

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СОВЕТА МИНИСТРОВ БССР  
ПО ДЕЛАМ СТРОИТЕЛЬСТВА

(ГОССТРОЙ БССР)

БЕЛОРУССКИЙ ДОРОЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
(БЕЛДОРНИИ)

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ОБСЛЕДОВАНИЮ  
БОЛОТ МЕТОДАМИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

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

Минск 1976

"Методические рекомендации по инженерно-геологическому обследованию болот методами сейсморазведки" содержат 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.Сеськов под руководством и при участии канд.техн.наук В.И.Яромко. Общее редактирование осуществлено канд.техн.наук И.Е.Багровым.

При составлении "Методических рекомендаций..." учтены замечания Союздорнии, Союздорпросекта, Белгипрордора, БелГИИЗа, Белорусского научно-исследовательского института мелиораций и водного хозяйства и других организаций.

Оглавление и приложения по "Методическим рекомендациям..." просим прсылати по адресу: г.Минск, Типография, 28; Белдорнии.



Белорусский дорожный научно-исследовательский институт, 1976

## 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 сейсмопрофилирования.

1.3. Физико-механические характеристики болотных грунтов — влажность, коэффициент пористости, объемная масса скелета, скимающиеся, упругие и диссипативные характеристики — определяют методами сейсмического просвечивания и сейсмокаротажа 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: скорость дифференциации распространения упругих волн в болотных грунтах и грунтах минерального дна болота; различие акустических жесткостей болотных грунтов и грунтов минерального дна ( $\rho_g \cdot v_g \neq \rho_m \cdot v_m$ , где  $\rho_g$  и  $\rho_m$  — 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 полноту и достоверность получаемых характеристик болотных грунтов. На стадии предварительных изысканий, а также при одностадийном проектировании дорог IУ-У 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 слоя или слоя морачоты на поверхности болота (приложение 5).

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ БОЛОТНОЙ ВАЛЕЖИ

2.1. Сейсмические методы определения глубины болотной валежи целесообразно применять на всех этапах инженерно-геологического обследования болот<sup>4</sup>.

На первом этапе — **рекогносцировочном** — при соответствующем технико-экономическом обосновании (зимние 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 зондированием в 1-2 точках на каждом поперечнике. При наличии существующей насыпи или олеся мелорального 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  $K_p$  и поперечными  $K_{\perp}$ , поверхности и отраженных волн. С помощью МПВ можно выделить только те границы между блоками, на которых скорость упругих волн возрастает с глубиной ( $K_p > K_{\perp}$ ).

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

2.4. В ветреную погоду для уменьшения помех сейсмоприемники рекомендуется устанавливать в приямки и присыпать грунтом.

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

<sup>4</sup>Содержание этапов см. в "Методических указаниях по инженерно-геологическому обследованию болот при изысканиях автомобильных и железных дорог", И., Связдорник, 1973.

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

Поперечные волны  $\mathcal{S}V$  возбуждаются или аналогичным вертикальным ударом, или горизонтальным ударом (по направлению сейсмического профиля), который производят по вертикальной стенке специальной выкопанной ямки или по вкопанной подставке (удар  $X$ ).

Поперечные волны  $\mathcal{S}H$  возбуждаются горизонтальным ударом, но в направлении, перпендикулярном сейсмическому профилю (удар  $Y$ ).

Регистрация продольных волн производится сейсмоприемниками, расположеными вертикально (по направлению  $Z$ ), поперечных волн  $\mathcal{S}V$  сейсмоприемниками, расположеными горизонтально, по линии профиля (по направлению  $X$ ), поперечных волн  $\mathcal{S}H$  — сейсмоприемниками, расположеными 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 располагают по профилю в интервалах  $\Delta X$  (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.

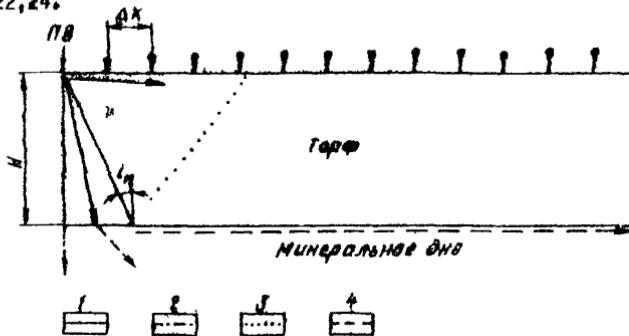


Рис. I. Схема сейсмического профиля:  
1 — прямая волна; 2 — проходящая; 3 — преломленная; 4 — скользящая

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

В отражной 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.

Нагоняющая 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 отложения 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 сейсмозондирования с использованием схем  $Z-Z$  или  $Y-Y$ . 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 определений глубины залежи необходимо применять встречные системы;

в) болота I типа с неднородными 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 органо-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 полностью полностью торфом) и слабой (болото с органо-минеральными грунтами). Рекомендуется применять встречные и нагоняющие системы.

2.10. Интерпретация данных сейсмических наблюдений при зондировании болот проводится в два этапа: I — сейсмическая и интэрпретация, включающая определение времени вступления различных типов волн на сейсмограммах или на экране осциллографа, построение гидографов, вычисление граничных скоростей, построение преломляющих границ и 2 — геологическая и интэрпретация, включающая построение геологического профиля по данным границ слоев, полученным на первом этапе.

2.11. Каждый тип волны характеризуется на сейсмограммах следующими параметрами: периодом ( $T$ ), амплитудой ( $A$ ) и затуханием ( $\alpha$ ). Различные типы волн обычно отделяются друг от друга на сейсмограмме периодами относительного сближения, 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 кажущейся скорости, резкое изменение амплитуды волны без значительного изменения ее периода, изменение формы записи на сейсмограмме.

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

Для построения гидографов 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 гидографы имеют три характерные формы строения: прямолинейные (см. п.2.9,а); криволинейные (см. п.2.9,г); комбинированное — болотная залежь имеет ярко выраженные градиентные свойства (торф переходит в ил; минеральное дно, как "однородный" окой).

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

Построение сейсмических границ для прямолинейных гидографов производят методами средних и пластовых скоростей, а для комбинированных и криволинейных — блокая градиентная сюда — методами О.К. Кондратьева, способом и др. (см. приложение 2).

Для определения глубины болота по методу поверхностных волн используется связь между фазовой и групповой висостью волн и отношением длины волны к толщине слоя  $\frac{1}{4}\lambda$  или перисдом, отнесенным по времени пробега поперечной волны поперек слоя (см. приложение 2).

2.15. Геологическая интерпретация полученных результатов включается в построении геосейсмических профилей с выделением глубины минерального дна болота. На геологические профили наносят высотные отметки поверхности, дна болота, кровли озера, 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 СЕЙСМОКАРТАЖ)

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

Сейсмическое просвечивание и сейсмокартаж применяют на этапе подобных исследований и дополняют ее статическим зондированием. Сейсмические методы в отличие от стандартных дают не дискретные (в отдельных точках), а непрерывные характеристики между заданными ПВ и приемниками колебаний. Применение сейсмометодов увеличивает объем информации и повышает достоверность данных о физико-механических свойствах грунтов, позволяет получить ряд характеристик в полевых условиях, что применений лабораторных методов, что снижает стоимость работ в 3-5 раз.

3.2. При определении скоростей и коэффициента затухания упругих волн по вертикальной валки (сейсмокартаж) сейсмопелетриметр при

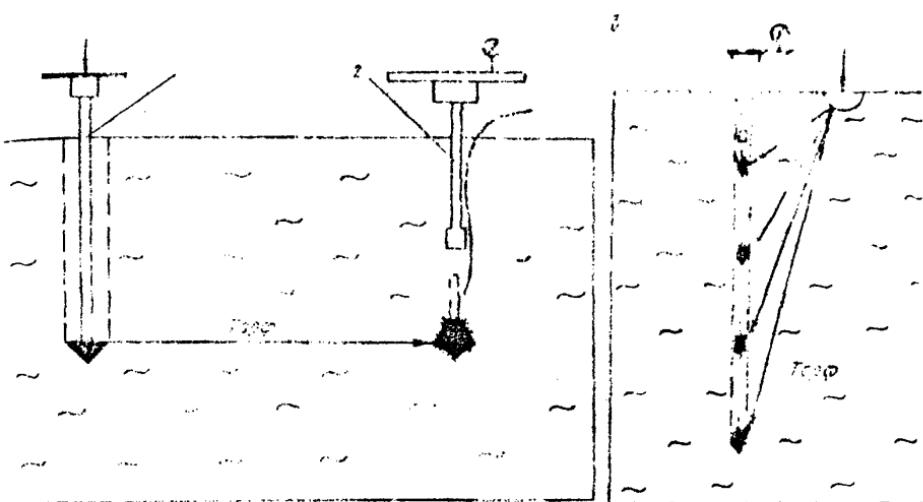


Рис.2. Способы измерения скоростей упругих волн в залежи:  
а) схема сейсмопроводивания; 1 — устройство для возбуждения  
колебаний; 2 — устройство для приема колебаний; б) схема  
сейсмокартажа

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

Регистрируется время прихода продольных и поперечных волн; при ударе по схеме  $Z-Z$  получают продольные, по схеме  $Y-Y$  — поперечные волны. После этого извлекают из болотного грунта сейсмопенетрометр, соединяют ее 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 проводивание) возбуждение колебаний производят конусным наконечником на расстоянии 1-4 м от сейсмопенетрометра, погруженного на ту же глубину.

Работы производят в следующем порядке:

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

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

3.4. Поперечные волны на расстоянии двух-трех длин волн от источника возбуждения выделяются четко. Выделение волн  $\Gamma\Gamma$  (удар и прием  $\Gamma\Gamma$ ) производят по признаку инверсий фаз. При переносе анака воздействия, а также интенсивности волн при ориентации сейсмоприемников по линиям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

3.5. По полученным вспомогательным — осциллограммам — (рис.3) определяют амплитуды упругих волн и их затухание в валеках.

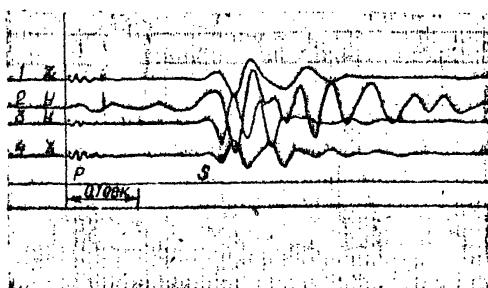


Рис.3. Осциллограмма проевецизации болотной валеки при  $X = 3$  м  
1-2 — сейсмоприемники расположены на поверхности валеки на  
расстоянии  $\lambda = 3$  м от ПВ; 3-4 — сейсмоприемники расположены  
в сейсмопелетромере на глубине  $\lambda = 3$  м и на расстоянии  $\lambda = 3$  м  
от ПВ

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

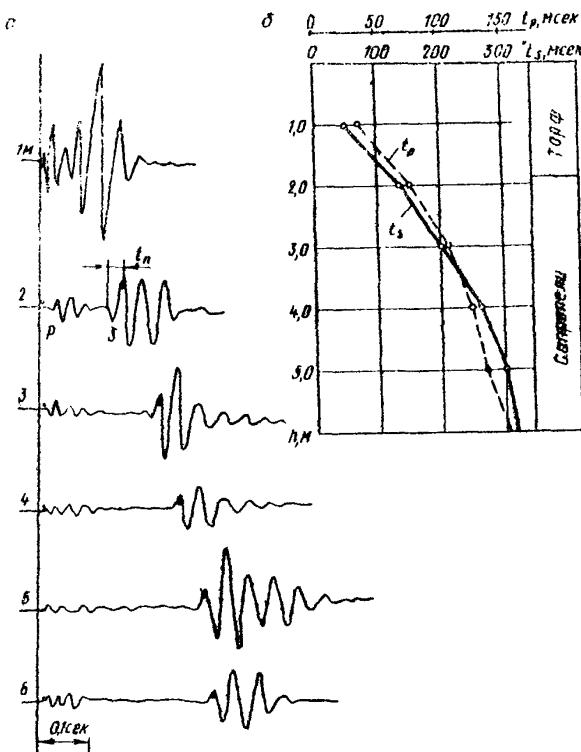


Рис. 4. Результаты измерения скоростей упругих волн по вертикали болотной залежи:  
а) сводная осциллограмма по результатам сейсмокартажа болотной залежи; б) вертикальные годографы и геологическая колонка

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

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

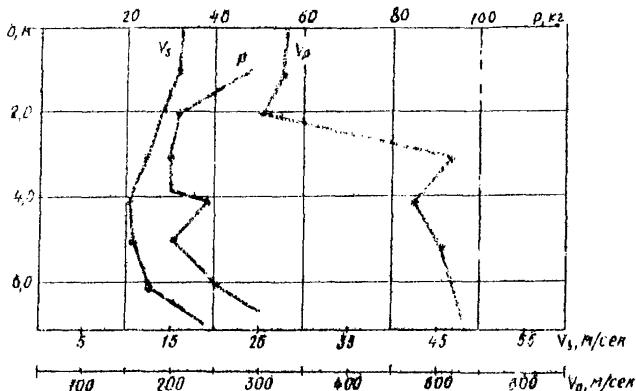


Рис. 5. Графики, построенные по результатам сейсмопрофилирования

#### Приложение I. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ АППАРАТУРА

При зондировании болотной валки рекомендуется применять два вида аппаратуры: многоканальные установки (при обследовании ракоподстиранных дорог и соущенных болот) и одно-, траекториальные (при обследовании новых трасс на неосущенных болотах). В качестве многоканальных установок можно использовать серийно выпускаемую сейсмостанцию "Поиск-1-6/12-АСИ", которая имеет фотоэлектрофотографическую и магнитную записи. Станция монтируется на автомобиле ГАЗ-69, но в случае необходимости ее можно переборудовать в переносную.

В качестве одноканальных установок рекомендуется использовать серийно выпускаемые установки ОСУ-2, ДОСУ-1 и регистратор эхолота ЭП-1. Для этих установок сконструирован специальный пульт управления, что позволяет использовать кюсю с 12-16 сейсмоприемниками, а также осуществлять фильтрацию в диапазоне частот 0-150 Гц.

Комплекс аппарата, применяемой при вондировании болотной залежи, предоставлен на рис.6.

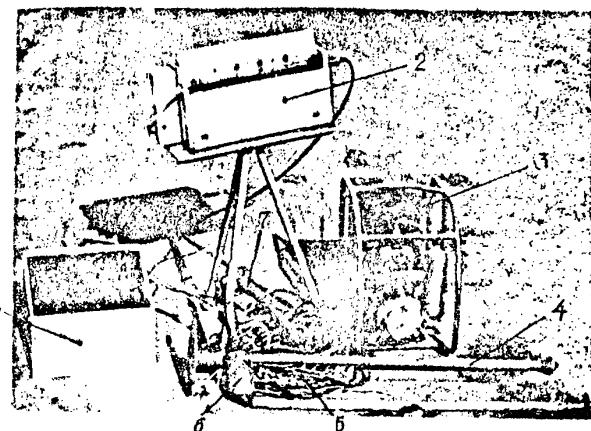


Рис.6. Комплекс аппарата и оборудования:  
1 — пульт управления; 2 — регистратор колебаний;  
3 — переносная электростанция; 4 — устройство для возбуждения колебаний внутри болотной залежи; 5 — кабель для подсоединения сейсмоприемников к регистратору (коса); 6 — конусный вонд сейсмопенетрометра; 7 —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

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

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 сейсмомониторировании болот рекомендуется использовать следующие типы сейсмоприемников: СПЭД-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 косяк из 6, 12 и 16 сейсмоприемников. Воздействие колебаний осуществляют ударом кувалды (масса 10 кг) по металлической или деревянной подставке.

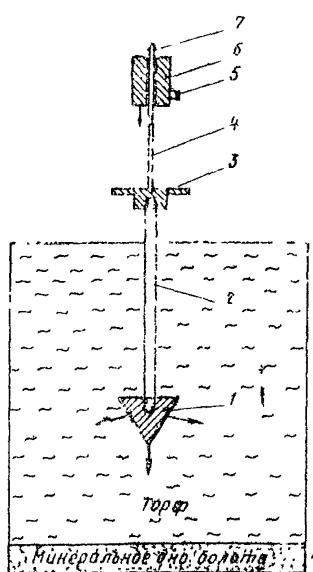


Рис. 7. Устройство для возбуждения колебаний внутри болотной залежи

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, сейсмопенетрометр, держатели).

Возбуждение упругих волн внутри озера осуществляли устройством (рис.7), которое состоит из конусного наконечника 1 с углом  $\alpha = 60-90^\circ$  и сечением 20 см<sup>2</sup>; станки для погружения конуса 2; металлической подставки 3, по которой производится удар падающим грузом; направляющей 4; контактов, замыкающихся 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 горизонтальным  $X$  и  $Y$ , возбуждая

Для приема упругих волн используют специально разработанный прибор — сейсмопенетрометр (рис.8), который позволяет проводить статическое зондирование слоистых болотных грунтов с измерением по глубине сопротивления гдавливанию 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 ( $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $Z$ ) 2; уставовки 3 с отверстиями для кабеля 9 и переходником для соединения со штангами; штанг для задавливания 4 с рукояткой 5 и механического измерительного устройства 7 конотрукции Л.С.Амаряна; при способления для извлечения сейсмопенетрометра 6; регистрирующей аппаратуры 8.

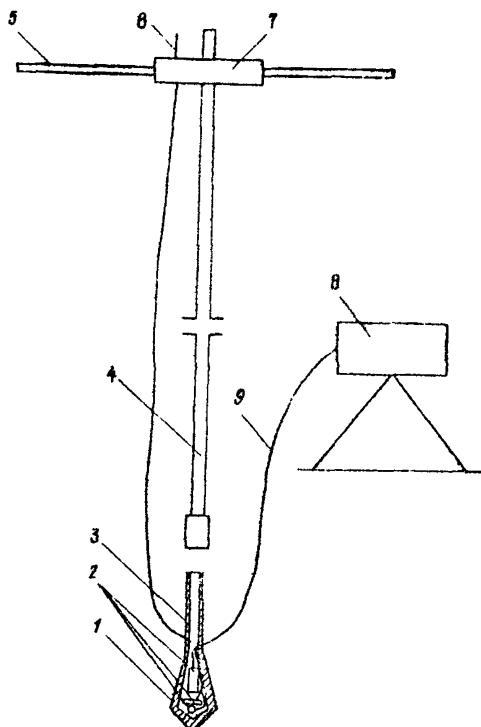


Рис.8. Схема сейсмопенетрометра

## Приложение 2. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ СЕЙСМОРАВВЕДКИ

### I. Определение скоростей по гидографам преломленных волн (прямолинейные гидографы)

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

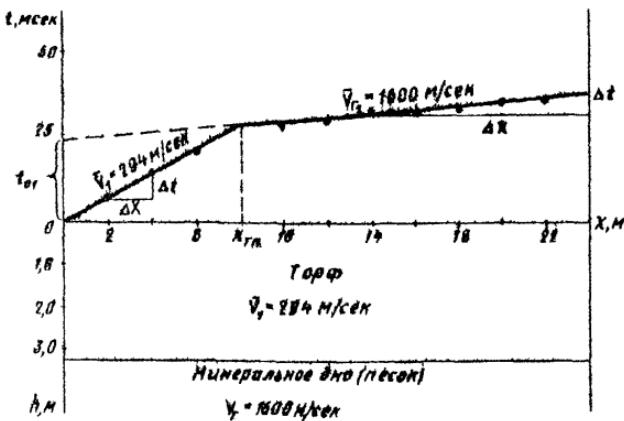


Рис.9. Определение скоростей и  $\frac{t}{x}$  по прямолинейному годографу первых всплесков продольной волны

получая граничные скорости можно определять по наклону отрезков с помощью формулы

$$V^* = \frac{dx}{dt},$$

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

Здесь наименьшая скорость  $V^*$  равна граничной скорости  $V_1$ .  
Всобще же наименьшая скорость равна  $V^* = \frac{V_1 \sin \psi}{1 + \tan \psi}$ , где  $\psi$  — угол между касательной к фронту волны и поверхностью земли.

Средние скорости прямой волны определяют по перегибу годографа,

В случае наклонных графиков для определения граничных скоростей применяют два основных способа: точный метод полей времени и приближенный метод разностного годографа (1,2,18). Обычно в инженерно-геодезических изысканиях используют более простой метод разностного годографа, который обеспечивает достаточную точность при малом угле наклона гравиции  $\psi$ . Метод требует встречной системы наблюдений с увязанными во времени точками годографами; причем разностный годограф строят лишь на участке перекрытия встречных

годографов (рис. IO).

Положение любой точки с координатой  $X$ , лежащей на линии разностного годографа, определяется равенством

$$t_{\text{раз}} = t_{\text{13}} - t_{\text{12}} + T,$$

где  $t_{\text{13}}$  и  $t_{\text{12}}$  — время по двум встречным годографам;

$T$  — время прихода волны во взаимных точках.

Разностный

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

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 разностному годографу. Таким же образом получают и другие точки.

Границную скорость определяют по формуле

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

где  $V_{\text{раз}}$  — скорость по разностному годографу;

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

В случае отсутствия перекрытого участка у встречных годографов значение  $V_r$  приближенно вычисляют по следующей формуле:

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

где  $V_1$  и  $V_2$  — значения кажущейся скорости по встречным годографам.

В случае наличия перекрытого участка, но неувязанной системы годографов (для волны  $t_1$ ) скорость  $V_{\text{раз}}$  находят по рис. II. Для оп-

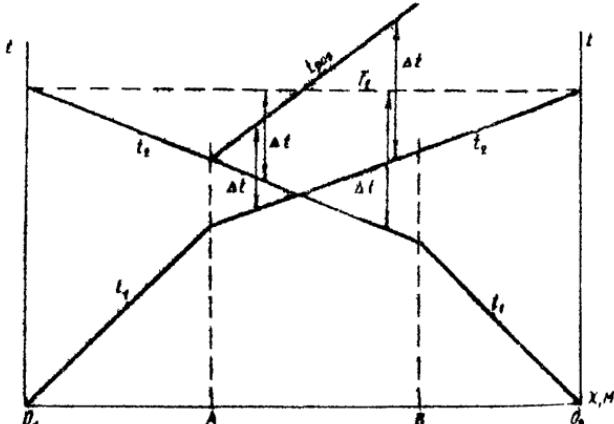


Рис. IO. Построение разностного годографа  $t_{\text{раз}}$

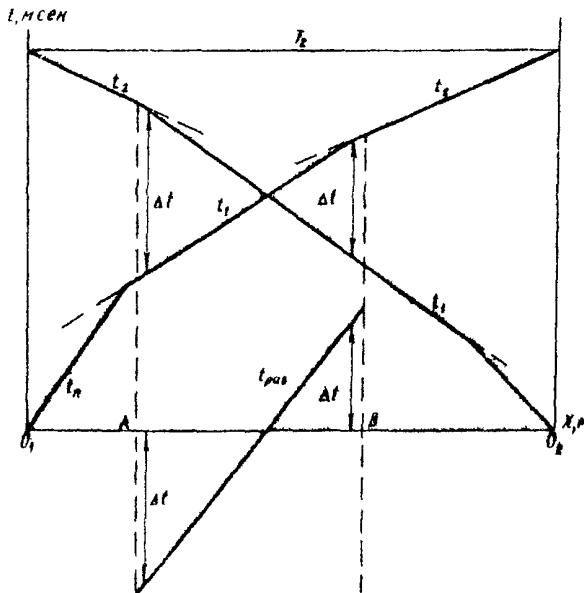


Рис. II. Построение разностного годографа  $t_{\text{рас}}$  (для волны  $t_1$ ) в случае неувязанной системы годографов

При проектировании (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 маковых преломленных границ, рассматриваются как один однородный слой с постоянной скоростью распространения пружих волн. Для построения границ необходимо иметь значения  $V$ ,  $\bar{V}$  и  $t_0$ .

Когда снят 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  $t_{\text{ж}}$  измеряют величину  $t_{(1)} - t_{(0)}$  и откладывают ее от любой линии, параллельной оси абсцисс.

## 2. Построение преломляющих границ

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

Для  $n$ -го слоя границу находят по формуле

$$h_n = \frac{\bar{V}_n \cdot t_{0n}}{2\sqrt{1 - (\bar{V}_n/V_{kn})^2}},$$

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

$$\bar{V}_n = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n}{h_1 V_1 + h_2 V_2 + \dots + h_n V_n},$$

$V_{kn}$  — граничная скорость вдоль этой границы;

$t_{0n}$  — значение  $t_0$  для  $n$ -й границы.

Для первой границы раздела

$$h_1 = \frac{\bar{V}_1 \cdot t_{01}}{2\sqrt{1 - (\bar{V}_1/V_{k1})^2}}.$$

Для первой границы можно использовать также формулу

$$h_1 = \frac{X_{r1n}}{2} \sqrt{\frac{V_{k1} - \bar{V}_1}{V_{k1} + \bar{V}_1}},$$

где  $X_{r1n}$  — точка пересечения годографа прямой и преломленной волн.

Приближенно глубину можно определить (горизонтальная граница, двухслойная среда) по положению точки перегиба ( $X_{r1n}$ ), как  $h = (0,33 + 0,4) \cdot X_{r1n} / 3$ .

Если имеется система встречных годографов, увязанных во взаимных точках, то глубину замеряют в любой точке профиля (имеющего перекрытий участок) можно определить по построенной линии  $t_{0(1)}$ , которую находят из соотношения

$$t_{0(x)} = \bar{t}_{(x)} + \tilde{t}_{(x)} - T.$$

Построение показано на рис. I2б.

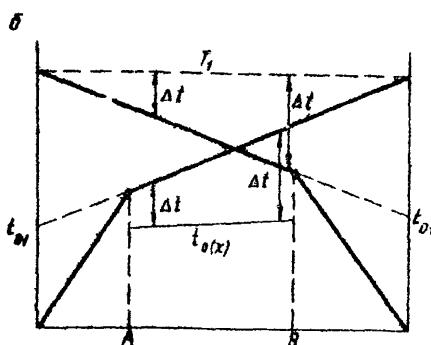
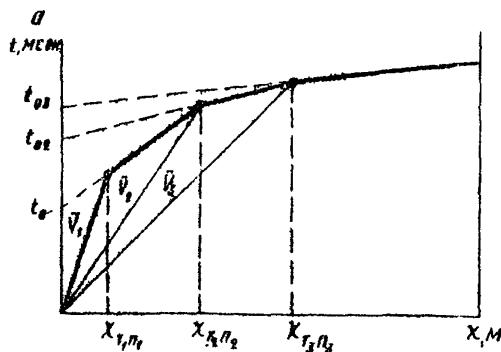


Рис. I2. Определение средних скоростей  $\bar{V}$  и  $t_0$  для многослойного разреза (а) и построение линии  $t_{0(x)}$  при встречной системе с перекрытием участками (б)

### Способ пластовых скважин /1,2,3/

Для определения мощности каждого слоя необходимо знать  $t_{02}$  и  $\nu_i$  для каждой границы.

Мощность первого слоя определяют способом, описанным выше.

Мощность второго слоя

$$h_2 = \frac{\nu_{i_1}}{2 \cos \nu_{i_2}} \cdot (t_{02} - \frac{\cos \nu_{i_2}}{\cos \nu_{i_1}} - t_{01}),$$

где  $\nu_{i_2} = \arcsin \nu / \nu_{i_1}$ ;  $\nu_{i_1} = \arcsin \nu / \nu_{i_2}$ ;  $\nu_{i_2} = \arcsin \nu / \nu_{i_3}$ .

Мощность третьего слоя

$$h_3 = \frac{\nu_{i_2}}{2 \cos \nu_{i_3}} \cdot (t_{03} - t_{02} \frac{\cos \nu_{i_3}}{\cos \nu_{i_2}} - (t_{02} - \frac{\cos \nu_{i_2}}{\cos \nu_{i_1}} \cdot t_{01}) \frac{\cos \nu_{i_3}}{\cos \nu_{i_2}}),$$

где  $\nu_{i_3} = \arcsin \nu / \nu_{i_2}$ ;  $\nu_{i_2} = \arcsin \nu / \nu_{i_3}$ ;  $\nu_{i_3} = \arcsin \nu / \nu_{i_4}$ .

$t_{01}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_{03}$  — соответственно время, отсекаемое на оси времени про-  
должениями первого, второго и последнего отрезков гидографов пре-  
ломленных волн.

Аналогичные формулы выводят и для следующих слоев.

Глубины преоценивающих границ находят суммированием мощностей  
взаимодействующих слоев.

Для приближенного определения  $\nu_i$  в методе пластовых скважин-  
также можно использовать формулу /15/

$$\nu_i \approx \left( \frac{2V^* \cdot V^i}{V^* + V^i} \right) \epsilon$$

где  $V^*$  и  $V^i$  — кажущиеся скорости преломленных волн от одной и  
той же границы, зарегистрированные по подъему и падению в в.

При использовании одноканальных установок (при двуххолойной  
среде) целесообразно определять положение наклонной границы по  
гидографам из одной точки пульта возбуждения по способу расстоя-  
ний (рис.15) /4/.

Наклон границы определяют по формуле

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

где

$$a = \frac{x_1^b \cdot x_2^b}{x_2^b - x_1^b} \quad b = -\left( \frac{x_1^b \cdot x_1^n}{x_1^n - x_1^b} + \frac{x_1^b \cdot x_2^n}{x_2^b - x_1^n} \right);$$

$$c = \frac{x_1^b}{2},$$

а ее глубину — по формуле  $h = \frac{x_1^b \cdot x_1^n}{x_1^n - x_1^b} \cdot \sin \varphi$ ,  
или как показано на рис.14.

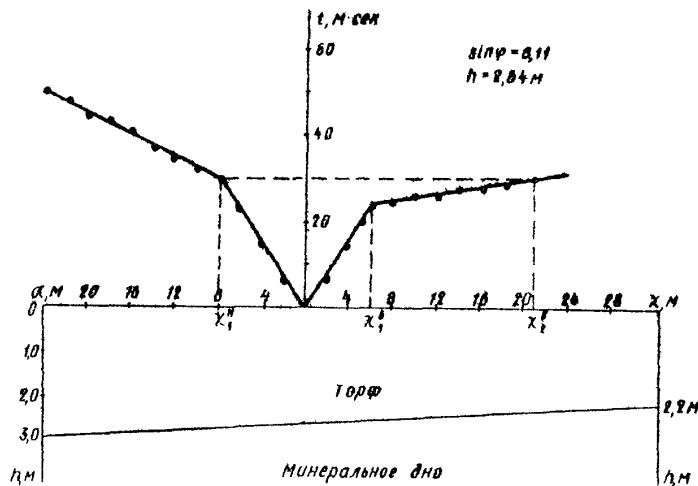


Рис. 13. Определение угла наклона и глубины залегания из одной точки пункта возбуждения

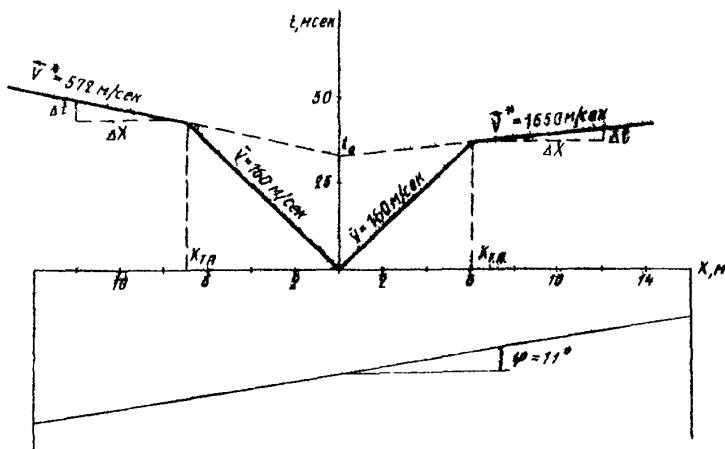


Рис. 14. Упрощенный аналитический способ определения скоростей и глубины залегания с центральным пунктом возбуждения

$$V = \frac{x_{\text{ко}}}{t_{\text{ко}}} = 160 \text{ м/сек}; \quad V' = \frac{\Delta x}{\Delta t} = 1650 \text{ м/сек};$$

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

$$\varphi = \frac{1}{2} (\arcsin \frac{V}{V'} - \arcsin \frac{V}{V''}) = \frac{1}{2} (\arcsin \frac{160}{572} - \arcsin \frac{160}{1650}) = 17^\circ;$$

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

### 3. Интерпретация годографов рефрагированных волн

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

По годографам рефрагированных волн можно определять скоростное строение валеки и  $t_{\text{ко}}$  по схеме, показанной на рис. 15.

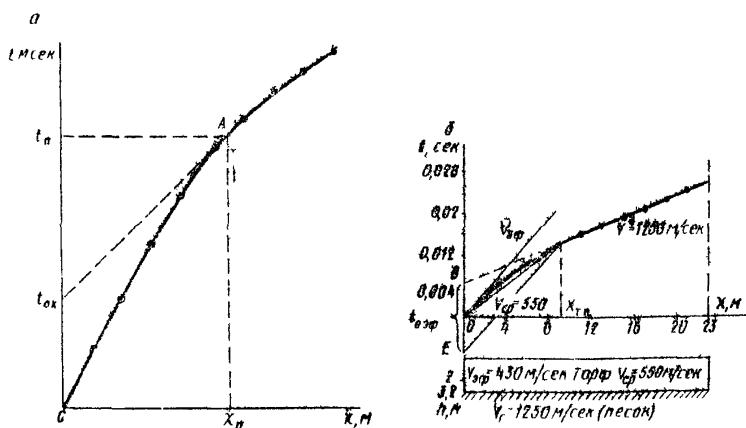


Рис. 15. Способы обработки криволинейных (а) и комбинированных (б) годографов

Глубину определяют по формулам /5,6/:

$$h = K(\bar{V}_n) \cdot t_0 = \frac{\bar{V}_n \cdot t_0}{2 \cos i}, \quad i = \arcsin \frac{\bar{V}_n}{V^*}, \quad K = \frac{1}{2} \cos i.$$

Вде

$$\bar{V}_n = \frac{1}{2} \left( \frac{x_n}{t_n} + \sqrt{V^* \cdot \frac{x_n}{t_n}} \right),$$

где  $x_n$  и  $t_n$  — координаты точки на гидографе рефрагированной волны;  
 $\bar{V}_n$  и  $V^*$  — пластовая и кажущаяся скорости.

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

$$\bar{V}_n = \frac{2x_n}{t_n} + \sqrt{\frac{2x_n}{t_n} \cdot V^*},$$

Может быть использован также способ, основанный на аппроксимации криволинейного гидографа отрезками прямых линий /15, 16/. Гидограф 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:

$$t_{0n} = t_n - \frac{x_{n-1}}{V_n}.$$

По значениям  $V_n$ ,  $t_{0n}$  и  $t_{02}$  находят мощность первого слоя:

$$h_1 = \frac{V_n \cdot t_{0n}}{2 \sqrt{1 - (V_n/V_1)^2}},$$

Мощность последующих слоев находят из выражения

$$h_{n-1} = \frac{t_{0n-1} \cdot V_{n-1}}{2 \sqrt{1 - (V_{n-1}/V_n)^2}},$$

где

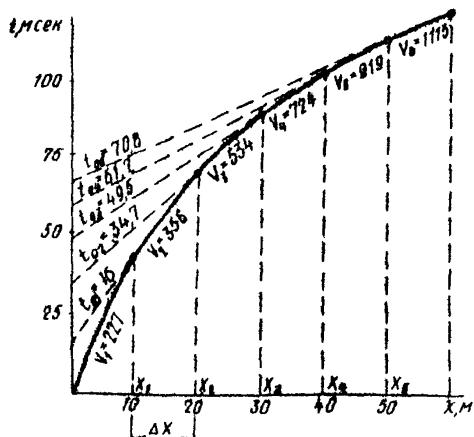
$$t_{0n} = t_{0n} - \sum_{k=1}^{n-2} t_{kn} = t_{0n} - \sum_{k=1}^{n-2} \frac{2h_k}{V_k} \cdot \sqrt{1 - (V_k/V_n)^2}.$$

Пример расчета по этому способу показан на рис. 16. Расстояние  $\Delta x$  между выбранными точками следует выбирать из условия

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

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

$V^*$  — кажущаяся скорость по гидографу в точке  $X$ .



1	2	3	4	5	6
V=227	V=356	V=534	V=724	V=919	V=1113
$t_{01}$ 16	$t_{02}$ 34.7	$t_{03}$ 49.8	$t_{04}$ 61.2	$t_{05}$ 70.8	
$V_1 = 70.0$	$V_2 = 35.6$	$V_3 = 53.4$	$V_4 = 72.4$	$V_5 = 91.9$	$V_6 = 111.3$
$t_{11}$ 2.4	$t_{12}$ -18	$t_{13}$ -19.0	$t_{14}$ -20.3	$t_{15}$ -20.8	
$t_{21}$ 1.7	$t_{22}$ 11.0	$t_{23}$ 19.1	$t_{24}$ 19.6		
$t_{31}$ 3.7	$t_{32}$ 11.0	$t_{33}$ 11.8	$t_{34}$ 12.2	$t_{35}$ 13.3	
$t_{41}$ 4.0	$t_{42}$ 7.7	$t_{43}$ 9.5	$t_{44}$ 9.8	$t_{45}$ 10.0	
$t_{51}$ 4.3	$t_{52}$ 4.8	$t_{53}$ 6.0			
$t_{61}$ 5.6					

$$V = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{10}{0.0441} = 227 \text{ м/сек}; \quad V_2 = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{20 - 10}{0.0722 - 0.0441} = 356 \text{ м/сек};$$

$$t_{02} = t_1 - \frac{x_1 - x_2}{V} = 0.0441 - \frac{10}{356} = 0.016 \text{ сек}; \quad h_2 = \frac{V \cdot t_{02}}{2\sqrt{1 - (\frac{V}{V_2})^2}} = \frac{227 \cdot 0.016}{2\sqrt{1 - (\frac{227}{356})^2}} = 2.4 \text{ м};$$

$$V_3 = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} = \frac{30 - 20}{0.0909 - 0.0722} = 534 \text{ м/сек};$$

$$t_{03} = t_2 - \frac{x_2 - x_3}{V_3} = 0.0722 - \frac{20}{534} = 0.0347 \text{ сек};$$

$$t_{04} = \frac{2t_{02}}{V} \sqrt{1 - (\frac{V}{V_2})^2} = \frac{2 \cdot 0.016}{0.0722} \sqrt{1 - (\frac{227}{356})^2} = 0.019 \text{ сек};$$

$$t_2 = t_{02} - t_{03} = 0.0347 - 0.019 = 0.0157 \text{ сек};$$

$$h_2 = \frac{c_2 \cdot V_2}{2\sqrt{1 - (\frac{V_2}{V_3})^2}} = \frac{0.0157 \cdot 356}{2\sqrt{1 - (\frac{356}{534})^2}} = 3.7 \text{ м} \text{ и т.д. Результаты см. в таблице.}$$

Рис. 16. Пример расчета определения окрестностей,  $t_{02}$  и глубины залегания по криволинейному гидографу (по В.Н. Бондареву)

Удовлетворительные результаты также дают формулы с использованием средних скоростей.

В случае комбинированного гидографа рекомендуется положение минерального дна ("однородный" слой) определять методом  $t_{\text{эфф}} / 7$ .

Для этого через точку  $X_{1a}$  (начало прямолинейного участка) проводят прямую под наклоном  $\sqrt{V_{\phi}}$  до пересечения с осью ординат в точке В.  $V_{\phi}$  равна наклону начальной части гидографа рефрактированной волны (см.рис.15б). Величина ВЕ в масштабе оси времени является эффективной величиной  $t_{\text{эфф}}$ . Далее определяют мощность слоя по формуле

$$h = \frac{V_{\phi} \cdot t_{\text{эфф}}}{2V_1 - (V_{\phi}/V_1)^2}.$$

#### 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 ЗН; б) поверхностный слой расположен на слое с меньшей скоростью распространения ЗН.

В первом случае используют формулу /8/

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

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:

$$h = \frac{T \cdot V_1}{4\sqrt{1 - \frac{V_{\phi}^2}{V_1^2}}}; \quad V = \sqrt{V_{\phi} \cdot V_1},$$

где  $V_{\phi}$  — групповая скорость.

Простейший способ определения фазовой скорости состоит в том, что определяют разность времен ( $t_{02} - t_{01}$ ) 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).

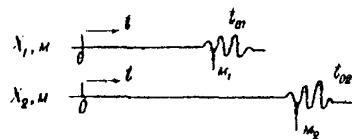


Рис.17. Схема определения фазовой скорости

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

Точность определения глубины и толщины насыпи 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 вогнутлениях хорошо выделяются отраженные волны (рис.18).

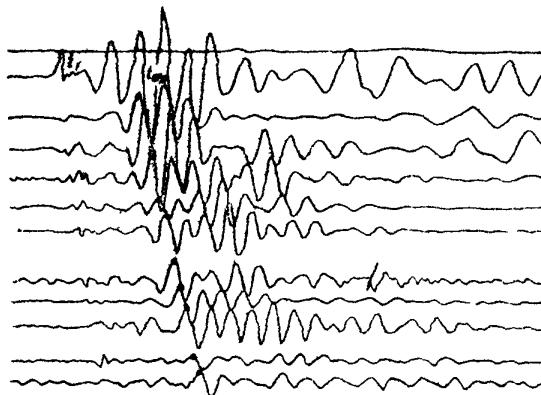


Рис.18. Характерная сейсмограмма на осушенном болоте (уровень грунтовых вод ниже границы "минеральное дно")

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:

$$t_x^2 = t_0^2 - \frac{x^2}{V^2}$$

с углом наклона

$$\varphi = \arctan \frac{x}{Vt_0}$$

где  $t_x$  — время прихода волны, отраженной от контакта между слоями;

$t_0$  — время прихода отраженной волны в случае, когда сейсмоприемник расположен в непосредственной близости от точки удара ( $x=0$ );

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

Определение  $t_0$  производится обычно по величине отрезка, отсекаемого продолжением годографа на оси  $t$  в точке  $x=0$ , а  $V$  по  $\varphi = \arctan \frac{x}{Vt_0} = \frac{x^2}{Vt_0^2}$ .

Глубину залежи находят по формуле

$$h = 0.5 \cdot t_0 \cdot V.$$

В случае, когда скорость упругих волн в верхнем слое (торфе) 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  $V = \frac{dx}{dt}$ .

### 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. I, 2).

Для удобства определения ряда физических характеристик и сходимости торфа по скорости  $V_s$  составлена nomogramma (рис. 23).

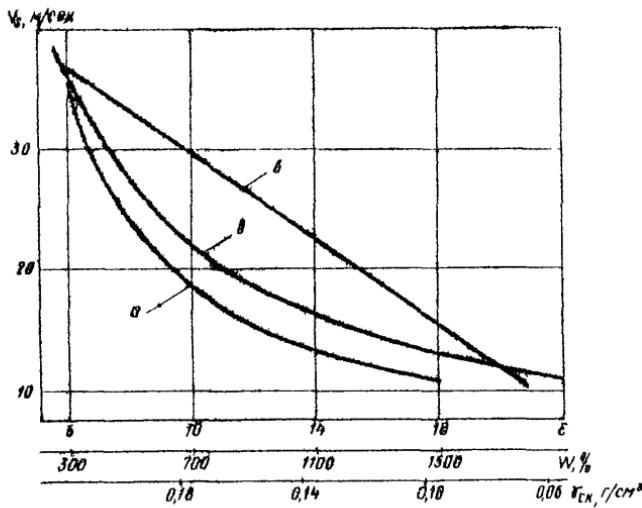


Рис.19. Зависимости скорости поперечной волны  $V_s$  от влажности  $W$ , коэффициента пористости  $\phi_s$  и объемной массы скелета торфа  $\rho_s$   
 а -  $W$ , б -  $\phi_s$ , в -  $\rho_s$

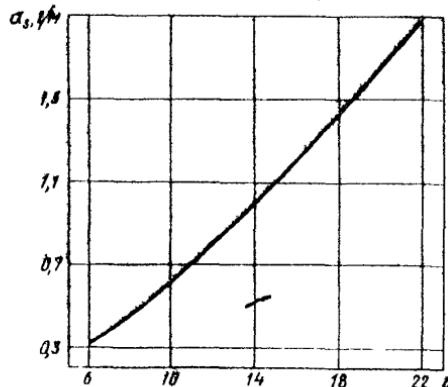


Рис.20. Зависимость коэффициента затухания поперечной волны  $\alpha_s$  от коэффициента пористости торфа  $\phi_s = f(\phi_s)$

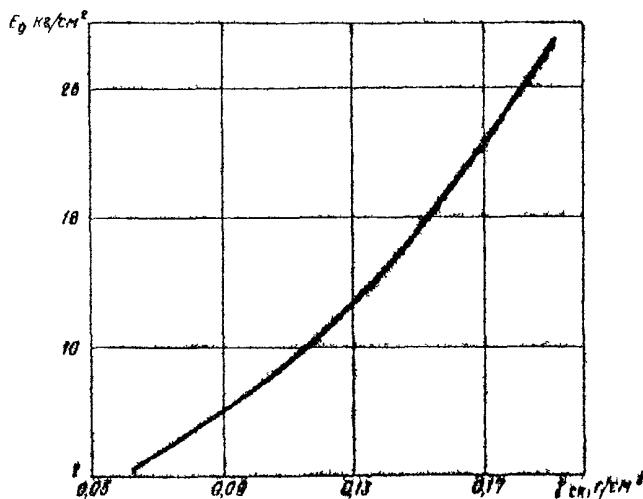


Рис. 21. Зависимость динамического модуля упругости  $E_d$  от объемной массы скелета торфа  $E_d = f(j_d)$

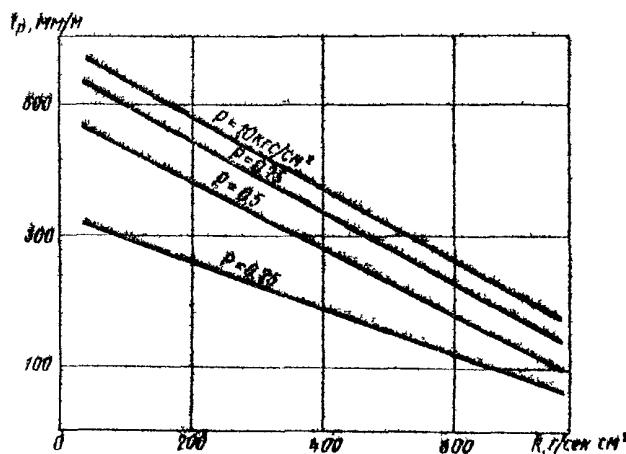


Рис. 22. Зависимости модуля осадки  $l_s$  от акустической жесткости  $K_d$  торфа при нагрузках  $P = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$  кН/см<sup>2</sup>

Таблица I

Физико-механические показатели торфа	Число измерений	Пределы измерений	Корреляционные уравнения	Среднеквадратичное отклонение функции	Корреляционно-коэффициент корреляции
IV, % влажность	647	300-1500	$V_s = 5,2 + \frac{9000}{IV}$	$0,06 \cdot V_s$	0,88
$\epsilon$ , коэффициент пористости	366	6-22	$V_s = 1,8 + \frac{204}{\epsilon}$	$0,058 \cdot V_s$	0,95
$\rho_{ok}$ , г/см <sup>3</sup> -объемная масса скелета	494	0,06-0,21	$\alpha_s = 0,025 \cdot \rho_{ok}^{1,4}$	0,06	0,89
	110	0,06-0,20	$V_s = 178 \cdot \rho_{ok} - 1,5$	1,34	0,97
Модуль осадки $l_p$ , мм/м			$E_d = 1000 \cdot \rho_{ok}^{2,14}$	0,95	0,91
$l_p$ при $P=0,25 \text{ кгс/см}^2$	55	-	$l_p = 330 - 0,35 \cdot R_a$	12	0,98
$P=0,5$	135	-	$l_p = 482 - 0,50 \cdot R_a$	20	0,95
$P=0,75$	53	-	$l_p = 547 - 0,53 \cdot R_a$	15	0,986
$P=1,0$	68	-	$l_p = 590 - 0,55 \cdot R_a$	25	0,97

Примечание.  $V_s$  — скорость поперечной волны;  $R_a$  — акустическая жесткость ( $R_a = \rho_{ok} \cdot V_s^2$ );  $\alpha_s$  — коэффициент затухания поперечной волны.

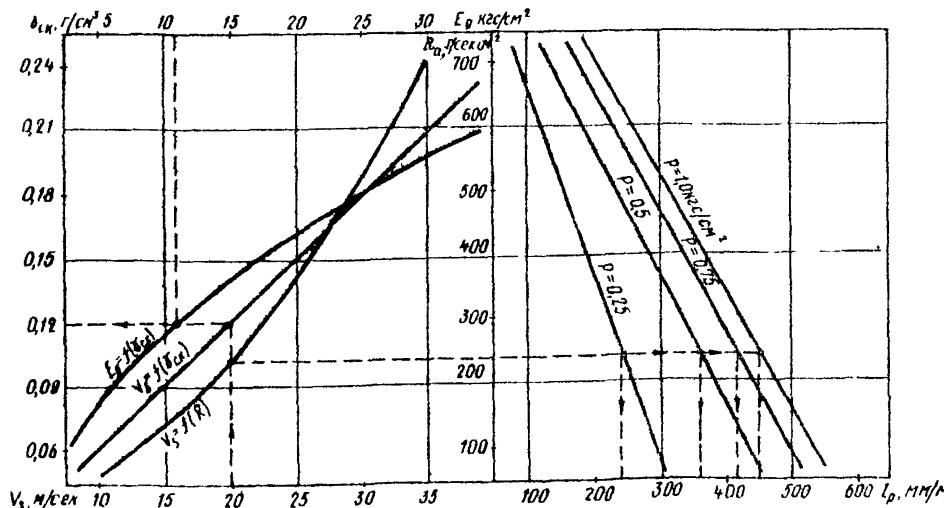


Рис.23. Номограмма для определения по скорости поперечной волны  $E_d$ ,  $\rho_{ok}$ ,  $R_a$  и  $l_p$

Исследования окрестей  $\text{K}_3$  в органо-минеральных болотных отложениях (сапропелах 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  $\delta$  по приведенным зависимостям вводится коэффициент 1,2). 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  $\text{ZH}$  и их затухание, регистрируемые сейсмоприемником по линии  $\text{V}$ . Погрешность измерений ( $\delta$ ,  $W$ ,  $\text{J}_{\text{ck}}$ ) методами сейсмопросвещивания не превышает 10% по сравнению со стандартными методами (рис.25).

Анализ табл.1 и 2 показывает, что значения скоростей  $\text{K}_3$  зависят от физических характеристик болотных грунтов. Корреляционные уравнения между  $\text{K}_3$  и  $\text{K}_{\text{сн}}$  болотных грунтов показывают, что

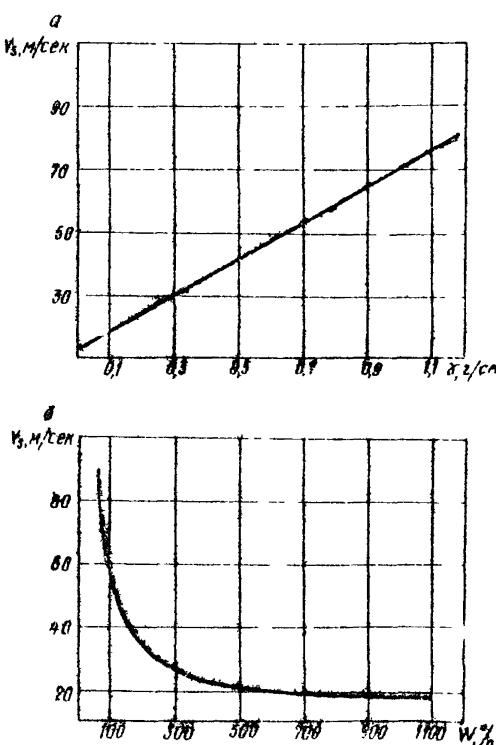


Рис.24. Зависимость скорости поперечной волны от объемной массы скелета (а) и влажности (б) органо-минеральных болотных грунтов

Таблица 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
$\rho_{\text{ок}}$ , г/ом <sup>3</sup> , объемная масса скелета	148	0,08-1,2	$V_s = 60 \cdot \rho_{\text{ок}} + 12$	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

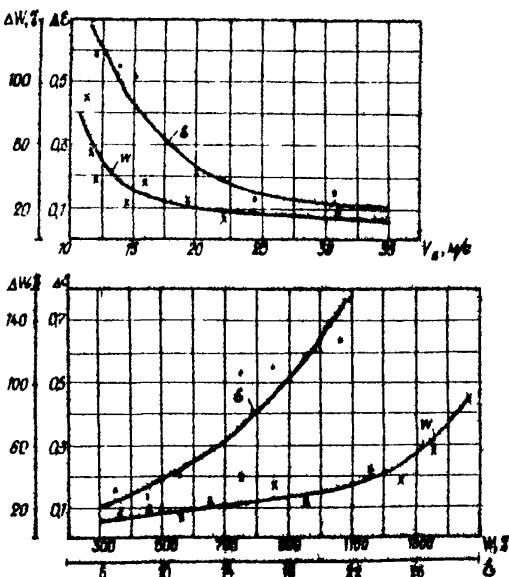


Рис.25. Погрешность измерений

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

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  $V_s$ .

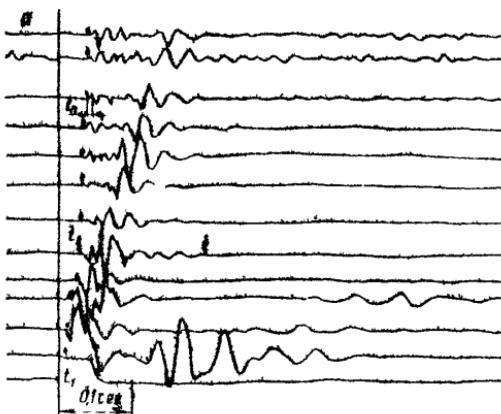
Для органо-минеральных грунтов наблюдается резкое увеличение скорости  $V_s$  в естественной залежи, начиная с  $W=150-200\%$ . По нашему мнению, это связано с образованием более

## 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 сейсмовиброндирования (фильтрация 25—100 Гц, длина профиля 24 м, сейсмоприемники расположены через 2 м) (рис. 26а) и по результатам сейсмического просвещивания валежи при  $X = 2,5$  и  $3,5$  м (рис. 26б).



### 2. Построение геосейсмического профиля

На сейсмограмме измеряют время первых вступлений волн (рис. 26а). Если вступления волн нечетки, измеряют по фазам колебаний, произведя поправку на фазу по четкому вступлению на одной из трасс сейсмограммы ( $t_m - t_3 = t_2$ ) (рис. 27).

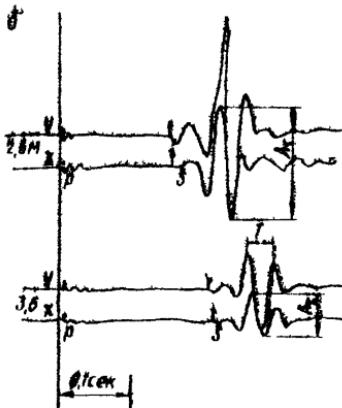


Рис. 26. Сейсмограммы, полученные по результатам измерений на расчетном поперечнике

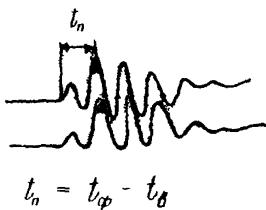


Рис.27. Введение поправки за фазу  $t_n$

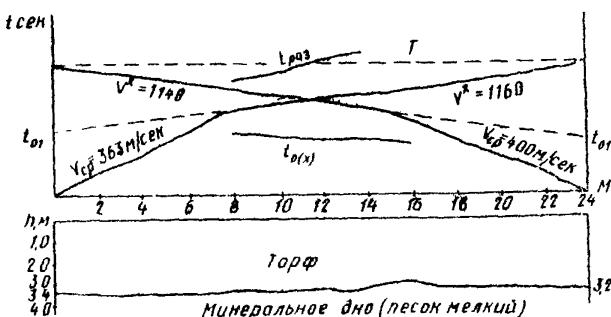


Рис.28. Годографы первых вступлений продольных волн и геосейсмический разрез

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  $V^p$ , пластовую среднюю  $V_p$  и граничную скорость методом разностного годографа. Глубину залегания определяют методом  $t_0$  (см. приложение 2),

для чего используют отрезки времени, отсекаемые на оси ординат продолжением годографов ( $t_{p0}$ ), а также по кривой  $t_{p(x)}$ , построенной на перекрытых участках встречных годографов. По полученным результатам строят геосейсмический разрез и геологический профиль (см. рис.28).

### 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 волны и по формуле  $V = \frac{X}{t}$  скорости  $V_p$  и  $V_s$  ( $t$  — время пробега волной расстояния  $X$  от ПВ до сейсмопенетрометра).  $V_p = 795$  м/сек,  $V_s = 16,5$  м/сек.

#### 4. Определение упругих характеристик

Для расчета упругих параметров используют следующие зависимости /1/:

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

$$u_d = \frac{1}{2} - \frac{\rho \cdot V_d^2}{E_d}; \quad V_d = \frac{G_d}{\rho},$$

где  $u_d$  — динамический коэффициент Пуассона;  $G_d$  — динамический модуль сдвига;  $E_d$  — динамический модуль упругости;  $\rho$  — плотность ( $\chi_v$  — объемная масса;  $G$  — ускорение силы тяжести).

Для расчета необходимо знать скорости  $V_d$  и  $U_d$ , а также объемную массу грунта или объемную массу скелета грунта. Если известна величина объемной массы скелета  $\chi_s$ , то  $E_d$  определяют по корреляционной зависимости  $E_d = 1000 \cdot \chi_s^{2,14}$  или по  $G_d$ ,  $E_d = 1000 \cdot \left(\frac{V_d + 1}{V_d}\right)^{2,14}$ . По данным примера  $\rho_s = 0,95 \text{ г/см}^3$ ;  $E_d = 7,83 \text{ кгс/см}^2$  по эмпирической формуле —  $E_d = 7,95 \text{ кгс/см}^2$ ;  $u_d = 0,499$ ;  $G_d = 0,02$ ;  $G_d = 2,65 \text{ кгс/см}^2$ .

#### 5. Определение диссипативных характеристик

На осциллограммах, полученных по одной фазе из гаубцев, во время работы (2,0 и 3,5 м от ПВ, при одном и том же узлекции) измеряют максимальный радиус колебаний, и частоту первых изгибаний (см. рис. 29), для чего выделяют участок в бегущей воле и большим числом периодов колебаний.

Коэффициент затухания определяют по формуле

$$\omega_d = \frac{f}{A_d} \cdot \ln \frac{A_0}{A_d} = 1,06 \text{ 1/с},$$

где  $A_d$  — расстояние между точками изгибаний;

$A_0$  и  $A_d$  — амплитуды в изгибаемых точках.

Для определения  $\omega_d$  необходимо измерять более четырех волн изгибаний бумаги. Если наблюдается дисперсия показаний, находят среднеарифметическую величину.

Частота колебаний

$$f = \frac{1}{T} = \frac{A_d / \omega_d}{S} = \frac{160}{5,3} \approx 30 \text{ Гц},$$

где  $f$  — период колебаний, сек;

$\omega_d$  — скорость движения бумаги в осциллограмме, см/сек;

$S$  — длина участка осциллограммы, об содержащего  $10$  периодов колебаний, м.

Логарифмический декремент  $A_g$  определяют из соотношения /19/

$$A_g = \lambda_g \cdot \alpha_g = 0,58,$$

$\lambda_g$  — длина волны, определяемая по формуле  $\lambda_g = V_g \cdot T = \frac{V_g}{f} = 0,55 \text{ м}$ .

Коэффициент демпфирования находят по формуле

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

Коэффициент вязкости /II/

$$\eta = \frac{1 \cdot \rho \cdot V_g^2}{2f \cdot A_g} = \frac{96 \cdot 16,5^2}{2 \cdot 0,58} \approx 2,25 \text{ кг/сек} \cdot \text{см}^2.$$

( $f$  принимается равной 1 Гц).

#### 6. Определение физических характеристик

По полученным скоростям  $V_g$  и их затуханию, используя корреляционные уравнения (см. приложение 3), определяют  $\psi = 80\%$ ;  $\delta = 13,8$ ;  $\delta_x = 0,101 \text{ г/ом}^3$ .

По nomogramme определяют модули сдвиги для нагрузок 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 кгс/см<sup>2</sup>, которые соответственно равны 265, 395, 452 и 490 мкм/м. Чтобы получить модули сдвиги для других нагрузок строят зависимость  $\zeta_p = f(p)$  (рис. 29).

$\zeta_p, \text{мм/н}$

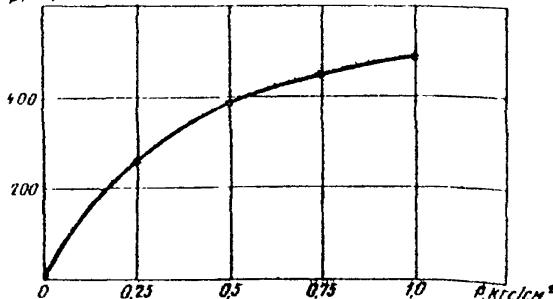


Рис. 29. Построение зависимости  $\zeta_p = f(p)$

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

$$\zeta_p = \frac{360(\xi_p - 0,36)^{1,1}}{1 + \xi_p} \cdot \zeta_g(3,12 \cdot p / \xi_p),$$

для органо-минеральных грунтов до 1,0 кгс/см<sup>2</sup>:

$$\zeta_p = \frac{360(\xi_p - 0,36)^{1,33}}{1 + \xi_p} \cdot \zeta_g(3,12 \cdot p / \xi_p).$$

При определении коэффициента пористости по  $K_g$  и  $\alpha_g$  для получения более точного результата берется среднегарифмическая величина. По  $\alpha_g$   $\delta = 14,5$ , по  $K_g$   $\delta = 13,8$ .

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

## 7. Определение прочностных характеристик

Для получения прочностных характеристик используют корреляционные уравнения, связывающие сопротивление сдвигу из крыльчатки с влажностью  $W$  и пористостью  $\delta$  /14/:

$$\sigma_{\text{удл}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0,515 \cdot \delta - 0,75} + \frac{1}{0,007 \cdot W + 1,10} \right) = 0,137 \text{ (нг/см}^2\text{)}.$$

## Приложение 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ

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

Стоимость работ стандартных методов (бурение) сценировалась по ЕНВ — Единым нормам времени и расценкам на проектные и изыскательские работы (М., Стройиздат, 1972), стоимость сейсморазведки — по ЕНВ (сейсмозондирование и профилирование) и опыту Белдорнии и других организаций (сейсмическое просвечивание, изотах).

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

За исходные данные при расчете стоимости работ взяты следующие показатели:

для определения толщины насыпи и болотного грунта под неё 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>6</sup>;

для определения показателей  $\delta$ ,  $\chi_m$  и  $\delta_p$  — точка на глубине 2 м. На этой глубине отбирают пробы и монолит и производят измерение скоростей упругих волн.

Результаты сведены в табл. 3.

<sup>6</sup>Объем работ и методы с изм."Методические указания по гидрогеологическому обследованию болот при изысканиях автомобильных и железных дорог". М., Стройиздат, 1973.

Таблица 3

Показатель	Состав работ		Стоимость, руб.	Возможность использования по срав- нению с бурением и лабораторными испытаниями, %
	стандартные методы	методы сейсмо- акустики		
$W, \%$ , влажность	исследование по зондированию с отбором проб; лабораторные испытания; оформление результатов	исследование по измерению скоростей упругих волн; обработка в сформированном виде результатов измерений	18,5	9,00
$\delta$ , коэффициент пористости	исследование с бурением и отбором проб или монолита; лабораторные испытания; влажность, плотность, объемная масса; вычисления и оформление результатов	то же	4-20	0-52
$\rho_{ch}$ , объемная масса скважины	исследование с бурением и отбором проб или монолита; лабораторные испытания; влажность, объемная масса; вычисления и оформление	—	3-50	0-52
Сжимаемость (модуль осадки)	исследование: бурение с обсадкой, отбор монолита; лабораторные испытания; вычисления и оформление	—	5-24	1-40
Определение глубины боковой залежи	зондирование боковой залежи; оформление результатов	сейсмопрофилирование, обработка и оформление результатов установками:	одноканальными многоканальными	5-70 7-00
Определение толщины насыпи и мощности боковых грунтов под неей	ручное бурение с отбором проб извлекное бурение с отбором проб (УГБ-50А)	сейсмопрофилир., обработка и оформление результатов установками:	одноканальными (23-58 обсадной) многоканальными (10-00-18-10 с обсадкой)	2-15 5-70 7-00

Приложение 6. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА "К"  
В МЕТОДЕ " $t_b$ "

$\frac{V}{V_r}$	$\frac{1}{2} \cos t$	$\frac{V}{V_r}$	$\frac{1}{2} \cos i$	$\frac{V}{V_r}$	$\frac{1}{2} \cos i$
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>

$V_g$ , м/сек	$\bar{G}_d$ , кг/см <sup>2</sup>	$V_g$ , м/сек	$G_d$ , кг/см <sup>2</sup>	$V_g$ , м/сек	$\bar{G}_d$ , кг/см <sup>2</sup>	$V_g$ , 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	2,93	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 болотных 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. Горяинов И.И. Сейсморазведка при инженерно-геологических исследованиях рыхлых пород. М., ВсегипГЕО, 1971.
3. Шемшурин В.А. Рекомендации по комплексному применению геофизических методов при инженерно-строительных изысканиях. М., ЦТИСИЗ, 1972.
4. Горшеник Ю.В. Способ определения угла наклона и глубины валегания плоской наклонной преломляющей границы. Сб."Вопросы инженерной геологии и геофизики при изысканиях железных и автомобильных дорог". М., 1972.
5. Чубисов О.В. Обработка криволинейного гидографа упругих волн. Ж. геофиз., т.4, вып.2, 1934.
6. Кондратьев О.К., Гимбурцев А.Г. Сейсмические исследования в прибрежной части Восточной Антарктиды. М., Изд. АН СССР, 1963.
7. Ляжовицкий Ф.М. Об определении мощности гравиентного 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 динамики распределения сейсмических волн", об.П. Л.. Изд. ЛГУ, 1959.
9. Кмитовенко А.Т., Бондарев В.И. и др. Опыт использования сейсмического метода разведки для определения глубины торфяной залежи. "Торфяная промышленность", №8, 1972.
10. Ржевский В.В., Ямчиков В.Е. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. М., "Наука", 1973.
11. Миндель И.Г. Изучение физико-механических свойств лесовых пород сейсмоакустическими методами. М., ПНИИС, т.4, 1970.
12. Дровд П.А. Сельскохозяйственная дорога на болотах. Минск, "Урожай", 1965.
13. Евгеньев И.Е., Яромко В.Н., Осьминов В.Е. Сжимаемость и прочность органо-минеральных болотных грунтов. М., Союздориздат, №90, 1976.

14. Яромко В.Н., Севьков В.Е. Исследование прочностных характеристик болотных грунтов в полевых условиях. М., Тр. Союздорнии, вып. 64, 1973.
15. Бондарев В.Н. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в соответственном залегании для строительных целей. М., 1974.
16. Пузырев Н.Н., Минченъкина В.Р. Приближенные способы интерпретации гидографов рефрактированных 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. IУ, "Сейсморазведка". М., "Недра", 1966.
19. Берzon И.С., Епинатъева А.М. и др. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. М., Изд. АН СССР, 1962.