$h_7$ 11,8	$\tau_{45}$ 19,2	$\tau_{56}$ 15,3
			$h_8$ 4,8	$\tau_{46}$ 7,7	$\tau_{48}$ 8,3
				$h_9$ 4,3	$\tau_5$ 6,0
					$h_6$ 5,9

$$V_1 = \frac{X_1}{t_1} = \frac{10}{0,0441} = 227 \text{ м/сек}; \quad V_2 = \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} = \frac{20 - 10}{0,0722 - 0,0441} = 356 \text{ м/сек};$$

$$t_{01} = t_1 - \frac{X_1}{V_1} = 0,0441 - \frac{10}{356} = 0,016 \text{ сек}; \quad h_1 = \frac{V_1 \cdot t_{01}}{2\sqrt{1 - (V_1/V_2)^2}} = \frac{227 \cdot 0,016}{2\sqrt{1 - (227/356)^2}} = 2,4 \text{ м};$$

$$V_3 = \frac{X_3 - X_2}{t_3 - t_2} = \frac{30 - 20}{0,0809 - 0,0722} = 534 \text{ м/сек};$$

$$t_{02} = t_2 - \frac{X_2}{V_3} = 0,0722 - \frac{20}{534} = 0,0347 \text{ сек};$$

$$\tau_{12} = \frac{2h_1}{V_1} \sqrt{1 - (V_1/V_3)^2} = \frac{2 \cdot 2,4}{227} \sqrt{1 - (227/534)^2} = 0,019 \text{ сек};$$

$$\tau_{23} = t_{02} - \tau_{12} = 0,0347 - 0,019 = 0,0157 \text{ сек};$$

$$h_2 = \frac{\tau_{23} \cdot V_2}{2\sqrt{1 - (V_2/V_3)^2}} = \frac{0,0157 \cdot 356}{2\sqrt{1 - (356/534)^2}} = 3,7 \text{ м и т.д. Результаты см. в таблице.}$$

Рис. 16. Пример расчета определения скоростей,  $t_0$  и глубины залегания по криволинейному годографу (по В.Н.Бондареву)

Удовлетворительные результаты также дают формулы с использованием средних скоростей.

В случае комбинированного годографа рекомендуется положение минерального дна ("однородный" ослы) определять методом  $t_{0здр}$  17/.



Для этого через точку  $X_{1n}$  (начало прямолинейного участка) проводят прямую под наклоном  $1/V_{xp}$  до пересечения с осью ординат в точке  $B$ .  $V_{xp}$  равна наклону начальной части годографа рефрагированной волны (см. рис. 15б). Величина  $BE$  в масштабе оси времени является эффективной величиной  $t_{0exp}$ . Далее определяют мощность слоя по формуле

$$h = \frac{V_{xp} \cdot t_{0exp}}{2 \sqrt{1 - (V_{xp}/V_r)^2}}$$

#### 4. Интерпретация поверхностных волн

Применяется как вспомогательный метод для уточнения границы минерального дна или толщины насыпи.

При интерпретации поверхностных поперечных волн для определения толщины слоя болотной залежи или толщины земляного полотна на болоте обычно имеем два случая: а) поверхностный слой расположен на слое с большей скоростью распространения поперечных волн  $SH$ ; б) поверхностный слой расположен на слое с меньшей скоростью распространения  $SH$ .

В первом случае используют формулу /8/

$$t_g \left[ \frac{2\pi}{T \cdot V_{\phi}} \cdot h \sqrt{\left(\frac{V_{\phi}}{V_2}\right)^2 - 1} \right] = \frac{\sqrt{1 - (V_{\phi}/V_2)^2}}{\left(\frac{V_{\phi}}{V_2}\right)^2 \frac{h}{V_2} \sqrt{\left(\frac{V_{\phi}}{V_1}\right)^2 - 1}},$$

где  $T$  — квазипериод;

$V_{\phi}$  — фазовая скорость;

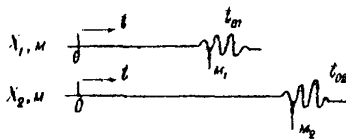
$V_2$  — скорость во втором слое.

Во втором случае для определения толщины насыпи (поверхностный слой) на болоте используют формулы /8, 17/, справедливые в том случае, когда подстилающий слой по своим свойствам близок к жидкости:

$$h = \frac{T \cdot V_g}{4 \sqrt{1 - V_g^2/V_{gr}^2}}; \quad V_g = \sqrt{V_{\phi} \cdot V_{\phi}'},$$

где  $V_{gr}$  — групповая скорость.

Простейший способ определения фазовой скорости состоит в том, что определяют разность времен ( $t_{p2} - t_{p1}$ ) появления одной и той же фазы,  $M_1$  и  $M_2$  на сейсмограмме. На эту разность делят разность расстояний ( $X_2 - X_1$ ) между сейсмоприемниками (рис. 17).



$$V_{\varphi} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{t_{02} - t_{01}}$$

Рис. 17. Схема определения фазовой скорости

Групповая скорость — скорость движения всей группы волн (волнового пакета, цуга), определяемая по движению середины всей группы волн.

Точность определения глубины и толщины насипи поверхностными волнами ниже, чем преломленными. Погрешность этого метода составляет 10–20% по сравнению с бурением.

### 5. Отраженные волны

Часто на сейсмограммах, полученных на болотах I типа (осушенных и неосушенных), в последующих вступлениях хорошо выделяются отраженные волны (рис. 18).

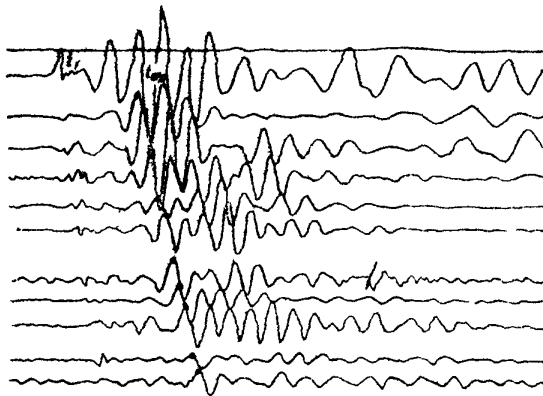


Рис. 18. Характерная сейсмограмма на осушенном болоте (уровень грунтовых вод ниже границы "минеральное дно")

При определении мощности торфа метод отраженных волн является вспомогательным — применяя его совместно с методом преломленных волн, получают наиболее точные данные.

Годографы отраженных волн в основном имеют прямолинейный вид:

$$t_x^2 = t_a^2 - \frac{\lambda^2}{V_1^2}$$

с углом наклона

$$\varphi = \arccos \frac{V_1}{V_2}$$

где  $t_x$  — время прихода волны, отраженной от контакта между слоями;  
 $t_a$  — время прихода отраженной волны в случае, когда сейсмоприемник расположен в непосредственной близости от точки удара ( $\lambda=0$ );

$V_1$  — скорость упругой волны ( $P$ ) в торфе.

Определение  $t_a$  производится обычно по величине отрезка, отсекаемого продолжением годографа на оси  $t$  в точке  $\lambda=0$ , а  $V_1$  по  $\varphi = \arccos \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{1}{\sin^2 \varphi}$ .

Глубину залежи находят по формуле

$$h_1 = 0,5 \cdot t_a \cdot V_1$$

В случае, когда скорость упругих волн в верхнем слое (торф) изменяется с глубиной, годограф отраженной волны имеет некоторую кривизну. Для определения средней скорости волны в данном случае необходимо построить касательную к кривой годографа в средней точке криволинейного отрезка и определить скорость этой касательной по формуле  $V_1 = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t}$ .

### Приложение 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БОЛОТНЫХ ГРУНТОВ ПО СКОРОСТИ И ЗАТУХАНИЮ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

В результате статистической обработки экспериментальных материалов получены зависимости сейсмоакустических характеристик от показателей состава и состояния торфяного грунта (рис. 19-23, табл. 1, 2).

Для удобства определения ряда физических характеристик и сжимаемости торфа по скорости  $V_2$  составлена номограмма (рис. 23).

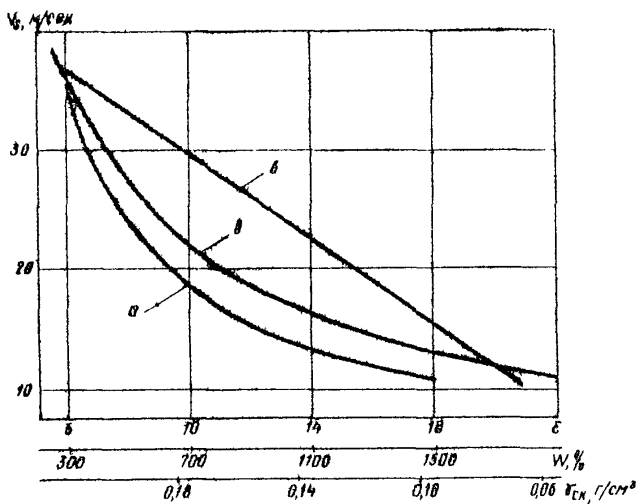


Рис. 19. Зависимости скорости поперечной волны  $v_s$  от влажности  $W$ , коэффициента пористости  $\epsilon$  и объемной массы скелета торфа  $\rho_{sk}$   
 а -  $W$ , б -  $\epsilon$ , в -  $\rho_{sk}$

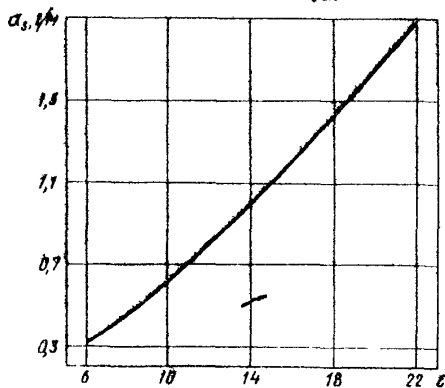


Рис. 20. Зависимость коэффициента затухания поперечной волны  $\alpha_s$  от коэффициента пористости торфа  $\alpha_s = f(\epsilon)$

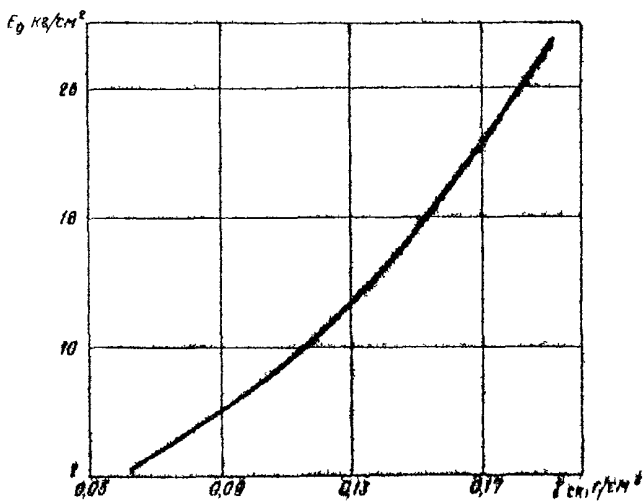


Рис. 21. Зависимость динамического модуля упругости  $E_d$  от объемной массы образца грунта  $E_d = f(\gamma_s)$

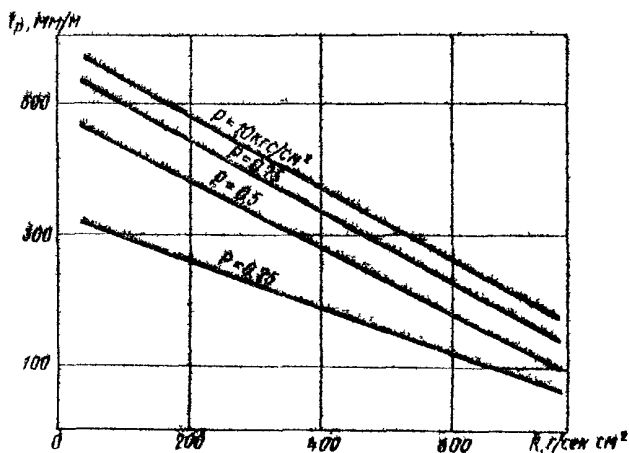


Рис. 22. Зависимости модуля осадки  $l_p$  от акустической жесткости  $K_a$  грунта при нагрузках  $P = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 \text{ кг/см}^2$

Т а б л и ц а I

Физико-механические показатели торфа	Число измерений	Пределы измерений	Корреляционные уравнения	Среднеквадратичное отношение функции	Корреляционное отношение и коэффициент корреляции
$W$ , % влажность	647	300-1500	$V_s = 5,2 + \frac{9000}{W}$	$0,06 \cdot V_s$	0,88
$\sigma$ , коэффициент пористости	366	6-22	$V_s = 1,8 + \frac{204}{\sigma}$	$0,058 \cdot V_s$	0,95
	121	6-22	$\alpha_s = 0,025 \cdot \sigma^{1,4}$	0,06	0,89
$\gamma_{ск}$ , г/см <sup>3</sup> -объемная масса скелета	494	0,06-0,21	$V_s = 178 \cdot \gamma_{ск}^{-1,5}$	1,34	0,97
	110	0,06-0,20	$E_d = 1000 \cdot \gamma_{ск}^{2,14}$	0,95	0,91
Модуль осадки $l_p$ , мм/м					
$l_p$ при $P=0,25$ кгс/см <sup>2</sup>	55	-	$l_p = 330 - 0,35 \cdot R_d$	12	0,98
$P=0,5$	135	-	$l_p = 482 - 0,50 \cdot R_d$	20	0,95
$P=0,75$	53	-	$l_p = 547 - 0,53 \cdot R_d$	15	0,986
$P=1,0$	68	-	$l_p = 500 - 0,55 \cdot R_d$	25	0,97

Примечание.  $V_s$  — скорость поперечной волны;  $R_d$  — акустическая жесткость ( $R_d = \gamma_{ск} \cdot V_s$ );  $\alpha_s$  — коэффициент затухания поперечной волны.

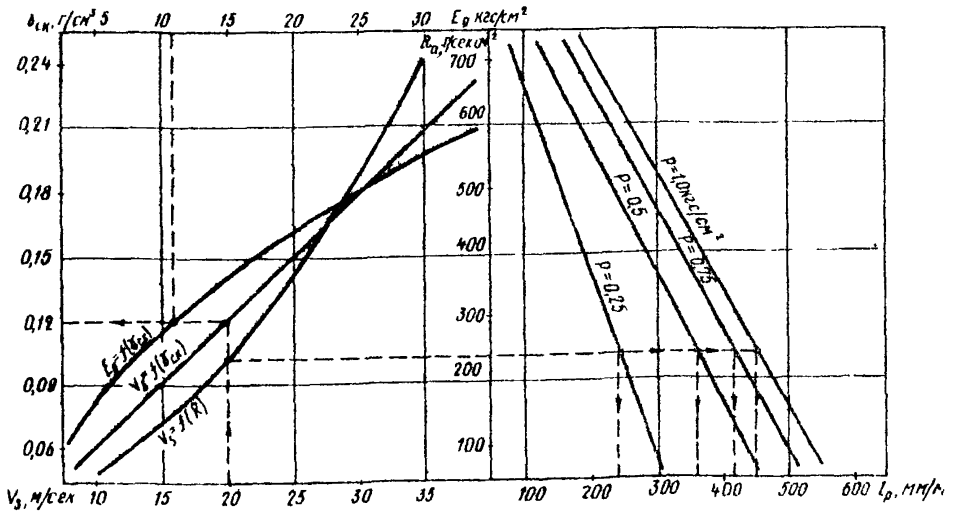


Рис.23. Номограмма для определения по скорости поперечной волны  $E_d$ ,  $\gamma_{ск}$ ,  $R_d$  и  $l_p$

Исследования скоростей  $V_s$  в органико-минеральных болотных отложениях (сапропелих и болотных илах) позволили получить эмпирические зависимости (см. рис.24 и табл.2).

Полученные зависимости выведены в основном по результатам исследований на низинных, верховых и переходных болотах (для верховых торфов при определении  $W$  и  $S$  по приведенным зависимостям вводится коэффициент  $I, 2$ ). Они получены по результатам исследований болотных массивов на территории Белоруссии и Прибалтики. Проведенный анализ болотных отложений других районов СССР (Европейская часть РСФСР, Урал, Сибирь) позволяет предположить, что полученные зависимости пригодны и для этих районов.

При вероятностно-статистическом анализе взаимосвязи между сейсмическими и физико-механическими свойствами за основу брали поперечные волны  $SH$  и их затухание, регистрируемые сейсмоприемником по линии  $V$ . Погрешность измерений ( $\sigma, W, J_{сж}$ )

методами сейсмодосветивания не превышает 10% по сравнению со стандартными методами (рис.25).

Анализ табл.1 и 2 показывает, что значения скоростей  $V_s$  зависят от физических характеристик болотных грунтов. Корреляционные уравнения между  $V_s$  и  $V_{сж}$  болотных грунтов показывают, что

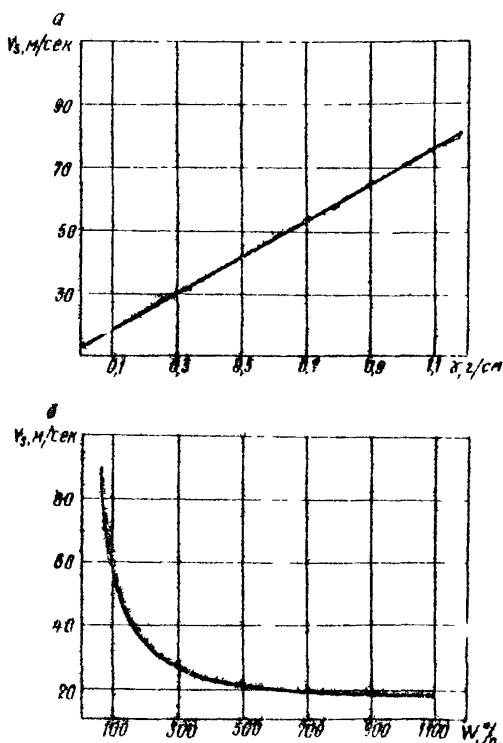


Рис.24. Зависимость скорости поперечной волны от объемной массы скелета (а) и влажности (б) органико-минеральных болотных грунтов

Т а б л и ц а 2

Физические параметры органо-минеральных отложений	Число измерений	Пределы измерений	Корреляционные уравнения	Средне-квадратичное отклонение функции	Корреляционное отношение и коэффициент корреляции
$W$ , %, влажность	256	50-1100	$V_s = 15,1 + \frac{1700}{W}$	$0,07 \cdot V_s$	0,86
$\gamma_{ск}$ , г/см <sup>3</sup> , объемная масса скелета	148	0,08-1,2	$V_s = 60 \cdot \gamma_{ск} + 12$	1,40	0,89
$\epsilon$ , коэффициент пористости	256	1,5-20	$V_s = 12,66 + \frac{103}{\epsilon}$	$0,065 \cdot V_s$	0,88

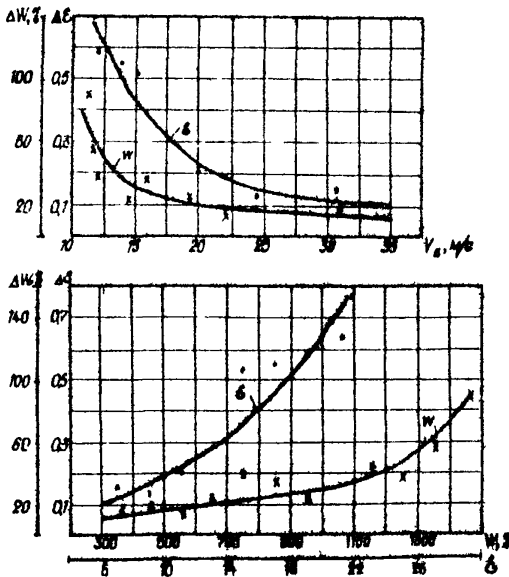


Рис.25. Погрешность измерений

скорости  $V_s$  находятся в прямой зависимости от количества частиц в единице объема, т.е. с увеличением частиц в объеме (уменьшается  $W$ ) увеличивается количество контактов между упругими пленками воды, окружающими частицы, плотность упаковки, а следовательно, увеличивается и скорость  $V_s$ .

Для органо-минеральных грунтов наблюдается резкое увеличение скорости  $V_s$  в естественной залежи, начиная с  $W=150-200\%$ . По нашему мнению, это связано с образованием более прочной коагуляционной структуры (затверждение коллоидов) при этих влажностях, поэтому происходит упрочнение (уплотнение), что вызывает резкое увеличение скоростей  $V_s$ .

более прочной коагуляционной структуры (затверждение коллоидов) при этих влажностях, поэтому происходит упрочнение (уплотнение), что вызывает резкое увеличение скоростей  $V_s$ .

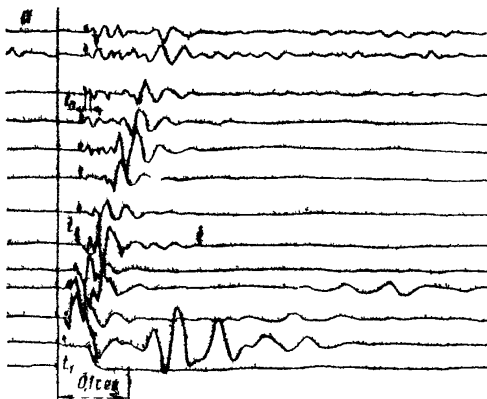


**Приложение 4. ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК БОЛОТНЫХ ГРУНТОВ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ**

**1. Исходные данные**

По результатам рекогносцировочных изысканий на автодороге Минск-Гродно намечены расчетные поперечники. Глубина болота не превышает 4 м.

В результате измерений на расчетном поперечнике в полевых условиях получены сейсмограммы по результатам сейсмозондирования (фильтрация 25 — 100 Гц, длина профиля 24 м, сейсмоприемники расставлены через 2 м) (рис. 26а) и по результатам сейсмического просвечивания валежи при  $X = 2,5$  и  $3,5$  м (рис. 26б).



**2. Построение гео-  
сейсмического профиля**

На сейсмограмме измеряют время первых вступлений волн (рис. 26а). Если вступления волн нечетки, замеры берут по фазам колебаний, производя поправку на фазу по четкому вступлению на одной из трасс сейсмограммы ( $t_m - t_g = t_n$ ) (рис. 27).

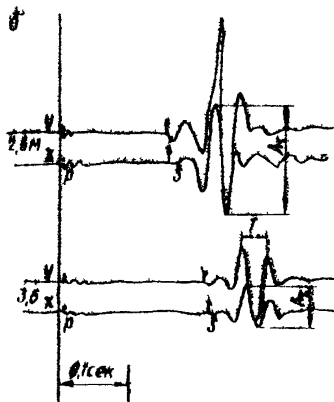


Рис. 26. Сейсмограммы, полученные по результатам измерений на расчетном поперечнике



$$t_n = t_{\phi} - t_0$$

Рис.27. Введение поправки за фазу  $t_n$

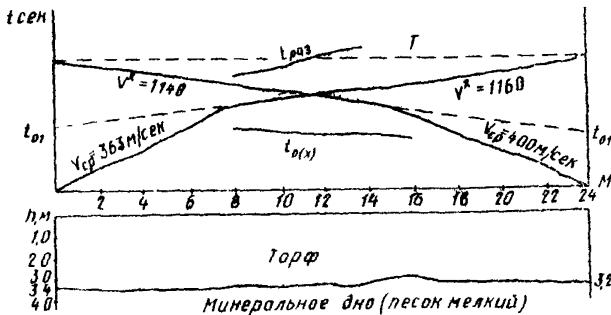


Рис.28. Годографы первых вступлений продольных волн и геосейсмический разрез

### 3. Определение $V_p$ и $V_s$ по результатам сейсмического просвечивания

На осциллограмме колебаний (см.рис.26 б) отмечают моменты первых вступлений продольных и поперечных волн, а если первые вступления нечетки, то по фазам вступления колебаний, делая поправку на фазу. Далее, пользуясь отметками времени, определяют время прихода волн и по формуле  $V = \frac{\lambda}{t}$  скорости  $V_p$  и  $V_s$  ( $t$  - время пробега волной расстояния  $\lambda$  от ПВ до сейсмопенетрометра).  $V_p = 795$  м/сек,  $V_s = 16,5$  м/сек.

По результатам замеров строят годографы (рис.28). Для этого по оси ординат откладывают время вступления, а по оси абсцисс — расстояния. Таким же образом строится встречный годограф.

По построенным годографам (см.рис.28) определяют кажущуюся  $V^*$ , пластовую среднюю  $V_n^*$  и граничную скорости методом равностояного годографа. Глубину залежи определяют методом  $t_0$  (см.приложение 2),

для чего используют отрезки времени, отсеваемые на оси ординат продолжением годографов ( $t_{01}$ ), а также по кривой  $t_{0(x)}$ , построенной на перекрытых участках встречных годографов. По полученным результатам строят геосейсмический разрез и геологический профиль (см.рис.28).

#### 4. Определение упругих характеристик

Для расчета упругих параметров используют следующие зависимости /1/:

$$E_d = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot (1 + \mu_d); \quad G_d = \rho \cdot V_d^2 = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)};$$

$$\mu_d = \frac{1}{2} - \frac{2 \cdot V_d^2}{2 \cdot V_p^2}; \quad \gamma = \frac{V_d}{V_p}.$$

где  $\mu_d$  — динамический коэффициент Пуассона;  $G_d$  — динамический модуль сдвига;  $E_d$  — динамический модуль упругости;  $\rho = \frac{G}{V_d^2}$  — плотность ( $\gamma_v$  — объемная масса;  $G$  — ускорение силы тяжести).

Для расчета необходимо знать скорости  $V_p$  и  $V_d$ , а также объемную массу грунта или объемную массу скелета грунта. Если известна величина объемной массы скелета  $M_{sk}$   $2,1 \cdot 10^4$ , то  $E_d$  определяют по корреляционной зависимости  $E_d = 1000 \cdot M_{sk}^{2,14}$  или по  $V_p$ ,  $E_d = 1000 \cdot (\frac{V_p + 1,15}{1,78})^2 \cdot 1,4$ . По данным примера  $\rho = 0,96 \text{ т/см}^3$ ;  $E_d = 7,83 \text{ кгт/см}^2$  по эмпирической формуле —  $E_d = 7,95 \text{ кгт/см}^2$ ;  $\mu_d = 0,499$ ;  $\gamma = 0,02$ ;  $G_d = 2,65 \text{ кгт/см}^2$ .

#### 5. Определение диссипативных характеристик

На осциллограммах, полученных на одной и той же глубине, но на равном расстоянии (2,5 и 3,5 м от ПЗ, при одной и той же толщине) измеряют максимальный размах амплитуды, и также период колебаний (см. рис. 280), для чего выделяют участки с отчетливой выпуклостью и большим числом периодов колебаний.

Коэффициент затухания определяют по формуле

$$\alpha_d = \frac{f}{\Delta x} \cdot \ln \frac{A_1}{A_2} = 1,06 \text{ 1/м},$$

где  $\Delta x$  — расстояние между точками наблюдения;

$A_1$  и  $A_2$  — амплитуды в наблюдаемых точках.

Для определения  $\alpha_d$  необходимо выбирать более четкие участки во колебаниях осциллограмм. Если наблюдаются дисперсия показаний, наблюдая среднестатистическую величину.

Частота колебаний

$$f = \frac{1}{T} = \frac{u \cdot N}{S} = \frac{160}{5,3} \approx 30 \text{ Гц},$$

где  $f$  — период колебаний, сек;

$u$  — скорость движения булавки и осциллографа, мм/сек;

$S$  — длина участка осциллограммы, содержащего  $N$  периодов колебаний, мм.

Логарифмический декремент  $\Delta_s$  определяют из соотношения /19/

$$\Delta_s = \lambda_s \cdot \alpha_s = 0,58,$$

$\lambda_s$  — длина волны, определяемая по формуле  $\lambda_s = V_s \cdot T = \frac{V_s}{f} = 0,55 \text{ м}$ .  
Коэффициент демпфирования находят по формуле

$$D = \frac{\Delta_s}{\sqrt{4\pi^2 + \lambda_s^2}} = \frac{0,58}{\sqrt{4 \cdot 3,14^2 + 0,55^2}} = 0,157.$$

Коэффициент вязкости /II/

$$\eta = \frac{I \cdot \rho \cdot V_s^2}{2f \cdot \Delta_s} = \frac{96 \cdot 16,5^2}{2 \cdot 0,58} \approx 2,25 \text{ кг/сек} \cdot \text{см}^2.$$

( $f$  принимается равной 1 Гц).

#### 6. Определение физических характеристик

По полученным скоростям  $V_s$  и их затуханию, используя корреляционные уравнения (см. приложение 3), определяют  $W = 802\%$ ;  $\zeta = 13,8$ ;  $K_x = 0,101 \text{ г/см}^3$ .

По номограмме определяют модули осадки для нагрузок 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 кг/см<sup>2</sup>, которые соответственно равны 265, 395, 452 и 490 мм/м. Чтобы получить модули осадки для других нагрузок строят зависимость  $l_p = f(P)$  (рис.29).

$l_p$ , мм/м

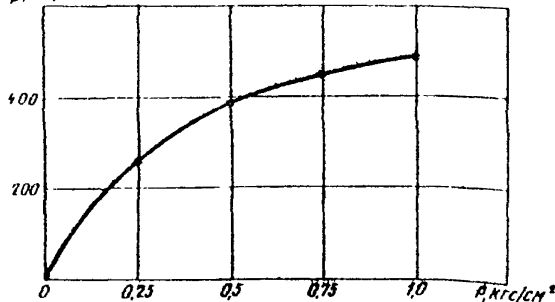


Рис.29. Построение зависимости  $l_p = f(P)$

Параллельно можно проконтролировать  $l_p$  по зависимостям для торфа /12,13/:

$$l_p = \frac{360(\zeta_0 - 0,36)I, I}{I + \zeta_0} \cdot l_G(3,12 \cdot \rho \sqrt{\zeta_0}),$$

для органико-минеральных грунтов до 1,0 кг/см<sup>2</sup>:

$$l_p = \frac{360(\zeta_0 - 0,36)I, 33}{I + \zeta_0} \cdot l_G(3,12 \cdot \rho \sqrt{\zeta_0}).$$

При определении коэффициента пористости по  $V_g$  и  $\alpha_g$  для получения более точного результата берется среднearифметическая величина. По  $\alpha_g$   $\bar{C} = 14,5$ , по  $V_g$   $\bar{C} = 13,8$ .

$$\bar{C} = \frac{14,5 + 13,8}{2} = 14,1.$$

## 7. Определение прочностных характеристик

Для получения прочностных характеристик используют корреляционные уравнения, связывающие сопротивление сдвигу на крильчатке с влажностью  $W$  и пористостью  $\bar{C} / 14,1$ :

$$C_{\text{уол}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0,515 \cdot \bar{C} - 0,75} + \frac{1}{0,007 \cdot W + 1,10} \right) = 0,137 \text{ (тис/см}^2\text{)}.$$

### Приложение 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ

В зависимости от условий и технических задач стоимость различных методов намываний и их технические показатели могут меняться, поэтому выбор методов должен быть обоснован технико-экономическими расчетами.

Стоимость работ стандартных методов (бурение) оценивалась по ЕНВ — Единым нормам времени и расценки на проектные и исполнительские работы (М., Стройиздат, 1972), стоимость сейсморазведки — по ЕНВ (сейсморазведание и профилирование) и опыту Беддорнии и других организаций (сейсмическое просеивание, намывоча).

Проведенные расчеты не предназначены для составления норм выработки, но могут быть использованы для сравнительных расчетов.

За исходные данные при расчете стоимости работ взяты следующие показатели:

для определения толщины насыпи и болотного грунта под ней взят участок 100 м, толщина насыпи 2 м, болотного грунта 2 м;

для определения влажности и мощности болотной залежи — участок болота длиной 100 м и глубиной 4 м<sup>2</sup>;

для определения показателей  $\bar{C}$ ,  $k_{\text{ж}}$  и  $\bar{L}_p$  — точка на глубине 2 м. На этой глубине отбирают пробы и монолит и производят измерения скоростей упругих волн.

Результаты сведены в табл. 3.

\*Объем работ и методы см. в "Методических указаниях по инженерно-геологическому обследованию болот для намывания автомобильных и железных дорог". М., Сводорнии, 1973.

Таблица 3

Показатель	Состав работ		Стоимость, руб.		Возможность ошибки по сред- нему с бурением и лабораторными испытаниями, %
	стандартные методы	методы сейсмо- акустики	стандарт- ные ме- тоды	сейсмоаку- стика	
W, %, влажность	полевые работы по зондирова- нию с отбором проб; лабора- торные испытания; оформле- ние результатов	полевые работы по измерению скоростей упругих волн; обра- ботка и оформление результатов измерений	18,5	9,00	5-10
С, коэффициент пористости	полевые работы с бурением и отбором проб или монолита; лабораторные испытания; взвешивание, плотность, объем- ная масса; вычисления и оформление результатов	то же	4-20	0-92	2-8
38 ρ <sub>ск</sub> , объемная масса скелета	полевые работы с бурением и отбором проб или монолита; лабораторные испытания; взвешивание, объемная масса; вычисления и оформление	—	3-96	0-92	2-5
Сжимаемость (мо- дуль осадки)	полевые работы: бурение с обсадкой, отбор монолита; лабораторные испытания; вычисления и оформление	—	5-24	1-60	5-10
Определение глубин богатой азотки	зондирование богатой за- лежи; оформление резуль- татов	сейсмораспределение, обработка и оформление результатов установками: одноканальными многоканальными	2-60 3-65	5-70 7-00	2-15
Определение толщин вскрыши и мощно- сти богатых грун- тов под ней	ручное бурение с отбором проб инъекционное бурение с отбором проб (УБ-50А)	сейсмораспределит., обработ- ка и оформление резуль- татов установками: одноканальными многоканальными	7-12 (23-58 с обсадкой) 10-00-18-10 (с обсадкой)	5-70 7-00	2-15

Приложение 6. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА "K"  
В МЕТОДЕ "1/6"

$\sqrt{1/6}$	$1/2 \cos i$	$\sqrt{1/6}$	$1/2 \cos i$	$\sqrt{1/6}$	$1/2 \cos i$
0,01	0,500	0,24	0,515	0,47	0,566
0,02	0,500	0,25	0,516	0,48	0,569
0,03	0,500	0,26	0,518	0,49	0,573
0,04	0,500	0,27	0,519	0,50	0,577
0,05	0,501	0,28	0,521	0,51	0,582
0,06	0,501	0,29	0,522	0,52	0,586
0,07	0,501	0,30	0,524	0,53	0,590
0,08	0,502	0,31	0,526	0,54	0,595
0,09	0,502	0,32	0,528	0,55	0,599
0,10	0,503	0,33	0,530	0,56	0,604
0,11	0,503	0,34	0,532	0,57	0,609
0,12	0,504	0,35	0,534	0,58	0,614
0,13	0,504	0,36	0,536	0,59	0,619
0,14	0,505	0,37	0,539	0,60	0,625
0,15	0,505	0,38	0,541	0,61	0,631
0,16	0,506	0,39	0,543	0,62	0,637
0,17	0,507	0,40	0,546	0,63	0,643
0,18	0,508	0,41	0,548	0,64	0,650
0,19	0,509	0,42	0,551	0,65	0,658
0,20	0,510	0,43	0,554	0,66	0,666
0,21	0,511	0,44	0,557	0,67	0,674
0,22	0,512	0,45	0,560	0,68	0,682
0,23	0,513	0,46	0,563	0,69	0,691
0,70	0,700	0,79	0,816	0,88	1,051
0,71	0,710	0,80	0,834	0,89	1,096
0,72	0,721	0,81	0,854	0,90	1,148
0,73	0,732	0,82	0,875	0,91	1,208
0,74	0,744	0,83	0,898	0,92	1,278
0,75	0,756	0,84	0,923	0,93	1,362
0,76	0,769	0,85	0,950	0,94	1,468
0,77	0,784	0,86	0,980	0,97	2,075
0,78	0,800	0,87	1,013	0,98	2,510
				0,99	3,620

Приложение 7. НАХОЖДЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ МОДУЛЯ СДВИГА  $G_d$   
 (в кг/см<sup>2</sup>) ПРИ ВЕЛИЧИНЕ ОБЪЕМНОЙ МАССЫ  $\rho = 1,0$  г/см<sup>3</sup>

$V_s$ , м/сек	$G_d$ , кг/см <sup>2</sup>	$V_s$ , м/сек	$G_d$ , кг/см <sup>2</sup>	$V_s$ , м/сек	$G_d$ , кг/см <sup>2</sup>	$V_s$ , м/сек	$G_d$ , кг/см <sup>2</sup>
8	0,65	24	5,88	40	16,33	56	32,00
9	0,83	25	6,38	41	17,15	57	33,15
10	1,02	26	6,90	42	18,00	58	34,33
11	1,23	27	7,44	43	18,87	59	35,52
12	1,47	28	8,00	44	19,75	60	36,73
13	1,72	29	8,58	45	20,66	61	37,97
14	1,99	30	9,18	46	21,59	62	39,22
15	2,29	31	9,81	47	22,54	63	40,50
16	2,61	32	10,45	48	23,51	64	40,80
17	2,95	33	11,11	49	24,50	65	43,11
18	3,31	34	11,79	50	25,51	66	44,45
19	3,68	35	12,50	51	26,54	67	45,81
20	4,08	36	13,22	52	27,59	68	47,18
21	4,50	37	13,97	53	28,66	69	48,58
22	4,94	38	14,73	54	29,75	70	49,99
23	5,40	39	15,52	55	30,87	71	51,44
72	52,89	82	68,61	92	86,37	102	106,16
73	54,39	83	70,29	93	88,25	103	108,25
74	55,88	84	72,00	94	90,16	104	110,37
75	57,40	85	73,72	95	92,09	105	112,50
76	58,94	86	75,47	96	94,04	106	114,65
77	60,50	87	77,23	97	96,01	107	116,82
78	62,08	88	79,02	98	98,00	108	119,02
79	63,68	89	80,83	99	100,01	109	121,23
80	65,31	90	82,65	100	102,04	110	123,47
81	66,95	91	84,50	101	104,09		

Примечание. Модуль динамической упругости  $E_d$  для бо-  
 хотных грунтов естественной залежи можно приблизительно  
 находить по формуле  $E_d \approx 3G_d$ .



## Л и т е р а т у р а

1. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. М., "Недра", 1970.
2. Горняков Н.Н. Сейсморазведка при инженерно-геологических исследованиях рыхлых пород. М., ВостГинГео, 1971.
3. Шемшурин В.А. Рекомендации по комплексному применению геофизических методов при инженерно-строительных изысканиях. М., ЦТИОИЗ, 1972.
4. Горшенин П.В. Способ определения угла наклона и глубины залегания плоской наклонной преломляющей границы. Об. "Вопросы инженерной геологии и геофизики при изысканиях железных и автомобильных дорог". М., 1972.
5. Чибисов С.В. Обработка криволинейного географа упругих волн. Ж. геофиз., т.4, вып.2, 1934.
6. Кондратьев О.К., Гамбургцев А.Г. Сейсмические исследования в прибрежной части Восточной Антарктиды. М., Изд. АН СССР, 1963.
7. Ляховицкий Ф.М. Об определении мощности градиентного слоя, лежащего на однородном полупространстве. Сер. "Физика Земли", Изд. АН СССР, 1965, № 9.
8. Озеров Д.К., Волин А.П. Теоретико-экспериментальное исследование волн Лява. "Вопросы динам. теор. распределения сейсмических волн", об.П. Л. Изд. ЛГУ, 1959.
9. Кмитовенко А.Т., Рондарев В.И. и др. Опыт использования сейсмического метода разведки для определения глубины торфяной залежи. "Торфяная промышленность", №8, 1972.
10. Рязовский В.В., Ямщиков В.В. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. М., "Наука", 1973.
11. Миндель Н.Г. Изучение физико-механических свойств лесовых пород сейсмоакустическими методами. М., ПНИИО, т.4, 1970.
12. Дровд П.А. Сельскохозяйственная дорога на болотах. Минск, "Урожай", 1965.
13. Евгеньев И.Е., Яромко В.Н., Обезьнов В.Е. Сжимаемость и прочность органико-минеральных болотных грунтов. М., СовздорНИИ, №90, 1976.

14. Яромко В.Н., Севьков В.Е. Исследование прочностных характеристик болотных грунтов в полевых условиях. М., Тр.Совхоздорнии, вып.64, 1973.

15. Бондарев В.Н. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. М., 1974.

16. Пузырев Н.Н., Мишенькина В.Р. Приближенные способы интерпретации годографов рефрагированных волн. Методика сейсмических исследований. М., "Наука", 1969.

17. Севьков В.Е. Применение методов сейсморазведки для исследования земляного полотна автомобильных дорог на болотах. Сб. "Вопросы повышения технического уровня дорожного строительства БССР". Минск, 1974.

18. Справочник геофизика. Т.IV, "Сейсморазведка". М., "Недра", 1966.

19. Берзон И.С., Епинатьева А.М. и др. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. М., Изд. АН СССР, 1962.