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

gost.e-ecolog.ru

"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.Н.Яромко. Общее редактирование осуществлено канд.техн.наук И.Е.Евгеньевым.

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

Отзывы и предложения по "Методическим рекомендациям..." просим присылать по адресу: г.Минск, Типографская, 28, Белдорнии.

© Белорусский дорожный научно-исследовательский институт, 1976

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. "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.

I.2. Для определения мощности болотной залежи, а также толщины существующего земляного полотна применяют методы сейсмозондирования и сейсмопрофилирования.

I.3. Физико-механические характеристики болотных грунтов — влажность, коэффициент пористости, объемная масса скелета, сжимаемость, упругие и диссипативные характеристики — определяют методами сейсмического просвечивания и сейсмокаротажа с использованием функциональных и корреляционных зависимостей между сейсмическими и физико-механическими свойствами грунтов.

I.4. Аппаратура, используемая при зондировании и определении физико-механических свойств сейсмометодами, описана в приложении I. Предложенные методы разработаны для глубины болотной залежи до I5 м (при ударном возбуждении колебаний грузом массой до I0 кг).

I.5. Основными физическими предпосылками использования методов инженерной сейсморазведки при обследовании болот являются: скоростная дифференциация распространения упругих волн в болотных грунтах и грунтах минерального дна болота; различие акустических жесткостей болотных грунтов и грунтов минерального дна ($\rho_б \cdot V_б \neq \rho_м \cdot V_м$, где $\rho_б V_б$ и $\rho_м \cdot V_м$ соответственно плотность и скорость упругих волн в болотных и минеральных грунтах); зависимость скоростей упругих волн от состава и состояния болотных грунтов.

I.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 сейсмозондирования дает наибольший эффект при определении толщины существующей насыпи на болоте, а также при наличии плотного минерального слоя или слоя мерзлоты на поверхности болота (приложение 5).

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ БОЛОТНОЙ ЗАЛЕЖИ

2.1. Сейсмические методы определения глубины болотной залежи целесообразно применять на всех этапах инженерно-геологического обследования болот*.

На первом этапе — р е к о г н о с ц и р о в о ч н о м — при соответствующем технико-экономическом обосновании (зимние работы, реконструкция дороги и т.п.) сейсмозондирование проводят на коротких локальных поперечниках, выбранных в наиболее характерных местах намеченного перехода через болото.

На втором этапе — п о д р о б н ы х и з ы с к а н и й — 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 слоя минерального грунта, либо при изысканиях в зимний период с помощью сейсмозондирования 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, экранирования. Во избежание ошибок рекомендуется производить контрольное 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.

---

*Содержание этапов см. в "Методических указаниях по инженерно-геологическому обследованию болот при изысканиях автомобильных и железных дорог". М., Союздорнии, 1973.

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

Поперечные волны SV возбуждаются или аналогичным вертикальным ударом, или горизонтальным ударом (по направлению сейсмического профиля), который производят 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 SV 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 расставляют по профилю с интервалом ΔX (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.

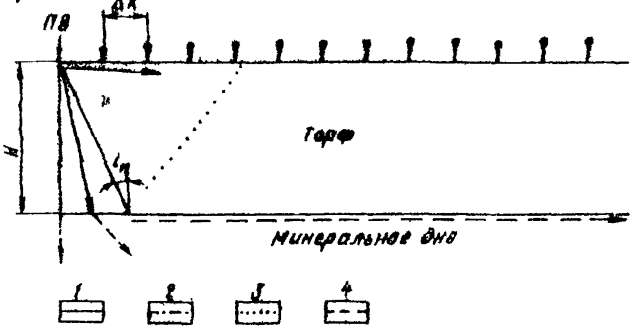


Рис.I. Схема сейсмического профиля:
I – прямая волна; 2 – проходящая; 3 – преломленная; 4 – скользящая

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

Встречной 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 строения грунтовой толщи:

а) болота I типа с однородным составом торфа и уклоном минерального дна менее 10^0. Скорости упругих волн по глубине почти не меняются. Граница торф – минеральное дно обычно является сильной преломляющей границей для поперечных и продольных волн (возрастание скоростей больше 1,33).

Для определения общей мощности болотных отложений работы следует проводить по методике продольного или поперечного сейсмозондирования с использованием схем $\overline{Z}-\overline{Z}$ 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 10^0. Для повышения точности определения глубины залежи 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 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 заполнено 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 — с е й с м и ч е с 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 осциллографа, построение годографов, вычисление граничных скоростей, построение преломляющих границ и 2 — г е о л о г и ч е с 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 (Т), амплитудой (А) и затуханием(α). 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 равной 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); комбинированные — 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 перегибу, методом разностного годографа и т.п. (приложение 2).

Построение сейсмических границ для прямолинейных годографов производят методами средних и пластовых скоростей, а для комбинированных и криволинейных — слабая градиентная среда — методами О.К.Кондратьева, способом 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 λ/h или периодом, отнесенным 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 слоев, 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 СЕЙСМОКАРОТАЖ)

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

Сейсмическое просвечивание и сейсмокаротаж применяют на этапе подробных изысканий 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 сейсмометодов увеличивает объем информации и повышает достоверность данных о физико-механических свойствах грунтов, позволяет получить ряд характеристик в полевых 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 залежи (сейсмокаротаж) сейсмопенетрометр при

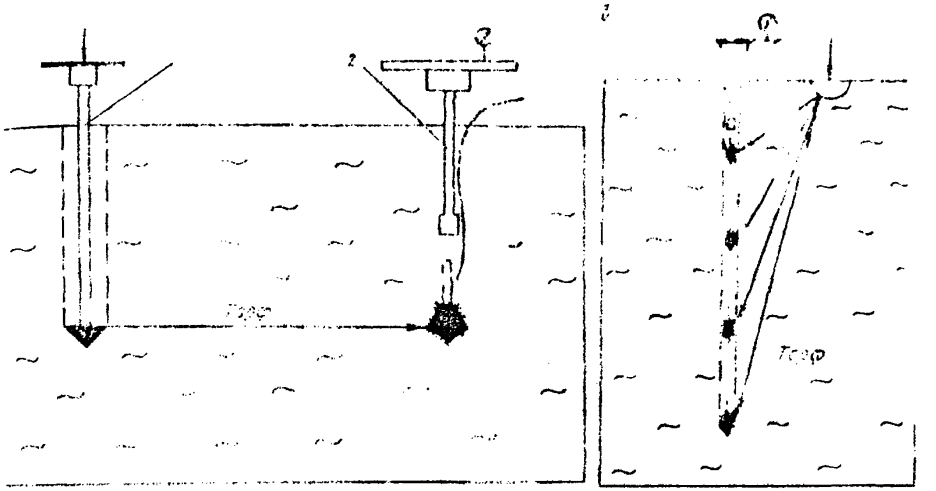


Рис.2. Способы измерения скоростей упругих волн в залежи: а) схема сейсмопросвечивания: 1 — устройство для возбуждения колебаний; 2 — устройство для приема колебаний; б) схема сейсмокаротажа

помощи штанг задавливают 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 в 0,5 - I,0 м от места погружения.

Регистрируется время прихода продольных и поперечных волн; при ударе по схеме $X-X$ получают продольные, по схеме $Y-Y$ — поперечные волны. После этого извлекают из болотного грунта сейсмопенетрометр, соединяют со штангой и погружают до следующей отметки. Интервал измерений через I,0 м.

3.3. При измерении скоростей упругих волн и их затухания по горизонтали (сейсмическое просвечивание) возбуждение колебаний производят конусным наконечником на расстоянии I-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 залежи на 0,3–0,4 м, чтобы не возбуждать колебаний на поверхности залежи. В отверстие 7 вставляют направляющую штангу 4 с грузом 5, зафиксированным в верхнем положении.

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

3.4. Поперечные волны на расстоянии двух-трех длин волн от источника возбуждения выделяются четко. Выделение волн 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 залежи.

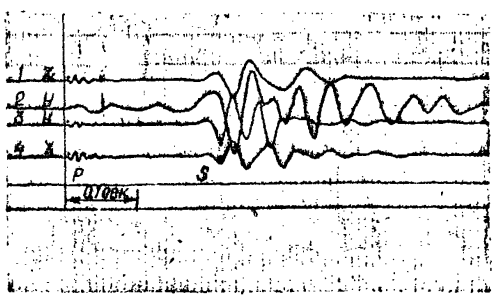


Рис.3. Осциллограмма просвечивания болотной залежи при $X = 3$м
I–2. — сейсмоприемники расположены от поверхности залежи на расстоянии $h = 3$ м от ПВ; 3–4 — сейсмоприемники расположены в сейсмопенетрометре на глубине $h = 3$ м и на расстоянии $X = 3$м от ПВ

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 $V = \frac{\Delta h}{\Delta t}$ (Δh – расстояние от ПВ до сейсмопенетрометра, Δt — время прохождения волной расстояния Δh), а также среднюю скорость в залежи по формуле $\bar{V} = \frac{h}{t}$ (h — мощность залежи, t — время прохождения волны через залежь).

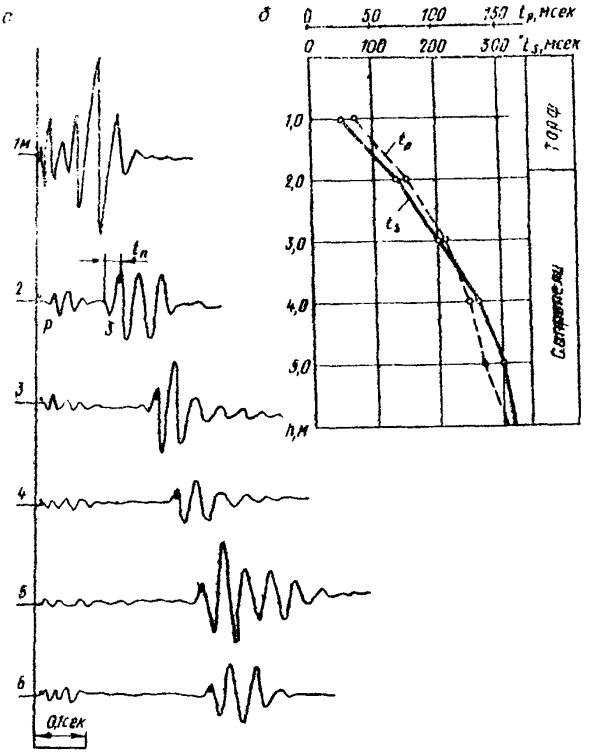


Рис.4. Результаты измерения скоростей упругих волн по вертикали болотной залежи:
а) сводная осциллограмма по результатам сейсмокаротажа болотной залежи; б) вертикальные годографы и геологическая колонка

При измерении скоростей упругих волн по горизонтали (сейсмическое просвечивание) по полученным сейсмограммам (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 залежи (рис.5). Далее по функциональным и корреляционным зависимостям (приложение 3) находят физико-механические характеристики болотных грунтов.

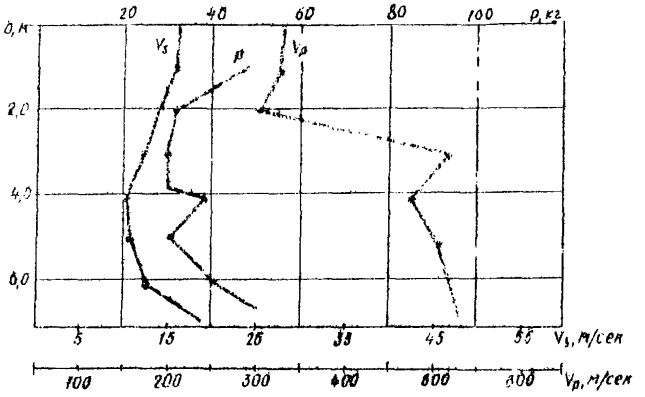


Рис.5. Графики, построенные по результатам сейсмопросвечиваний

Приложение I. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ АППАРАТУРА

При зондировании болотной залежи рекомендуется применять два вида аппаратуры: многоканальные установки (при обследовании реконструируемых дорог и осушенных болот) и одно-, трехканальные (при обследованиях новых трасс на неосушенных болотах). В качестве многоканальных установок можно использовать серийно выпускаемую сейсмостанцию "Поиск-I-6/I2-АСИ", 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 ОСУ-2, ДОСУ-I и регистратор эхолота ЭП-I. Для этих установок сконструирован специальный пульт управления, что позволяет использовать косу с I2-I6 сейсмоприемниками, а также осуществлять фильтрацию в диапазоне частот 0-I50 Гц.

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

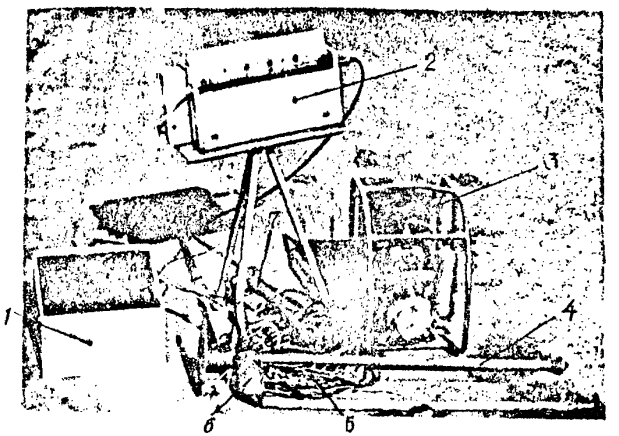


Рис.6. Комплекс аппаратуры и оборудования:
1 — пульт управления; 2 — регистратор колебаний; 3 — переносная электростанция; 4 — устройство для возбуждения колебаний внутри болотной залежи; 5 — кабель для подсоединения сейсмоприемников к регистратору (коса); 6 — конусный зонд сейсмопенетрометра; 7 — держатель

Масса регистратора эхолота ЭП-I 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 сейсмозондировании 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 30–40см, что обеспечивает хороший контакт сейсмоприемников с болотным грунтом. Для соединения сейсмоприемников с регистрирующей аппаратурой используют косы на 6, 12 и 16 сейсмоприемников. Возбуждение колебаний осуществляют ударом кувалды (масса 10 кг) по металлической или деревянной подставке.

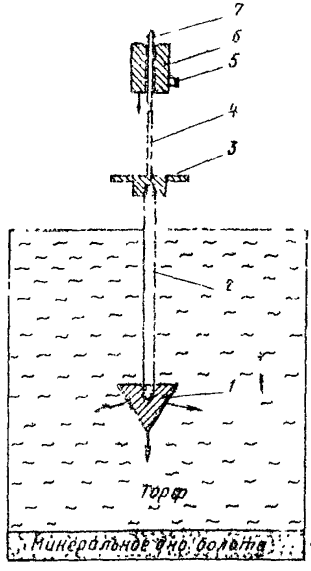


Рис.7. Устройство для возбуждения колебаний внутри болотной залежи

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

Возбуждение упругих волн внутри слоев осуществляли устройством (рис.7), которое состоит из конусного наконечника 1 с углом $\alpha = 60–90^0$ и сечением 20 $см^2$; штанги 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 горизонталям X и Y, возбуждая продольные и поперечные волны. При помощи этого устройства можно возбуждать колебания в различных слоях болотной залежи и на любой глубине.

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

Сейсмопенетрометр состоит из следующих основных частей (см.рис.8): конусного наконечника с углом $\alpha = 90^0$ и сечением 40 $см^2$ I, в котором помещены три сейсмоприемника, расположенные в трех плоскостях (λ, γ, Z) 2; хвостовика 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.

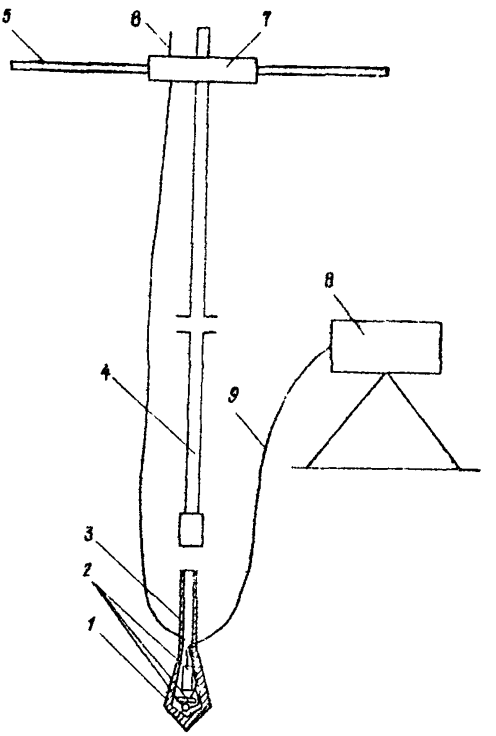


Рис.8. Схема сейсмопенетрометра

Приложение 2. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

I. Определение скоростей по годографам преломленных волн (прямолинейные годографы)

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

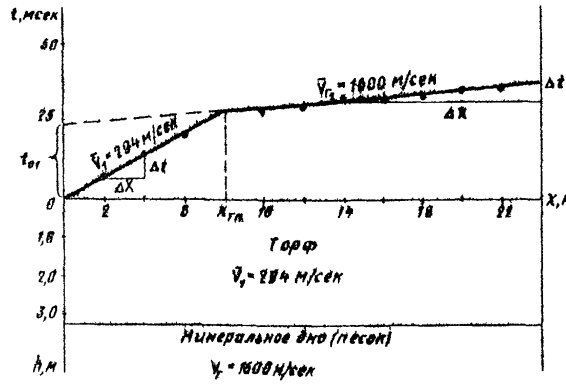


Рис.9. Определение скоростей и t_0 по прямолинейному годографу первых вступлений продольной волны

случае граничные скорости можно определить по наклону отрезков с помощью формулы

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

где ΔX — расстояние по годографу; Δt — время по годографу.

Здесь кажущаяся скорость V^x равна граничной скорости $V_г$. Вообще же кажущаяся скорость равна $V^x = \frac{V_{изм}}{\sin\psi}$, где ψ — 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 полей времени и приближенный метод разностного годографа /1,2,18/. Обычно в инженерно-геологических изысканиях используют более простой метод разностного годографа, который обеспечивает достаточную точность при малом угле наклона границы ψ. Метод требует встречной системы наблюдений с увязанными во взаимных точках годографами; причем разностный годограф строят лишь на участке перекрытия встречных

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

$$t_{р(x)} = \bar{t}_{(x)} - \overline{t}_{(x)} + T,$$

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

T — время прихода волны во взаимных точках.

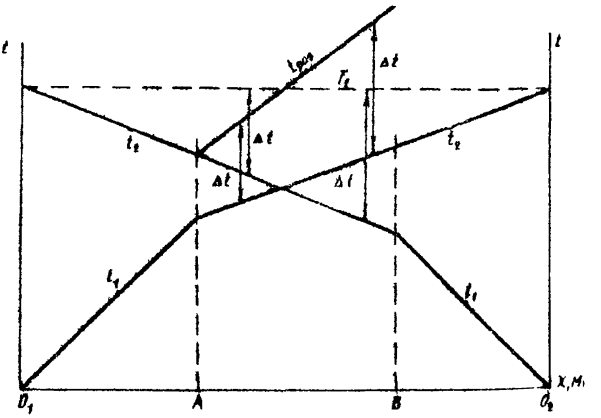


Рис.10. Построение разностного годографа $t_{раз}$

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

Измеряют отрезок Δt 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.

Граничную скорость определяют по формуле

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

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

φ — угол наклона границы. При малых наклонах границы им можно пренебречь.

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

$$\frac{2}{V_г} = \frac{1}{\bar{V}'} + \frac{1}{\overline{V}'},$$

где $\bar{V}'$ и $\overline{V}'$ — значения кажущихся скоростей по встречным годографам.

В случае наличия перекрытого участка, по неувязанной системы годографов (для волны $t_г$) скорость $V_{раз}$ находят по рис.11. Для оп-

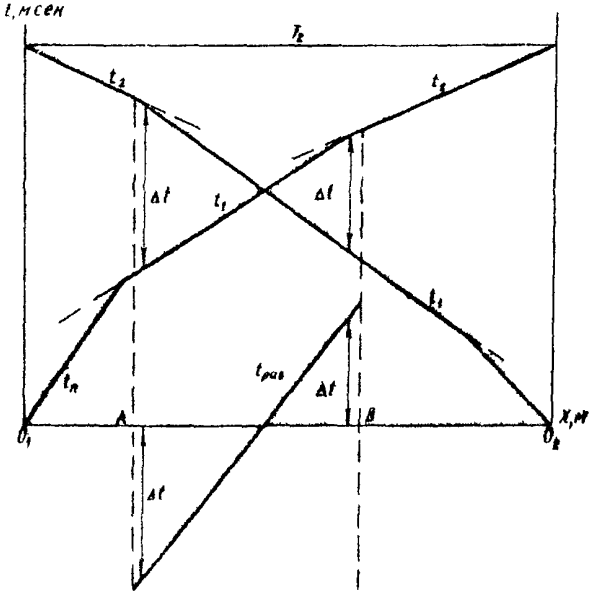


Рис.II. Построение разностного годографа $t_{раз}$ (для волны t_1) в случае неувязанной системы годографов

ределения $t_{раз}$ измеряют величину $\bar{t}_{(x)} - \bar{t}_{(x)}$ и откладывают ее от любой линии, параллельной оси абсцисс.

2. Построение преломляющих границ

Глубины преломляющих границ можно определить р.. мя 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/.

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 искомых преломленных границ, рассматривают как один однородный слой с постоянной скоростью распространения прямых волн. Для построения границ необходимо иметь значения $V_г$, $\bar{V}$ и t_0.

$V_г$ 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.12а).

Для n-го слоя границу находят по формуле

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

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

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

$V_{\Gamma n}$ — граничная скорость вдоль этой границы;

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

Для первой границы раздела

$$h_1 = \frac{\bar{V}_1 \cdot t_{01}}{2\sqrt{1-(V_1/V_{\Gamma 1})^2}}.$$

Для первой границы можно использовать также формулу

$$h_1 = \frac{X_{\Gamma n}}{2}\sqrt{\frac{V_{\Gamma 1}-V_1}{V_{\Gamma 1}+V_1}},$$

где $X_{\Gamma n}$ — точка пересечения годографа прямой и преломленной волны.

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

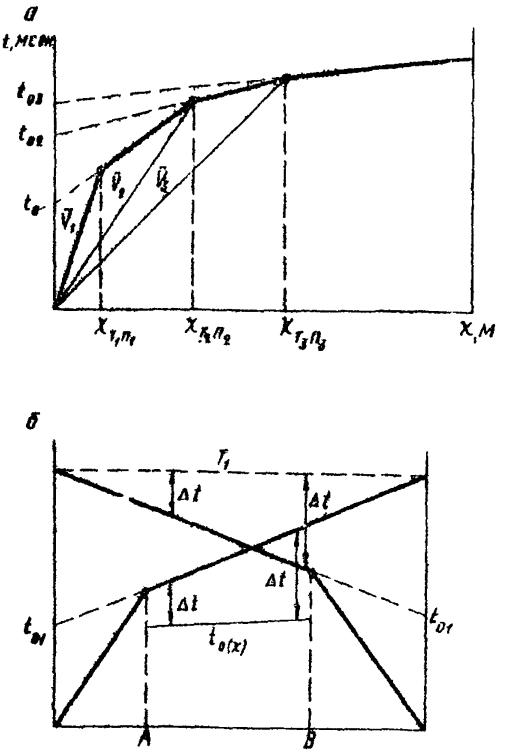


Рис.12. Определение средних скоростей и t_0 для многослойного разреза (а) и построение линии $t_0(x)$ при встречной системе с перекрытыми участками (б)

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

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

Построение показано на рис.12б.

Способ пластовых скоростей /I,2,3/

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

Мощность первого слоя определяют способом, описанным выше.

Мощность второго слоя

$$h_2 = \frac{V_{r1}}{2\cos i_{21}} \cdot \left(t_{02} - \frac{\cos i_{12}}{\cos i_{12}} - t_{01} \right),$$

где $i_{12} = arc\sin V_1/V_{r1}$; $i_{23} = arc\sin V_1/V_{r2}$; $i_{21} = arc\sin V_{r1}/V_{r2}$.

Мощность третьего слоя

$$h_3 = \frac{V_{r3}}{2\cos i_{34}} \cdot \left[t_{03} - t_{01} \frac{\cos i_{13}}{\cos i_{13}} - \left(t_{02} - \frac{\cos i_{12}}{\cos i_{12}} \cdot t_{01} \right) \frac{\cos i_{24}}{\cos i_{24}} \right],$$

где $i_{14} = arc\sin V_1/V_{r3}$; $i_{24} = arc\sin V_{r1}/V_{r3}$; $i_{34} = arc\sin V_{r2}/V_{r3}$; t_{01}, t_{02}, t_{03} — соответственно время, отсекаемое на оси времен продолжениями первого, второго и последнего отрезков годографов преломленных волн.

Аналогичные формулы выводят и для следующих слоев.

Глубины преломляющих границ находят суммированием мощностей залегающих выше слоев.

Для приближенного определения V_i в методе пластовых скоростей можно использовать формулу /I5/

$$V_{ri} \approx \left(\frac{2V'' \cdot V'}{V'' + V'} i \right)$$

где V'' и V' — кажущиеся скорости преломленных волн от одной и той же границы, зарегистрированные по подъему и падению ее.

При использовании одноканальных установок (при двухслойной среде) целесообразно определять положение наклонной границы по годографам из одной точки пункта возбуждения по способу расстояний (рис.I3) /4/.

Наклон границы определяют по формуле

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

где

$$a = \frac{x_1^b \cdot x_2^b}{x_2^b - x_1^n}; \quad b = -\left(\frac{x_1^b \cdot x_1^n}{x_1^n - x_1^b} + \frac{x_1^b \cdot x_1^n}{x_2^b - x_1^n} \right); \quad c = \frac{x_1^b}{2},$$

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.I4.

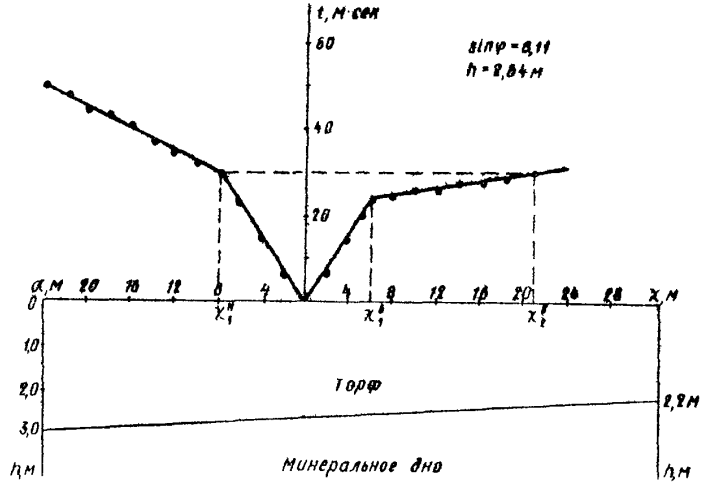


Рис. I3. Определение угла наклона и глубины залежи из одной точки пункта возбуждения

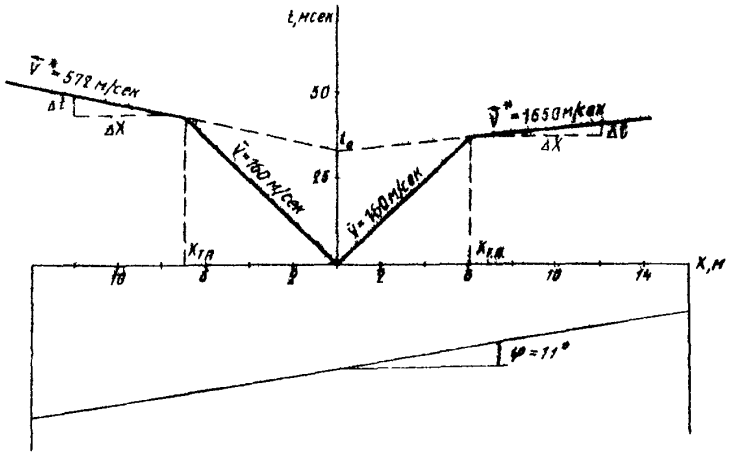


Рис. I4. Упрощенный аналитический способ определения скоростей и глубины залежи с центральным пунктом возбуждения

$$\bar{V} = \frac{x_{т.в.}}{t_{т.п}} = 160\ м/сек; \qquad \bar{V}^x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = 1650\ м/сек;$$

$$\bar{V}^a = \frac{\Delta x}{\Delta t} = 572\ м/сек;$$

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

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

3. Интерпретация годографов рефрагированных волн

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

По годографам рефрагированных волн можно определять скоростное строение залежи и t_{ox} по схеме, показанной на рис. 15.

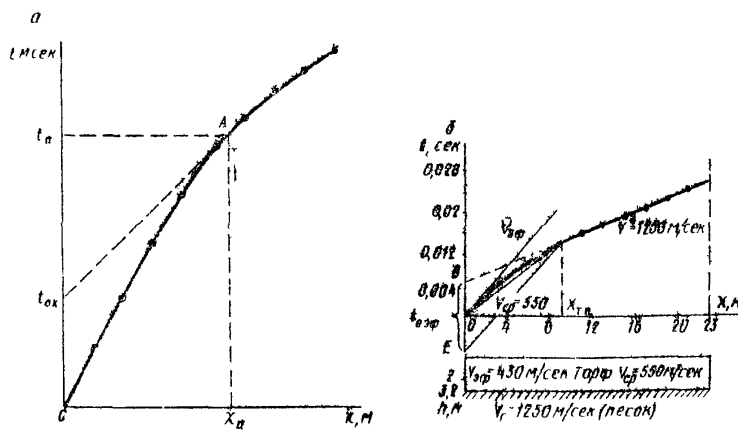


Рис. 15. Способы обработки криволинейных (а) и комбинированных (б) годографов

Глубину определяют по формулам /5,6/:

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

Здесь

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

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_{0x} — 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.Смелянской:

$$\bar{V}_n = \frac{2X_a\left(t_a + \sqrt{X_a \cdot t_a \cdot V^x}\right)}{3}.$$

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:

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

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

$$h_1 = \frac{V_1 \cdot t_{02}}{2\sqrt{1-(V_1/V_2)^2}}.$$

Мощность последующих слоев находят из выражений

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

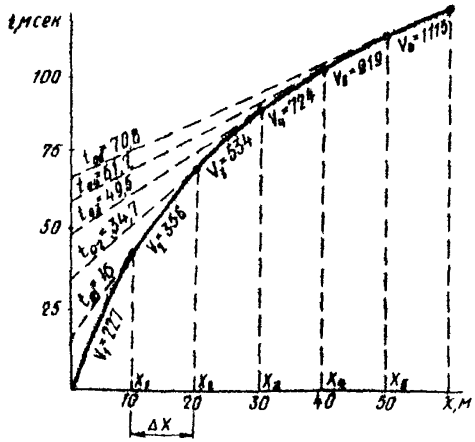
где

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

Пример расчета по этому способу показан на рис.16. Расстояние ΔX между выбранными точками следует выбирать из условия

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

где Δt — среднеквадратическая ошибка измерения времени (Δt = = 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=1115
	t_{01} 16	t_{02} 34,7	t_{03} 49,5	t_{04} 61,2	t_{05} 70,8
	h_1 2,4	τ_{12} -18	τ_{13} -19,9	τ_{14} -20,3	τ_{15} -20,5
		τ_{23} 15,7	τ_{24} 17,8	τ_{25} -19,1	τ_{26} -19,6
		h_2 3,7	τ_{34} 11,8	τ_{35} -14,2	τ_{36} -15,3
			h_3 4,8	τ_{45} 7,7	τ_{46} 9,5
				h_4 4,3	τ_{56} 6,0
					h_5 5,9

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

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

$$V_3 = \frac{X_3 - X_2}{t_3 - t_2} = \frac{30-20}{0{,}0909 - 0{,}0722} = 534 \text{ м/сек};$$

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

$$\tau_{13} = \frac{2h_0}{V_1}\sqrt{1-\left(\frac{V_1}{V_3}\right)^2} = \frac{2 \cdot 2{,}4}{227}\sqrt{1-\left(\frac{227}{534}\right)^2} = 0{,}019 \text{ сек};$$

$$\tau_2 = t_{02} - \tau_{13} = 0{,}0347 - 0{,}019 = 0{,}0157 \text{ сек};$$

$$h_2 = \frac{\tau_2 \cdot V_2}{2\sqrt{1-\left(\frac{V_2}{V_3}\right)^2}} = \frac{0{,}0157 \cdot 356}{2\sqrt{1-\left(\frac{356}{534}\right)^2}} = 3{,}7 \text{ м} \text{ и т.д. Результаты см. в таблице.}$$

Рис.16. Пример расчета определения скоростей, t_0 и глубины залежи 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" слой) определять методом $t_{0эф}$ /7/.

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

$$h = \frac{V_{эф} \cdot t_{0эф}}{2\sqrt{1 - (V_{эф}/V_г)^2}}.$$

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/

$$t_g\left[\frac{2\pi}{T \cdot V_ф} \cdot h\sqrt{\left(\frac{V_ф}{V_1}\right)^2 - 1}\right] = \frac{\sqrt{1 - (V_ф/V_2)^2}}{(V_1/V_2)^2 \frac{\rho_1}{\rho_2}\sqrt{\left(\frac{V_ф}{V_1}\right)^2 - 1}},$$

где T — квазипериод;

$V_ф$ — фазовая скорость;

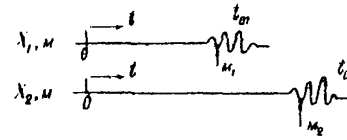
V_2 — скорость во втором слое.

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:

$$h = \frac{T \cdot V_1}{4\sqrt{1 - V_ф^2/V_г^2}}; \qquad V_г = \sqrt{V_{гр} \cdot V_ф},$$

где $V_{гр}$ — 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).



$$V_{ф} = \frac{X_2 - X_1}{t_{02} - t_{01}}.$$

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 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 вступлениях хорошо выделяются отраженные волны (рис.18).

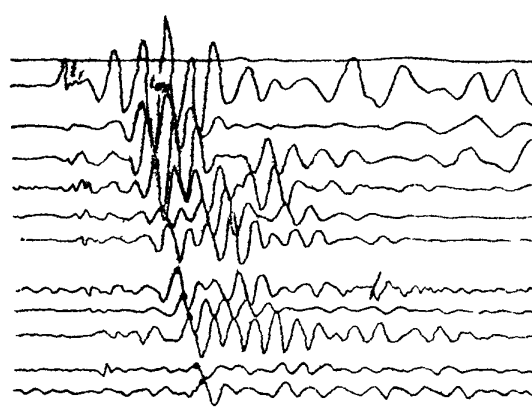


Рис.18. Характерная сейсмограмма на осушенном болоте (уровень грунтовых вод ниже границы "минеральное дно")

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:

$$t_x^2 = t_0^2 - \frac{x^2}{V_1^2}$$

с углом наклона

$$\varphi = arc\,tg\,\frac{1}{V_1},$$

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

t_{01} — время прихода отраженной волны в случае, когда сейсмоприемник расположен в непосредственной близости от точки удара ($x=0$);

V_1 — скорость упругой волны (P) в торфе.

Определение t_{01} производится обычно по величине отрезка, отсекаемого продолжением годографа на оси t в точке $x=0$, а V_1 по $\varphi = arc\,tg\,\frac{1}{V_1^2}$.

Глубину залежи находят по формуле

$$h_1 = 0{,}5 \cdot t_{01} \cdot V_1.$$

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 $V_1 = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.

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_S составлена номограмма (рис.23).

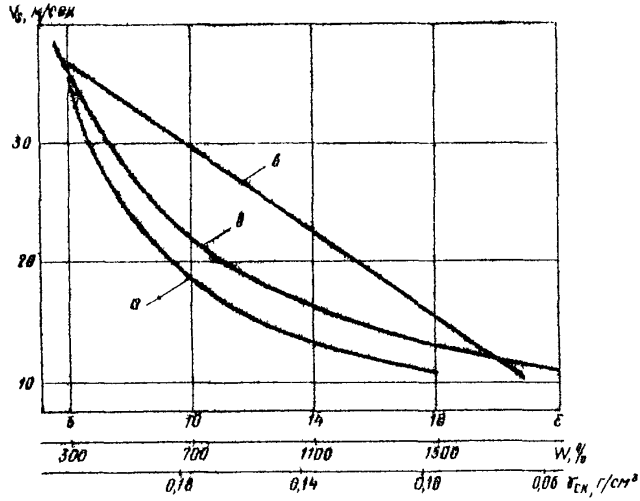


Рис.19. Зависимости скорости поперечной волны V_S от влажности W, коэффициента пористости ε и объемной массы скелета торфа $\gamma_{ск}$
а – W, б – ε, в – $\gamma_{ск}$

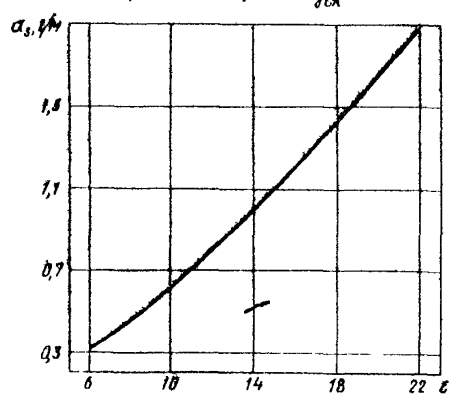


Рис.20. Зависимость коэффициента затухания поперечной волны α_S от коэффициента пористости торфа $\alpha_S = f(\varepsilon)$

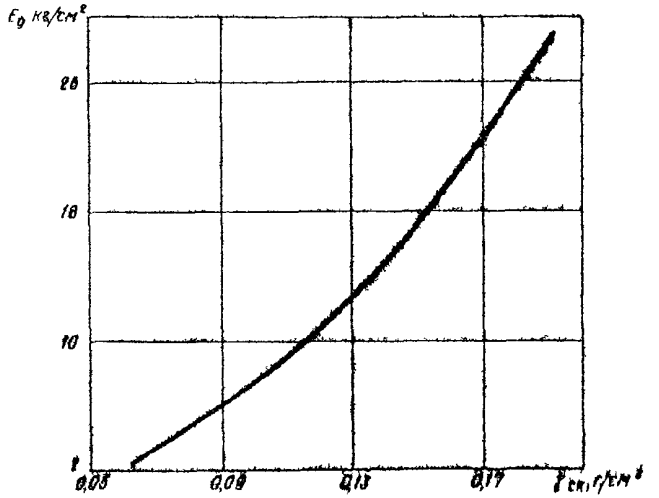


Рис. 21. Зависимость динамического модуля упругости $E_д$ от объемной массы скелета торфа $E_д = f(\gamma_{ск})$

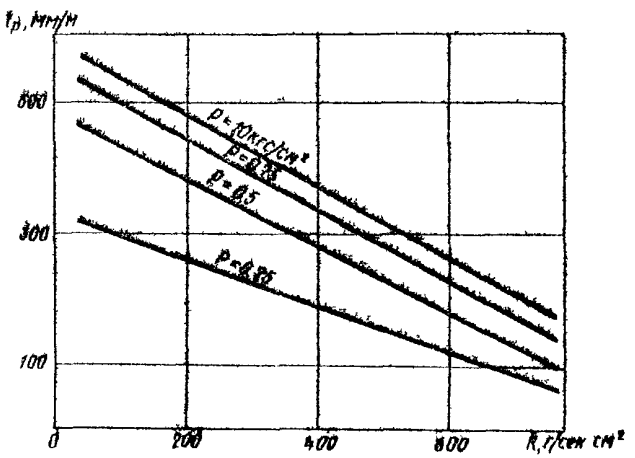


Рис. 22. Зависимости модуля осадки $i_м$ от акустической жесткости $K_д$ торфа при нагрузках P=0,25; 0,5; 0,75; 1,0 кгс/см²

Таблица I

Физико-механические показатели торфа	Число измерений	Пределы измерений	Корреляционные уравнения	Среднеквадратичное отклонение 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
ε, коэффициент пористости	366	6–22	$V_s = 1{,}8 + \frac{204}{\varepsilon}$	$0{,}058 \cdot V_s$	0,95
	121	6–22	$\alpha_s = 0{,}025 \cdot \varepsilon^{1{,}4}$	0,06	0,89
$\gamma_{ск}$, г/см³ – объемная масса скелета	494	0,06–0,21	$V_s = 178 \cdot \gamma_к - 1{,}5$	1,34	0,97
	110	0,06–0,20	$E_д = 1000 \cdot \gamma_{ск}^{2{,}14}$	0,95	0,91
Модуль осадки l_p, мм/м					
l при P=0,25 кгс/см²	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 ($R_a = \gamma_{ск} \cdot V_s$); α_s — коэффициент затухания поперечной волны.

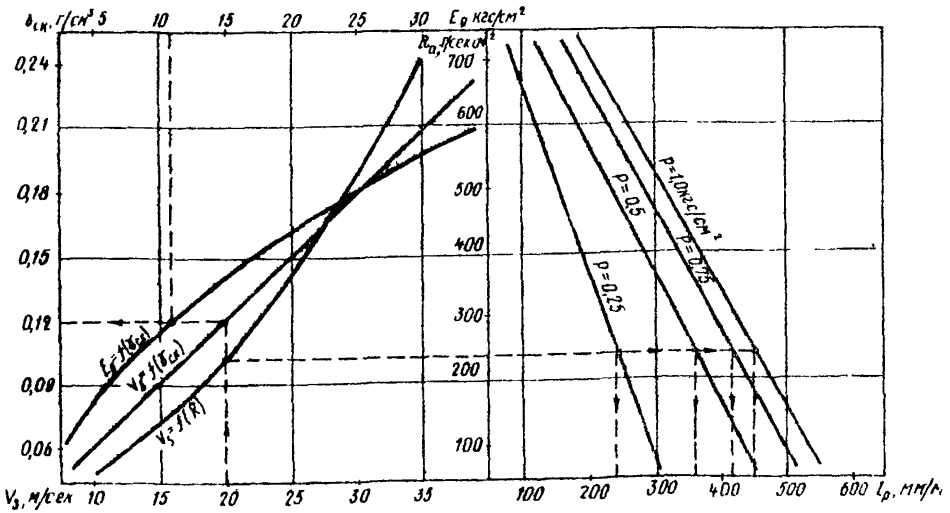


Рис.23. Номограмма для определения по скорости поперечной волны $E_д$, $\gamma_{ск}$, R_a и l_p

Исследования скоростей V_s в органо-минеральных болотных отложениях (сапропелях 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 δ 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 SH и их затухание, регистрируемые сейсмоприемником по линии I . Погрешность измерений (δ , W , $\gamma_{ск}$) методами сейсмопросвечивания не превышает 10% по сравнению со стандартными методами (рис.25).

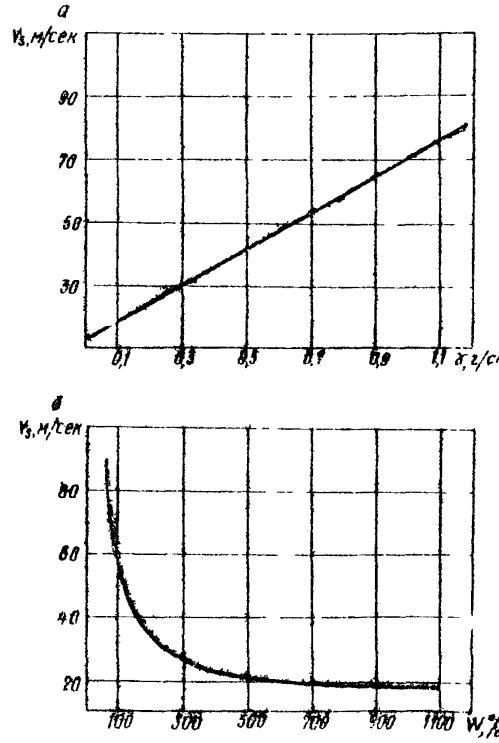


Рис.24. Зависимость скорости поперечной волны от объемной массы скелета (а) и влажности (б) органо-минеральных болотных грунтов

Анализ табл.I и 2 показывает, что значения скоростей V_s зависят от физических характеристик болотных грунтов. Корреляционные уравнения между V_s и $\gamma_{ск}$ болотных грунтов показывают, что

Таблица 2

Физические параметры органо-минеральных отложений	Число измерений	Пределы измерений	Корреляционные уравнения	Среднеквадратичное 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/см³, объемная масса скелета	148	0,08–1,2	$V_s = 60 \cdot \gamma_{ск} + 12$	1,40	0,89
ε, коэффициент пористости	256	1,5–20	$V_s = 12{,}66 + \frac{103}{\varepsilon}$	$0{,}065 \cdot V_s$	0,88

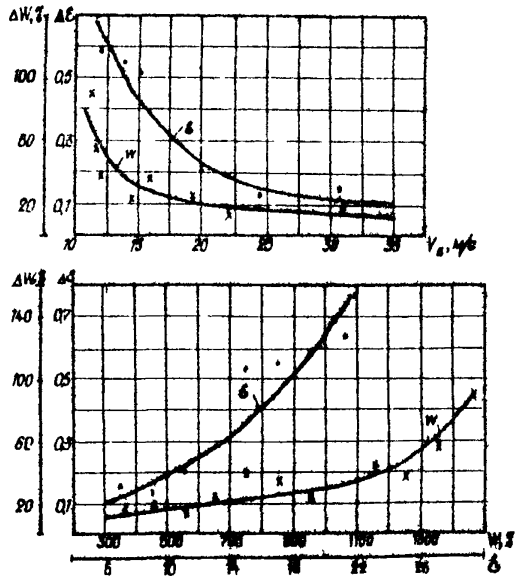


Рис.25. Погрешность измерений

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 (затвердение 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 залежи при X = 2,5 и 3,5 м (рис. 26б).

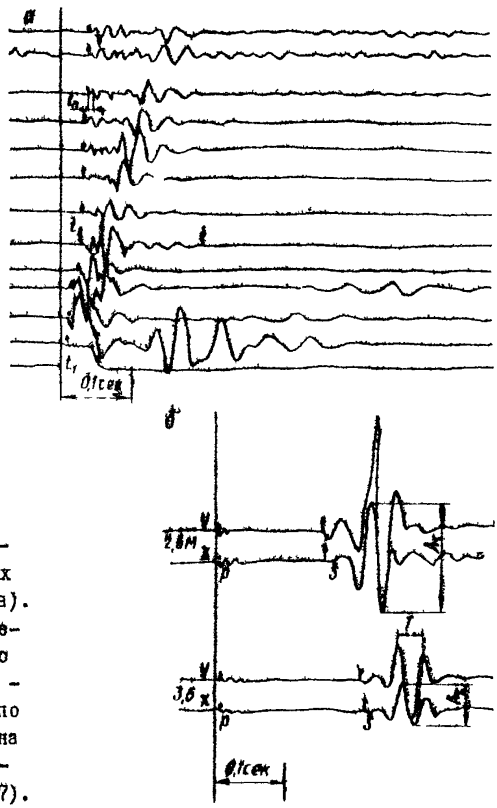


Рис.26. Сейсмограммы, полученные по результатам измерений на расчетном поперечнике

2. Построение геосейсмического профиля

На сейсмограмме замеряют 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 ($t_{гр} - t_g = t_h$) (рис.27).

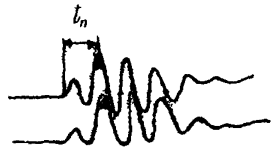


Рис.27. Введение поправки за фазу t_n

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^x, пластовую среднюю $\bar{V}_n$ и граничную скорости методом равностного годографа. Глубину залежи определяют методом t_0 (см.приложение 2), для чего используют отрезки времени, отсекаемые 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).

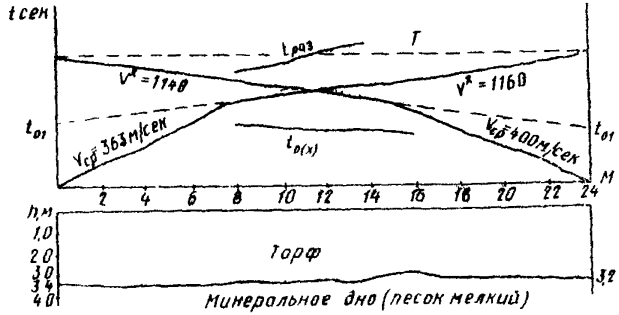


Рис.28. Годографы первых вступлений продольных волн и геосейсмический разрез

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 $V = \frac{X}{t}$ 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 /I/:

$$E_д = 2 V_s^2 \rho (1+\mu_д); \quad G_д = \rho \cdot V_s^2 = \frac{E_д}{2(1+\mu_д)};$$

$$u_д = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\gamma^2}{2\gamma^2}; \qquad \gamma = \frac{V_s}{V_p},$$

где $u_д$ — динамический коэффициент Пуассона; $G_д$ — динамический модуль сдвига; $E_д$ — динамический модуль упругости; $\rho = \frac{\gamma_w}{G}$ — плотность (γ_w — объемная масса; G — ускорение силы тяжести).

Для расчета необходимо знать скорости V_p и V_s, а также объемную массу грунта или объемную массу скелета грунта. Если имеется величина объемной массы скелета $\gamma_{ск}$, то $E_д$ определяют по корреляционной зависимости $E_д = 1000 \cdot \gamma_{ск}^{2,14}$ или по V_s, $E_д = 1000 \cdot \left(\frac{V_s + 1,5}{179}\right)^{2,14}$. По данным примера $\rho_v = 0,96$ г/см^3; $E_д = 7,83$ кгс/см по эмпирической формуле — $E_д = 7,95$ кгс/см^2; $\mu_д = 0,499$; $\gamma = 0,02$; $G_д = 2,65$ кгс/см^2.

5. Определение диссипативных характеристик

На осциллограммах, полученных на одной и той же глубине, но на разном расстоянии (2,5 и 3,5 м от ПВ, при одном и том же усилении) замеряют максимальный размах амплитуды, а также период колебаний (см.рис.26б), для чего выделяют участок с отчетливой записью и большим числом периодов колебаний.

Коэффициент затухания определяют по формуле

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

где Δx — расстояние между точками наблюдения;

A_1 и A_2 — амплитуды в наблюдаемых точках.

Для определения $\alpha_д$ необходимо выбирать более четкие записи во избежание ошибок. Если наблюдается дисперсия показаний, находят среднеарифметическую величину.

Частота колебаний

$$f = \frac{1}{T} = \frac{u_д n}{S} = \frac{160}{5,3} \approx 30 \text{ Гц},$$

где T — период колебаний, сек;

u — скорость движения бумаги в осциллографе, мм/сек;

S — длина участка осциллограммы, содержащего n периодов колебаний, мм.

Логарифмический декремент Δ_s определяют из соотношения /19/

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

λ_s — длина волны, определяемая по формуле $\lambda_s = V_s \cdot T = \frac{V_s}{f} = 0{,}55$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/

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

(f принимается равной I Гц).

6. Определение физических характеристик

По полученным скоростям V_s и их затуханию, используя корреляционные уравнения (см.приложение 3), определяют W =802%; δ = = I3,8; $\gamma_к$ = 0,I0I г/см^3.

По номограмме определяют модули осадки для нагрузок 0,25; 0,5; 0,75 и I,0 кгс/см^2, 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).

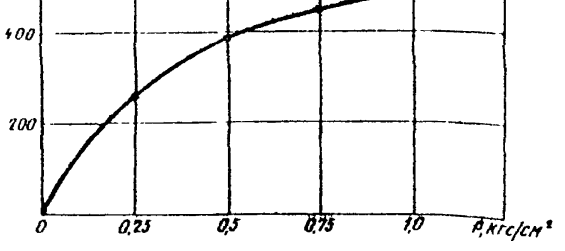


Рис.29. Построение зависимости $l_p = f(P)$

Параллельно можно проконтролировать l_p по зависимостям для торфа /I2,I3/:

$$l_p = \frac{360(\varepsilon_p - 0{,}36)^{I,I}}{I + \varepsilon_0} \cdot lg(3{,}I2 \cdot P\sqrt{\varepsilon_0}),$$

для органо-минеральных грунтов до I,0 кгс/см^2:

$$l_p = \frac{360(\varepsilon_p - 0{,}36)^{I,33}}{I + \varepsilon_0} \cdot lg(3{,}I2 \cdot P\sqrt{\varepsilon_0}).$$

При определении коэффициента пористости по V_3 и α_S для получения более точного результата берется среднеарифметическая величина. По α_S δ = I4,5, по V_3 δ = I3,8.

$$\bar{\delta} = \frac{I4,5+I3,8}{2} = I4,I.$$

7. Определение прочностных характеристик

Для получения прочностных характеристик используют корреляционные уравнения, связывающие сопротивление сдвигу на крыльчатке с влажностью W и пористостью δ /I4/:

$$C_{усл} = \frac{I}{2}\left(\frac{I}{0,5I5\cdot\delta - 0,75} + \frac{I}{0,007\cdot W + I,I0}\right) = 0,I37 \text{ (кгс/см}^2\text{)}.$$

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) оценивалась по ЕНВ — Единым нормам времени и расценки на проектные и изыскательские работы (М., Стройиздат, I972), стоимость сейсморазведки — по ЕНВ (сейсмозондирование и профилирование) и опыту Белдорнии и других организаций (сейсмическое просвечивание, каротаж).

Проведенные расчеты не предназначены для составления норм выработки, не 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 I00 м, толщина насыпи 2м, болотного грунта 2 м;

для определения влажности и мощности болотной залежи — участок болота длиной I00 м и глубиной 4 м*;

для определения показателей δ, $\gamma_{ск}$ и ℓ_p — точка на глубине 2 м. На этой глубине отбирают пробы и монолит и производят измерение скоростей упругих волн.

Результаты сведены в табл.3.

*Объем работ и методы см.в "Методических указаниях по инженерно-геологическому обследованию болот при изысканиях автомобильных и железных дорог". М., Союздорнии, I973.

Таблица 3

Показатель	Состав работ		Стоимость, руб.		Возможность замены по сравнению с бурением и лабораторными испытаниями, %
	стандартные методы	методы сейсмоакустики	стандартные методы	методы сейсмоакустики	
W, %, влажность	полевые работы по зондированию с отбором проб; лабораторные испытания; оформление результатов	полевые работы по измерению скоростей упругих волн; обработка и оформление результатов измерений	18,5	9,00	5–10
δ, коэффициент пористости	полевые работы с бурением и отбором проб или монолита; лабораторные испытания: влажность, плотность, объемная масса; вычисления и оформление результатов	то же	4–20	0–92	2–8
$\rho_{ск}$, объемная масса скелета	полевые работы с бурением и отбором проб или монолита; лабораторные испытания: влажность, объемная масса; вычисления и оформление	–"–	3–90	0–92	2–5
Сжимаемость (модуль осадки)	полевые работы: бурение с обсадкой, отбор монолита; лабораторные испытания; вычисления и оформление	–"–	5–24	1–40	5–10
Определение глубины болотной залежи	зондирование болотной залежи; оформление результатов	сейсмопрофилирование, обработка и оформление результатов установками: одноканальными	2–00	5–70	2–15
		многоканальными	3–65	7–00	
Определение толщины насыпи и мощности болотных грунтов под ней	ручное бурение с отбором проб	сейсмопрофилир., обработка и оформление результатов установками:			
	шнековое бурение с отбором проб (УГБ-50А)	одноканальными	7–12 (23–58 с обсадкой)	5–70	2–15
		многоканальными	10–00–18–10 (с обсадкой)	7–00	

Приложение 6. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА "К"
В МЕТОДЕ "t_0"

$\bar{V}/V_r$	$1/2 \cos i$	$\bar{V}/V_r$	$1/2 \cos i$	$\bar{V}/V_r$	$1/2 \cos i$
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 $G_д$ (в кгс/см^2) ПРИ ВЕЛИЧИНЕ ОБЪЕМНОЙ МАССЫ ρ = 1,0 г/см^3

V_s, м/сек	$G_д$, кгс/см^2	V_s, м/сек	$G_д$, кгс/см^2	V_s, м/сек	$G_д$, кгс/см^2	V_s, м/сек	$G_д$, кгс/см^2
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 $E_д$ для болотных грунтов естественной залежи можно приблизительно находить по формуле $E_д \approx 3G_д$.

Литература

I. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. М., "Недра", 1970.

2. Горяинов Н.Н. Сейсморазведка при инженерно-геологических исследованиях рыхлых пород. М., ВсеГинГЕО, 1971.

3. Шемшурин В.А. Рекомендации по комплексному применению геофизических методов при инженерно-строительных изысканиях. М., ЦТИСИЗ, 1972.

4. Горшенин Ю.В. Способ определения угла наклона и глубины залегания плоской наклонной преломляющей границы. Сб."Вопросы инженерной геологии и геофизики при изысканиях железных и автомобильных дорог". М., 1972.

5. Чибисов О.В. Обработка криволинейного годографа упругих волн. Ж.геофиз., т.4, вып.2, 1934.

6. Кондратьев О.К., Гамбурцев 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", сб.П. Л., Изд. ЛГУ, 1959.

9. Кмитовенко А.Т., Бондарев В.Н. и др. Опыт использования сейсмического метода разведки для определения глубины торфяной залежи. "Торфяная промышленность", №8, 1972.

10. Ржевский В.В., Ямщиков В.Е. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. М., "Наука", 1973.

11. Миндель И.Г. Изучение физико-механических свойств лессовых 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., Сеськов В.Е. Сжимаемость и прочность органо-минеральных болотных грунтов. М., Союздорнии, №90, 1976.

I4. Яроцко В.Н., Свольков В.Е. Исследование прочностных характеристик болотных грунтов в полевых условиях. М., Тр.Союздорнии, вып.64, 1973.

I5. Бондарев В.Н. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. М., 1974.

I6. Пузырев Н.Н., Мишенькина З.Р. Приближенные способы интерпретации годографов рефрагированных волн. Методика сейсмических исследований. М., "Наука", 1969.

I7. Свольков В.Е. Применение методов сейсморазведки для исследования земляного полотна автомобильных дорог на болотах. Сб."Вопросы повышения технического уровня дорожного строительства БССР". Минск, 1974.

I8. Справочник геофизика. Т.IУ, "Сейсморазведка". М., "Недра", 1966.

I9. Берзон И.С., Епинатьева А.М. и др. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. М., Изд. АН СССР, 1962.

gost.e-ecolog.ru