

**А. А. КАГАН, М. А. СОЛОДУХИН**

**МОРЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ  
СЕВЕРО-ЗАПАДА СССР**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .

### Часть первая

#### СОСТАВ И СВОЙСТВА МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДА СССР

Глава I. Регион Балтийского щита (Мурманская область и Карелия)	7
Глава II. Регион Московской синеклизы (Архангельская и Вологодская области)	19
Глава III. Погруженный склон Балтийского щита (Ленинградская, Псковская, Новгородская области и северная часть Белоруссии)	31
Глава IV. Регион Днепровско-Донецкой впадины (Белоруссия южнее границы последнего оледенения)	51

### Часть вторая

#### ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Глава V. Методика изучения моренных отложений	63
Глава VI. Закономерности изменения состава и свойств моренных отложений	95
Глава VII. Условия формирования свойств моренных отложений	109
Заключение	128
Приложение	130
Литература	132

КАГАН Анатолий Абрамович  
СОЛОДУХИН Михаил Абрамович

#### МОРЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДА СССР

Редактор издательства С. Г. Бароянц. Техн. редактор В. И. Калужина  
Корректор Г. А. Меркулова

Сдано в набор 19/III—1971 г. Подписано в печать 28/VII—1971 г. Т-12732. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 9,46. Бумага № 2. Индекс 1—4—1. Заказ № 708/3872—2.  
Тираж 1100 экз. Цена 95 коп.

Издательство «Недра». Москва, К-12. Третьяковский проезд, д. 1/19.  
Типографии № 32 Главполиграфпрома. Москва, Цветной бульвар, 26.

А. А. КАГАН, М. А. СОЛОДУХИН

# МОРЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДА СССР

(ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА)



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»  
МОСКВА 1971

**Моренные отложения Северо-Запада СССР (инженерно-геологическая характеристика).** Каган А. А., Солодухин М. А. М., изд-во «Недра», 1971, 136 стр.

В работе обобщены результаты исследований состава и физико-механических свойств моренных отложений, развитых на территории Мурманской области, Карелии, Архангельской, Вологодской, Ленинградской, Псковской, Новгородской областей и Белоруссии.

Рассматриваются вопросы, связанные с методикой изучения моренных отложений, закономерности изменения состава и свойств, а также условия формирования основных морен.

Таблиц 50, иллюстраций 28, библиография — 137 названий.

## ВВЕДЕНИЕ

Моренные отложения имеют наибольшее развитие среди четвертичных образований Северо-Запада Европейской части СССР. Они занимают более 70% территории этого района и, залегая вблизи дневной поверхности, являются сферой деятельности человека.

Строительство многоэтажных зданий и сооружений, возведение крупных жилых и промышленных комплексов, передающих на основание большие нагрузки, требуют выбора оснований, способных воспринимать значительные давления без существенных деформаций. Этим требованиям во многих случаях отвечают моренные отложения, обладающие небольшой деформируемостью и высоким сопротивлением сдвигу.

Несмотря на положительные строительные качества, моренные отложения обладают рядом особенностей, которые затрудняют проходку котлованов и траншей; бойку свай и т. п. К таким особенностям в первую очередь относятся: изменчивая мощность моренных отложений; неодинаковый состав и различные свойства их в отдельных точках даже небольшого по площади участка; парагенетическая связь с перекрывающими слабыми породами и наличие часто встречающихся скоплений и линз крупнообломочного материала, аккумулирующих напорные воды.

Тем не менее при выборе строительных площадок предпочтение отдается тем из них, где основанием сооружений служат моренные отложения. Весьма примечательно, что многие древние города и поселения очень часто приурочены к выходам моренных отложений.

Следует отметить, что морена широко используется как превосходный строительный материал для возведения плотин, дамб, насыпей, дорог и других искусственных сооружений. Моренные суглинки часто используются как сырье при производстве кирпича. Таким образом, интерес к моренным отложениям вызван в первую очередь запросами практики. Морены представляют интерес и с

научной точки зрения. По мнению подавляющего большинства исследователей, моренные отложения являются продуктом ледников, некогда покрывавших территорию Северо-Запада СССР. Изучение ледниковых отложений на севере нашей страны привели Г. Гельмерсена и С. С. Куторгу еще в середине прошлого века к выводу о том, что в конце третичного периода Финляндия и северная часть России были погребены подо льдом. В 1876 г. П. А. Кропоткин сформулировал ряд положений теории материкового оледенения, некоторые из них не потеряли своего значения и поныне. Однако многие вопросы формирования ледниковых отложений все еще являются дискуссионными.

И. В. Попов, М. В. Чуринов и др. выделяют моренные отложения как ярко выраженный генетический тип формации поверхностных отложений. С этой точки зрения изучение состава и свойств морен различных оледенений на большой территории способствует развитию теории региональной инженерной геологии.

Моренным отложениям уделялось и уделяется много внимания. Широко известны работы, посвященные стратиграфии и литологии моренных отложений, — Н. И. Апухтина, Г. С. Бискэ, М. А. Лавровой (по Мурманской области и Карелии); М. Е. Вигдорчика, Д. Б. Малаховского, Э. Ю. Саммета, Н. Н. Соколова (по Ленинградской, Псковской и Новгородской областям); Э. И. Девятовой, В. Г. Легковой, Э. И. Лосевой (по Архангельской и Вологодской областям); Н. А. Махнач, М. М. Цапенко (по Белоруссии). Вопросы геоморфологии, стратиграфии и литологии морен рассмотрены в фундаментальных исследованиях Г. И. Горецкого, К. И. Лукашева, К. К. Маркова, Е. В. Рухиной, Е. В. Шанцера, С. А. Яковлева и др.

В то же время, несмотря на очень большой объем инженерно-геологических изысканий, выполненных различными производственными и исследовательскими организациями, опубликовано еще мало работ, освещающих физико-механические свойства и условия строительства на моренных отложениях.

К ним относятся труды Н. П. Астратовой, Г. П. Мазурова, Д. П. Прочухана (Север Европейской части СССР), Е. С. Карпышева, М. М. Макоимова, С. С. Морозова, С. С. Полякова (центральные области), Е. Ф. Винокурова (Белоруссия), И. Ю. Шимкуса (Литва), Н. Г. Верейского и Е. А. Чеклиной (области последнего оледенения) и др. Малочисленность публикаций по такому важному вопросу объясняется главным образом укоренившимся представлением о моренных отложениях как о хаотическом, крайне неоднородном скоплении разных по величине обломков, распределение которых в пространстве не подчиняется никаким закономерностям.

Необходимо отметить, что проблема сравнения неоднородности морен с породами других генетических типов осложняется отсутствием общепринятых критериев, которые позволяли бы количественно оценить неоднородность состава и свойств.

Работы Г. С. Бискэ, Н. А. Нагинского и др., а главным образом Е. В. Рухиной показали, что строению и составу моренных отложений присущи определенные закономерности. Однако инженерно-геологический аспект этой проблемы еще далек от своего решения. Для познания закономерностей изменений инженерно-геологических характеристик морены в пространстве необходимо не только проанализировать показатели состава и свойств на больших площадях, но и рассмотреть условия формирования ледниковых отложений. Следует сразу сказать, что анализ условий формирования морен весьма сложен. Если относительно легко описать и смоделировать формирование субкавальных образований и наблюдать их в природе, то в отношении морен этого сделать пока не удастся. Последнее объясняется, во-первых, тем, что формирование моренных отложений обусловлено сочетанием большого числа факторов, а во-вторых, труднодоступностью основания ледниковых покровов, где можно было бы наблюдать отложение основных морен. К тому же опыт исследования районов современного оледенения еще очень незначителен, и деятельность современных ледниковых покровов отличается от работы древних ледников.

В настоящее время отсутствует единая стратиграфическая схема четвертичных отложений Европейской части СССР, чем объясняется обилие различных региональных схем, подчас трудно увязываемых между собой. Нами принята схема А. И. Москвитина с изменениями для отдельных регионов в соответствии с последними опубликованными работами [72].

По схеме инженерно-геологического районирования, предложенной И. В. Поповым [85], рассматриваемая территория подразделяется на четыре региона: Балтийский щит, Московская синеклиза, погруженный склон Балтийского щита и Днепровско-Донецкая впадина. Первый из регионов включает Мурманскую область и Карелию, второй — Архангельскую и Вологодскую области, третий — Ленинградскую, Псковскую, Новгородскую области, а также северную часть Белоруссии в пределах границы последнего оледенения и, наконец, четвертый — Белоруссию южнее границы последнего оледенения (рис. 1).

В первой части работы для каждого из регионов приводится характеристика состава и физико-механических свойств разновозрастных морен, а во второй части рассматриваются вопросы, связанные с условиями формирования состава и свойств морен, особенностями изучения и основные закономерности, присущие моренным отложениям.

В основу настоящей монографии положены результаты полевых, опытных и лабораторных исследований, выполненных в Ленгидропроекте, Ленинградском тресте инженерно-строительных изысканий, различных производственных и исследовательских организациях Белоруссии.

Собрано и обработано около 10 000 различных анализов показателей состава и свойств морен выделенных регионов.

Этот материал сгруппирован по отдельным участкам, номера которых соответствуют номерам на карте, и помещен в таблицах, что позволит легко их использовать при инженерно-геологических исследованиях в этих районах.

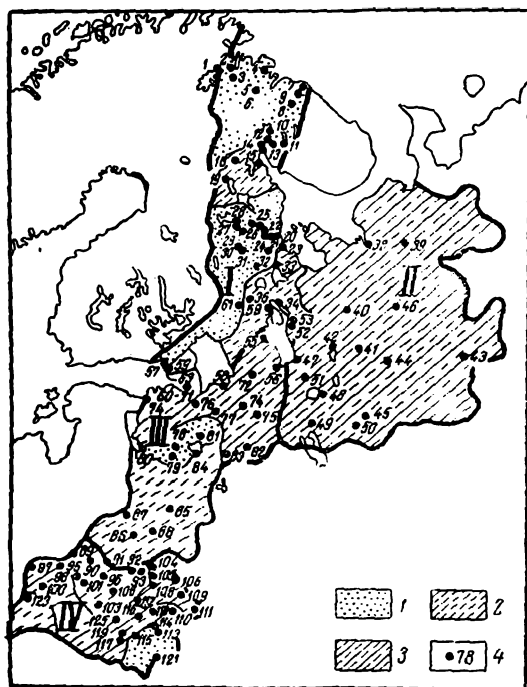


Рис. 1. Схематическая карта распространения основных литологических типов моренных отложений

I — регион Балтийского щита; II — регион Московской синеклизы; III — регион погруженного склона Балтийского щита; IV — регион Днепровско-Донецкой впадины; 1 — область преимущественного распространения песчаной морены; 2 — то же супесчаной морены; 3 — то же суглинистой морены; 4 — участки, на которых проводились полевые и лабораторные исследования, и их номера

Предлагаемая вниманию читателей работа, естественно, не лишена недостатков. Авторы будут признательны, если получат замечания и пожелания по затронутым в книге вопросам.



## ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

# СОСТАВ И СВОЙСТВА МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДА СССР

### Глава I

#### РЕГИОН БАЛТИЙСКОГО ШИТА (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ И КАРЕЛИЯ)

Регион занимает территорию Мурманской области и Карелии. Здесь развиты моренные отложения окского, днепровского, калининского и осташковского ледниковых горизонтов. В осташковском ледниковом горизонте выделяется морена карельской стадии [25]. Моренные отложения окского оледенения, представленные крепкими конгломератами из крупных включений, сцементированных песчано-глинистым материалом, встречаются в котловине Онежского озера, в районе Великой Губы, в верховьях р. Важики и других местах в понижениях докембрийских пород на глубинах более 100 м. Они отличаются преимущественно серым цветом вследствие обогащения материалом пород ледникового ложа. Мощность морены изменяется от единиц до десятков метров.

Морена днепровского оледенения имеет островное распространение. В этих отложениях, представленных супесями и суглинками, содержится большое количество валунов, иногда образующих скопления. В составе валунов преобладают кислые изверженные породы. Днепровская морена вскрыта на глубинах от 20 до 100 м и более в районе Петрозаводска и др.

В центральной и северо-восточных частях Кольского полуострова, на восточном побережье Онежского озера встречаются глины, суглинки, реже супеси и пески, относящиеся к морене московского оледенения. Среди валунного материала преобладают габброидные и гранитные породы. Глубина залегания морены варьирует в широких пределах — от 20 до 80 м, местами до 100 м. Мощность моренного горизонта очень непостоянна и изменяется от единиц до десятков метров, в среднем она составляет около 10 м.

Морена калининского оледенения является обычно третьим сверху моренным горизонтом. Это преимущественно суглинки бурого цвета с валунами кристаллических пород. По своему составу калининская морена более грубая, чем московская. Мощность морены варьирует от 1 до 30 м. В значительном диапазоне изменяется и

глубина залегания кровли морены. В составе крупных включений преобладают угловатые обломки известняков, гнейсов и зелено-каменных пород.

Отложения осташковского оледенения развиты в рассматриваемом регионе повсеместно. В соответствии со стратиграфической схемой четвертичных отложений Северо-Запада СССР в пределах осташковского ледникового комплекса выделяются как собственно осташковская морена, так и морена последнего — карельского оледенения [25].

В области карельского оледенения осташковская морена уцелела лишь в углублениях кристаллических пород и встречается в отдельных местах на Кольском полуострове (р. Стрельня), а также в Карелии в районе рек Выги, Повенчанки и на северном берегу Онежского озера. Мощность морены изменяется от 3—4 до 20 м и более. В составе морены преобладают суглинки и супеси, пески встречаются редко. Цвет морены обычно серый, в составе крупного материала отмечаются плагиограниты и гранито-гнейсы.

Район развития морены, относимой к карельскому оледенению, выделяется по цепи конечноморенных образований, прослеживающихся с севера на юг по Кольскому полуострову и уходящих южнее рассматриваемого региона к границам Польши [25]. Эта морена, представляющая наибольший интерес для инженерно-геологического изучения, рассматривается более детально.

Средняя мощность моренных отложений на западе Мурманской области около 4 м, на юге этого района и в северной части Карелии она составляет примерно 5 м, а в центральной — порядка 5—6 м. В юго-восточной части Карелии, где четвертичные отложения подстилаются осадочными породами палеозоя, средняя мощность морены составляет 7—8 м.

Цвет морены определяется составом пород, ассимилированных ледником, а также процессами выветривания и почвообразования. В том случае, если морена лежит на коренных породах и последние принимают в ней существенное участие, то цвет морены находится в прямой зависимости от окраски пород коренного ложа [12, 91 и др.]. Если же моренные отложения отделены от пород коренного ложа, то цвет их может весьма резко отличаться от окраски коренных пород. В ряде случаев морена хотя и залегает на коренных породах, но отличается от них по цвету.

Относительное постоянство минерального состава коренных пород, развитых на территории запада Кольского полуострова и Карелии, обусловило однообразие цветовой гаммы песчаных и супесчаных моренных отложений. Обычно это серый цвет с зеленоватым, буроватым и желтоватым оттенками. В районах развития пород, отличающихся по своему составу, меняется окраска морены [12, 59, 91].

*Гранулометрический состав.* Морены, развитые в пределах Балтийского щита, включают все гранулометрические разности пород — от валуников до глин (табл. 1).

## Гранулометрический состав моренных песков и супесей

Номер участка	Район	Число определений	Гранулометрический состав, % (размеры частиц, мм)												
			естественной смеси					мелкозема							
			>100	100— —10	10—2	2—0.5	0.5— —0.25	0.25— —0.05	0.05— —0.002	0.002—0.5	0.5— —0.25	0.25— —0.05	0.05— —0.002	<0.002	
<i>Пески развозернистые</i>															
3	Северо-запад Мурманской обл. . . . .	26	—	20	12	19	17	24	7	1	29	25	36	9	1
7,9	Центр Мурманской обл. . . . .	179	18	25	15	12	22	10	10	1	25	20	37	17	1
18	Север Карелии . . . . .	36	20	19	26	18	11	18	7	1	32	20	33	13	2
<i>Пески мелкозернистые</i>															
1	Северо-запад Мурманской обл. . . . .	88	19	15	18	14	13	27	12	1	21	19	41	18	1
6,8	Центр Мурманской обл. . . . .	242	19	21	19	12	11	26	10	1	21	20	41	17	1
17	Север Карелии . . . . .	43	25	18	19	16	9	31	6	1	25	14	49	10	2
20, 21	Восток Карелии . . . . .	119	9	15	9	14	13	35	13	1	19	17	46	17	1
24—41	Центр Карелии . . . . .	148	14	13	12	11	13	40	10	1	14	17	53	15	1
36	Юг Карелии . . . . .	31	—	19	15	14	8	33	10	1	21	12	51	15	1
<i>Пески пылеватые</i>															
10	Центр Мурманской обл. . . . .	7	10	18	11	11	13	28	18	1	16	18	38	26	2
23	Восток Карелии . . . . .	18	10	12	9	9	13	38	17	2	12	16	49	21	2
26,31,33	Центр Карелии . . . . .	108	11	10	12	10	11	38	18	1	13	14	49	23	1
37	Юг Карелии . . . . .	13	—	9	15	9	8	35	23	1	12	10	46	31	1
<i>Супеси</i>															
4—5	Север Мурманской обл. . . . .	69	20	18	16	17	11	26	10	2	26	17	39	15	3
11, 12	Центр Мурманской обл. . . . .	34	18	15	9	15	16	30	13	2	20	21	39	17	3
16	Юг Мурманской обл. . . . .	23	—	22	11	11	15	27	11	3	16	22	41	16	5
17—19	Север Карелии . . . . .	—	25	12	11	11	8	33	19	6	14	11	43	24	8
35	Центр Карелии . . . . .	72	21	21	20	10	8	24	13	4	17	14	40	22	7
21	Восток Карелии . . . . .	25	11	15	10	12	13	31	16	3	16	17	42	21	4
36	Юг Карелии . . . . .	10	9	21	15	14	7	20	20	3	22	11	31	31	5

По гранулометрическому составу в морене можно выделить валунно-галечно-гравийную, песчаную и супесчаную разновидности с большим содержанием гравия, гальки и валунов. Они на коротком расстоянии могут переходить одна в другую как по простиранию, так и по разрезу, однако на каждом данном участке преобладает, как правило, одна из выделенных разновидностей, которая и учитывается при оценке инженерно-геологических условий строительства.

В пределах описываемого региона основную роль играют песчаная и супесчаная морены, поэтому они и рассматриваются ниже. Валунно-галечно-гравийная морена залегает местами в самых верхних горизонтах моренной толщи или образует линзы и прослои в ней.

Отличительной особенностью морены региона Балтийского щита является высокое содержание валунов, гальки и гравия. Количество валунов в морене может достигать 60—70% и более. На Кольском полуострове и в Карелии среднее содержание обломков размером более 100 мм изменяется в пределах 15—25%. В районе р. Кемь валунов значительно меньше, чем на остальной территории Карелии (см. табл. 1). Это явление пока еще не нашло своего объяснения, возможно, оно связано с переработкой ледником мощных межледниковых толщ, некогда залегавших здесь.

Среди валунов встречаются обломки различных размеров. Местами они достигают 3—5 м в поперечнике, но такие огромные глыбы редки. Преобладающий размер валунов 0,2—0,5 м. Об этом свидетельствуют как визуальные наблюдения, так и результаты грохочения, выполненные при изучении песчаной и супесчаной морен Мурманской области и Карелии (табл. 2). Валуны обычно характеризуются плохой, реже средней окатанностью.

Таблица 2

Содержание и размеры валунов

Номер участка	Район	Содержание валунов, % (размеры, м)			
		>1,0	0,50—1,0	0,25—0,50	0,1—0,25
6	Верхне-Тулумская ГЭС . . . . .	10	14	18	58
9	Серебрянская ГЭС I . . . . .	7	13	25	55
14	ГЭС Нива-I . . . . .	20	28	30	22
16	ГЭС Нива-III . . . . .	10	30	60	60
17	Князегубская ГЭС . . . . .	Не опр.	30	30	40
18	Иювская ГЭС . . . . .	«	14	14	72
19	Кумская ГЭС . . . . .	9	22	39	30
26	Нижний Белопорожский створ (р. Кемь) . . . . .	Не опр.	14	53	33
27	Нижний Куйтозерский створ (р. Кемь) . . . . .	«	13	52	35
58	Юшкозерский створ (р. Кемь) . . . . .	«	19	33	48
33	Палакоргская ГЭС . . . . .	«	17	50	33
36	Валазминская ГЭС . . . . .	«	20	40	40

В песчаной и супесчаной моренах в пределах Кольского полуострова и севера Карелии содержание гальки и гравия изменяется от 25 до 50%, в остальной части Карелии — от 15 до 40% (см. табл. 1). Галька и гравий, как правило, угловаты или плохо окатаны, реже средней окатанности.

Содержание фракций размером менее 2 мм в морене различно, но в среднем всегда более 40%. Поэтому, согласно существующим представлениям [1, 15 и др.], физико-механические свойства моренных отложений определяются именно свойствами ее мелкозернистой составляющей.

Несмотря на разнообразие состава, среди песчаных моренных отложений можно выделить пески разно- и мелкозернистые и пылеватые. Отдельные гранулометрические разности распространены по всей упомянутой территории, хотя разнозернистые пески тяготеют к северу района.

В пределах каждой из выделенных разностей песчаной морены различия в составе, как видно из прилагаемых таблиц, с инженерно-геологической точки зрения представляются несущественными. Наибольшая разница в содержании отдельных фракций отмечается для крупнообломочной составляющей, однако эта разница обычно невелика. Что касается частиц размером менее 2 мм, определяющих физико-механические свойства морены, то их количество для каждой из разновидностей отличается значительным постоянством.

Моренные супеси встречаются отдельными пятнами в северо-западной части Мурманской области и главным образом в ее центральных и южных районах, а также в центральной, южной и юго-восточной частях Карелии.

Все разности моренных отложений содержат довольно много пылеватых частиц, причем их содержание увеличивается вместе с ростом количества глинистых фракций.

Форма частиц мелких фракций наряду с другими факторами определяет физико-механические свойства пород. Частицы размером 2—0,05 мм большей частью угловато окатаны, реже они полуокатаны и еще реже отличаются хорошей окатанностью. В пылевой фракции кварцевые зерна преимущественно угловатые и реже полуокатанные.

*Текстура, структура, петрографический и минеральный состав.* Текстурные особенности морены обусловлены условиями ее образования. Включения и скопления крупных обломков, линзы и прослой галечного, гравийного, песчаного, а иногда и глинистого материала создают беспорядочную, гнездовую или порфиловую текстуру.

Состав крупнообломочной составляющей морены зависит главным образом от эродирующей и транспортирующей способности ледника, его мощности, подвижности, рельефа поверхности пород коренного ложа, их состава, состояния и свойств.

А. А. Никонов [76] провел несколько подсчетов в низовьях р. Печенги, в среднем и верхнем течениях р. Патсо-Йоки (по 500 м на каждом участке) и установил, что подстилающие породы и перемещенные на 5—20 км составляют в крупных обломках до 90% и более. К северу от Нотозера содержание валунов гранулитов в 30 км от их месторождения достигало 35%, а еще через 5—15 км падало до 2—10%, уступая место подстилающим породам (40—75%). По р. Туломе обнаружены только единичные гальки, перенесенные на 30—50 км и более от места залегания соответствующих пород. Много подобных примеров приводит Г. С. Бискэ [12].

На участке Пальеозерской ГЭС, где коренные породы представлены в основном диабазами, а также кварцитами, песчаниками и сланцами, среди 100 валунов 40 состоят из диабазов, 32 — из кварцитов, 25 — из гранитов и 3 — из песчаников. В районе Валазминской ГЭС дочетвертичные породы сложены метаморфическими сланцами, диабазами, кварцитами и мраморами. Здесь валуны размером до 0,3 м и галька представлены местными породами. Более крупные обломки (0,3—1,0 м) состоят из гранита (50%), диабаза (25%) и кварцита (25%).

В песчаной морене на западе Кольского полуострова в составе гравия, гальки и валунов преобладают местные коренные породы: гнейсо-граниты, гранитов-гнейсы, гнейсы, мигматиты, амфиболиты и др. В северной части Карелии появляются валуны, принесенные Кандалакшским потоком из северо-восточной части Финляндии, — микроклиновые пегматоиды, габбро-амфиболиты и др. [91]. Южнее крупнообломочный материал представлен гранитами, гранитогнейсами, амфиболитами, мигматитами, диабазами, кварцитами, различными сланцами и др.

Минеральный состав песчаных фракций определяется составом подстилающих морену пород, степенью переработки моренного материала в теле ледника, а также составом и количеством обломков, принесенных льдом из соседних районов. Песчаные фракции представлены в основном кварцем, полевыми шпатами и слюдой, содержание которых в частицах размером 0,1—0,01 мм составляет на Кольском полуострове 84—94%, в юго-восточной части Карелии около 97%.

Состав тяжелой фракции отличается значительно большим разнообразием. На западе Кольского полуострова в ней господствуют рудные минералы, амфиболы, гранаты. В одних случаях преобладают пороодообразующие минералы коренных пород, в других — минералы, характерные для пород, развитых к юго-западу от места отбора образцов. Последнее обстоятельство согласуется с предположением о движении льда в направлении с юго-запада на северо-восток. В общем минеральный состав тяжелой фракции морены отражает минеральный состав коренных пород, занимающих большие пространства [76]. В Карелии, судя по немногочисленным данным, преобладает роговая обманка, рудные минералы содержатся в умеренном количестве [91]. Для юго-восточной части

Карелии ассоциация минералов тяжелой фракции (эпидот-амфибол-рудные) характерна и для более древних четвертичных отложений (межледниковых и нижнеморенных образований).

Изучение минерального состава тяжелой фракции песчаной составляющей морены во многих случаях позволяет установить, откуда принесен материал, слагающий моренные отложения в данном районе. Однако из-за незначительного содержания этой фракции она не оказывает особого влияния на физико-механические свойства морены, и лишь при резком ее увеличении (главным образом на северо-западе Кольского полуострова) возрастает удельный вес моренных песков и супесей. Физико-механические свойства песчаной и супесчаной морен существенно зависят от минерального состава легкой фракции.

*Физические свойства.* Удельный вес песков и супесей в западной части Мурманской области и в северной части Карелии отличается от значений этого показателя, определенного в других районах, и изменяется от 2,73 до 2,85 г/см<sup>3</sup> (среднее по участкам). В центральной части Карелии удельный вес снижается до 2,68—2,70 г/см<sup>3</sup>. Наиболее низкие значения его (2,66—2,67 г/см<sup>3</sup>) отмечены в южной части Карельской АССР (табл. 3).

В пределах каждого участка изменения значений удельного веса не превышают разброса, характерного для других генетических типов отложений. Это следует из того, что коэффициент вариации для распределения величин удельного веса песчаной морены составляет 1,2%. Наибольший разброс значений удельного веса характерен для северных районов, где, как уже упоминалось, в морене содержится много тяжелых минералов. Разнообразие минерального состава приводит к тому, что соотношение минералов легкой и тяжелой фракций в различных образцах неодинаково, а следовательно, отличается разнообразием и удельный вес этих образцов.

Средние значения удельного веса для выделенных гранулометрических разностей морены приведены в табл. 4.

Эти данные, так же как и визуальные наблюдения, свидетельствуют о большой плотности моренных отложений, в основном неодинаковой по разрезу и увеличивающейся с глубиной. Это явление отмечается для морен разных районов, [12, 66 и др.], хотя природа его, вероятно, различна. Оно может быть обусловлено как условиями формирования морены, так и выветриванием, перемытием водой и т. д.

Величина объемного веса песчаной и супесчаной морен тесно связана с ее составом и не зависит от расположения участка, где изучался этот показатель. Так, супеси района Кислой губы и ГЭС Нива-III (север и юг Мурманской обл.) имеют одну и ту же плотность (см. табл. 3). С уменьшением количества пылевато-глинистых фракций плотность породы уменьшается. Это следует как из приведенных выше материалов, так и из опубликованных данных. Так, моренные отложения районов Нива ГЭС-II характеризуются следующими величинами объемного веса [9]: гравелистый песок —

Показатели физических свойств песков и супесей

Номер участка	Район	Число определений	Удельный вес, $g/cm^3$	Объемный вес, $g/cm^3$	Объемный вес скелета, $g/cm^3$	Объемный вес скелета, $g/cm^3$	
						в рыхлом сложении	в плотном сложении
<i>Пески разнозернистые</i>							
3	Северо-запад Мурманской обл.	17	2,81	—	—	1,46	1,96
7,9	Центр Мурманской обл.	136	2,71	—	—	1,49	1,94
18	Север Карелии	23	2,72	—	—	1,41	1,91
<i>Пески мелкозернистые</i>							
1	Северо-запад Мурманской обл.	46	2,76	2,14	2,02	1,47	1,98
6,8	Центр Мурманской обл.	399	2,84	2,05	1,90	1,48	1,96
17	Север Карелии	24	2,71	—	—	1,57	1,92
20, 21	Восток Карелии	70	2,70	—	—	1,50	1,97
24—41	Центр Карелии	117	2,68	—	—	1,53	1,91
36	Юг Карелии	17	2,69	—	—	1,46	1,85
<i>Пески пылеватые</i>							
10	Центр Мурманской обл.	3	2,75	—	—	—	—
23, 31	Восток Карелии	8	2,70	2,14	—	1,47	1,95
26, 31, 33	Центр Карелии	29	2,69	—	—	1,45	1,92
37	Юг Карелии	17	2,66	—	—	1,50	1,82
<i>Супеси</i>							
4—5	Север Мурманской обл.	17	2,73	2,29	2,00	1,45	1,87
11, 12	Центр Мурманской обл.	7	2,73	—	—	1,39	1,88
16	Юг Мурманской обл.	12	2,72	2,16	2,03	1,39	1,77
17—19	Север Карелии	50	2,74	2,24	2,04	1,39	1,80
35	Центр Карелии	26	2,68	—	—	1,47	1,93
21	Восток Карелии	7	2,71	—	—	1,42	1,97
36	Юг Карелии	7	2,71	—	—	1,47	1,92

1,92—1,97  $g/cm^3$ , гравелистая легкая супесь — 1,94—2,05  $g/cm^3$ , гравелистая тяжелая супесь — 1,97—2,09  $g/cm^3$ .

Объемный вес скелета песков в рыхлом и уплотненном сложении не отражает их состава и практически одинаков для различных гранулометрических разностей (см. табл. 3, 4). Для супесей эти значения тем ниже, чем больше содержания в них песчано-глинистых частиц. Разница между объемным весом скелета в рыхлом



Средние значения показателей физических свойств песков и супесей

Порода	Число определений	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес скелета, г/см <sup>3</sup>			Естественная влажность, %
				в рыхлом сложении	в плотном сложении	естественный	
Пески разнозернистые	176	2,71	2,00	1,47	1,94	1,85	8
Пески мелкозернистые	673	2,69	2,05	1,50	1,94	1,90	8
Пески пылеватые . . .	57	2,70	2,14	1,45	1,92	1,95	10
Супеси . . . . .	126	2,70	2,24	1,49	1,84	1,99	11

и уплотненном сложении значительна, что указывает на способность моренных отложений легко уплотняться.

Различия в условиях залегания и гидрогеологической обстановке приводят к существенному изменению влажности моренных отложений. Там, где существуют благоприятные условия для дренажа (на склонах возвышенностей, у водоемов), влажность морены невелика, а в понижениях доледникового рельефа она существенно возрастает. С другой стороны, высокая плотность морены обуславливает ее низкую водопроницаемость. Поэтому нередко моренные отложения являются водоупором или относительным водоупором, подстилая или перекрывая водоносные горизонты. Кроме того, в морене часто встречаются линзы и прослои водовмещающих пород, что создает предпосылки для насыщения моренных отложений водой. Влажность моренных песков изменяется от 4 до 13%, а супесей — от 3 до 19%.

Как песчаная, так и супесчаная морены очень остро реагируют на повышение влажности, особенно в нарушенном сложении. Увеличение влажности на 2—4% переводит моренные отложения нарушенного сложения в текучее или плавунное состояние. При наполнении водой шурфов, простоявших несколько лет с вертикальными стенками, последние оплывали. Шурфы, пройденные зимой, весной обваливались в результате увеличения влажности морены в процессе ее замерзания — оттаивания. В то же время шурфы, заложенные на участке Ондской ГЭС и закрытые сверху настилом для предохранения от атмосферных осадков, простояли почти 15 лет, сохранив вертикальные откосы. В неприкрытых шурфах стенки обвалились.

Высокие значения объемного веса скелета моренных отложений обуславливают их низкую пористость. Величина пористости находится в соответствии с гранулометрическим составом морены. Пористость песков и супесей в среднем по участкам изменяется от 19 до 33%.

Супесчаная морена при естественной влажности имеет, как правило, твердую консистенцию, однако, как упоминалось выше, с увеличением влажности при нарушении естественного сложения

она легко переходит в текучее состояние. Влажность на пределе текучести супесей 15—18%, а на пределе раскатывания около 11%. Соответственно числа пластичности составляют 3—5%. Показатель консистенции у супесей меньше нуля и изменяется в пределах от минус 0,2 до минус 0,7.

*Водные свойства.* Размокание породы зависит от гранулометрического состава (особенно от количества пылеватых частиц), структуры, текстуры, начальной влажности и плотности сложения. Размокание образцов песчаной морены изучалось на участке Путкинской ГЭС. Образцы с размером сторон 3—7 см помещались на сетку с ячейками 1×1 см. Всего было исследовано около 40 образцов, отобранных из шурфов с глубин от 0,8 до 5,5 м. При опускании в воду все образцы через 20—50 сек полностью разрушались. Время размокания моренных супесей больше, но и они распадаются полностью или на мелкие комочки за 3—10 мин.

Легкая размокаемость моренных отложений облегчает их использование при возведении сооружений методом отсыпки в воду. Мелкозем морены, слагающей откосы каналов, легко выносятся, а валуны, галька и гравий облекают последние защитным слоем, избавляя иногда от необходимости искусственно крепить откосы каналов.

Обычно коэффициент фильтрации песчаной и супесчаной морен меньше 1 м/сутки. В линзах водовмещающих галечников, песков и т. д. водопроницаемость морены резко возрастает, достигая 60 м/сутки (Валазминская ГЭС) и более. Вода в линзах нередко обладает напором до 6—10 м. Хотя количество воды в таких линзах относительно невелико, она создает трудности при проходке котлованов, траншей и других выработок. Резко увеличивается коэффициент фильтрации (до 20—30 м/сутки и больше) в верхних горизонтах моренной толщи, где развита абляция морена.

Коэффициент фильтрации морены, определяемый в лаборатории, в подавляющем большинстве случаев оказывается больше, чем рассчитанный по результатам опытных откачек. На участке Иовской ГЭС отношение коэффициентов фильтрации, полученных в лаборатории и в поле, составляет 5 (для песчаной морены) и 10 (для супесчаной морены). В районе Верхне-Тулумской ГЭС, где развиты моренные мелкозернистые пески, откачки дали коэффициент фильтрации 0,01—3,86 м/сутки, а лабораторные эксперименты — 0,06—48,4 м/сутки. Эти расхождения объясняются преимущественно различием в плотности породы в естественном залегании и образцов, испытываемых в лаборатории, а также отсутствием крупнообломочного материала в последних.

Влияние объемного веса скелета на проницаемость песков и супесей иллюстрируется рис. 2. Увеличение объемного веса скелета с 1,6 до 1,7 г/см<sup>3</sup> приводит к снижению коэффициента фильтрации почти на порядок. При дальнейшем росте плотности интенсивность уменьшения коэффициента фильтрации снижается.

Низкая водопроницаемость моренных отложений приводит к

развитию поверхностных сплывов на склонах и откосах при воздействии на последние фильтрационных потоков. Подобные явления отмечаются в литературе [8]. Это особенно характерно для морены, представленной пылеватыми песками и супесями.

Присутствие в составе моренных отложений пылевато-глинистых частиц, часто в большом количестве, обуславливает склонность этих отложений к пучению. Пучению подвержены моренные отложения различного состава. Так, в откосах деривационного канала

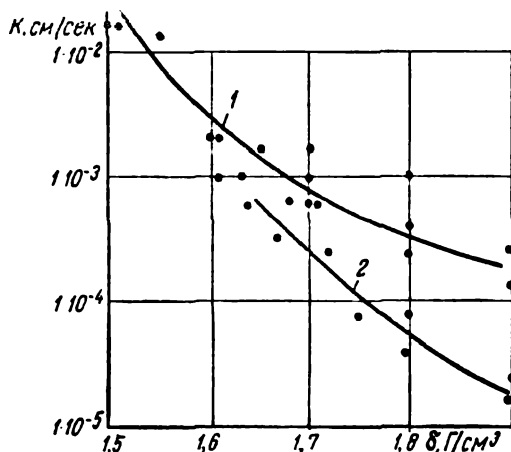


Рис. 2. Влияние плотности на водопроницаемость песков (1) и супесей (2)

Нива ГЭС-II процессы пучения протекали в грубых гравелистых и мелкозернистых песках с содержанием пылеватых (9%) и глинистых (1%) частиц и в супесях. При этом деформация откосов в гравелистых песках составляла около 5 см, а в супесях — 9 см. Промерзание в зоне капиллярного поднятия воды, фильтрующейся из канала или в канал, вызывало увеличение влажности и объема пород верхних горизонтов откосов и приводило к образованию трещин в бетонной облицовке канала. Наибольшее пучение приурочено к участкам, сложенным супесями, наименьшее — к участкам распространения песков. Величина морозного пучения достигала 10 см при глубине промерзания 156 см [9].

**Механические свойства.** Значительная плотность моренных отложений обуславливает их относительно высокое сопротивление сдвигу.

На рис. 3 видно, что при одном и том же объемном весе скелета средние значения коэффициентов трения моренных песков и супесей разного состава оказались весьма близкими. Это объясняется, вероятно, тем, что при большой плотности и составе, близком к оптимальному, некоторые различия в составе не сказываются на сопротивлении сдвигу. Содержание в супесях глинистых фракций

не столь велико, чтобы свойства этой фракции могли повлиять на сопротивление сдвигу породы. Супеси наиболее близки по составу к оптимальным смесям, поэтому в естественных условиях они плотнее песков и, следовательно, характеризуются при прочих равных условиях большей прочностью.

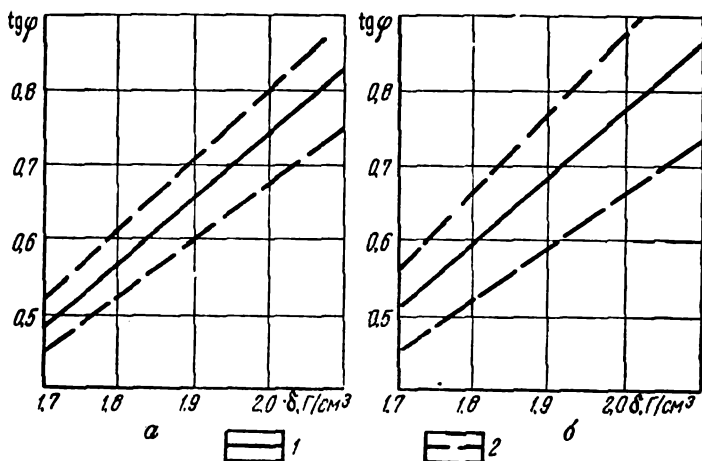


Рис. 3. Зависимость угла внутреннего трения песков (а) и супесей (б) от объемного веса скелета

1 — среднее значение; 2 — наименьшее и наибольшее значения

Данные о механических свойствах и водопроницаемости моренных песков и супесей приведены в табл. 5.

Таблица 5

Механические свойства и водопроницаемость песков и супесей

Порода	Объемный вес скелета в естественном залегании, $g/cm^3$	Коэффициент трения	Коэффициент фильтрации, $m/сутки$
Пески разнозернистые . . . . .	1,85	0,55	0,63
	10	152	10
Пески мелкозернистые . . . . .	1,90	0,58	0,20
	159	346	20
Пески пылеватые . . . . .	1,95	0,62	0,14
	7	346	8
Супеси . . . . .	1,99	0,66	0,03
	5	176	27

Примечание. Цифры в знаменателе — число определений.

Коэффициент трения песков и супесей заметно увеличивается возрастом объемного веса скелета, который, в свою очередь, повышается по мере приближения гранулометрического состава торфяны к оптимальному (см. табл. 5).

Моренные отложения в естественном залегании обладают незначительной сжимаемостью. В то же время из-за неравномерного распределения крупнообломочного материала и неодинаковой плотности в разных точках сжимаемость моренной толщи на разных частях неодинакова. Эти различия усугубляются линзами глинистых образований, нередко встречающимися в морене.

Изучение компрессионных свойств образцов песчаной морены нарушенного сложения показало, что при влажности, близкой к естественной, наблюдается зависимость между относительной деформацией и плотностью породы до опыта. Деформации от каждой ступени нагрузки стабилизируются практически через несколько минут после начала опыта. Время полной консолидации образцов не превышает 15—40 мин. Упругая деформация составляет значительную часть от общей осадки, достигая почти 70% при коэффициенте пористости около 0,5.

Для выяснения характера сжимаемости моренных песков при различной влажности в компрессионный прибор загружались образцы, полностью насыщенные водой, с естественной влажностью и сухие, с начальным коэффициентом пористости около 0,8. Все три образца очень сильно уплотнились при нагрузке  $1 \text{ кг/см}^2$  (около 90% осадки от конечной). Последующее уплотнение оказалось незначительным. Наибольшая относительная деформация отмечалась для неп полностью водонасыщенного образца, наименьшая — для сухого.

Сжимаемость моренных супесей изучалась на участке Иовской ГЭС. Исследованные образцы имели практически одну и ту же плотность. Все они показали относительную деформацию 2% при нагрузке  $3 \text{ кг/см}^2$  и 3% при нагрузке  $6 \text{ кг/см}^2$ . Однако в естественных условиях их сжимаемость составила около 0,2% [80].

## Глава II

### РЕГИОН МОСКОВСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ И ВОЛОГОДСКАЯ ОБЛАСТИ)

В пределах рассматриваемого региона, который занимает территорию Архангельской и Вологодской областей, развиты моренные отложения окского, днепровского, московского и калининского оледенений.

Моренные отложения окского оледенения сохранились на отдельных участках в углублениях докембрийских пород на западе Архангельской, северо-западе и центре Вологодской областей. Н. А. Алухтин и И. М. Экман описывают окскую морену в районе оз. Белого, залегающую на глубине около 110 м и представленную

сплошным валунником мощностью до 7 м. Супесчаная морена темно-серого цвета с содержанием крупных включений до 25% встречена к югу от Онежско-Ладожского перешейка (р. Тукша) на глубине 111—116 м [25]. Разобщенные пятна окской морены отмечаются В. Б. Соколовой в центральной части Вологодской области. Эта морена мощностью до 70 м, залегающая на дне дочетвертичных погребенных долин, представлена суглинками серых и бурых тонов с включениями преимущественно изверженных пород. Из всего обломочного материала только 20—30% приходится на песчаники, доломиты и известняки местных пород. Минеральный состав морены отличается от подстилающих пород триаса и перми повышенным содержанием гидрослюды и большим количеством акцессорных минералов.

Отложения днепровского оледенения имеют довольно широкое развитие в пределах региона. На р. Тукше это супеси серого цвета с небольшим количеством (до 7%) обломочного материала преимущественно кристаллических пород. В северо-западной части Архангельской области днепровская морена встречена в депрессиях коренного ложа. Она представлена буровато-серыми суглинками с гнездами и линзами песков и залегает на глубине более 100 м. В составе валунов отмечаются как местные пермские мергели и песчаники, так и граниты кольско-карельского происхождения. В. Г. Легкова указывает на наличие в морене ракушечного детрита, особенно в нижних слоях морены. Среди глинистых минералов днепровской морены преобладают гидрослюды в отличие от морских отложений региона, где господствует бейделлит [25].

Морена московского оледенения развита преимущественно в восточной и юго-восточной частях региона. На западе она встречается к югу и востоку от конечных морен осташковского ледниковья. Н. И. Апухтин и И. М. Экман относят к московской морене второй сверху горизонт в районе р. Онеги, озер Лача и Нядома. Эта морена выходит на поверхность к востоку от конечных морен калининского ледника. Э. И. Девятова выделяет московскую морену под морскими отложениями в нижней части бассейна р. Онеги [30]. Морена вскрывается на глубине 30—50 м по р. Иксе и в других пунктах по берегам р. Онеги. Она представлена серыми суглинками с большим количеством гравия и гальки преимущественно местных пород и имеет мощность, достигающую 30 м [25]. К югу от р. Иксы изменяются цвет и состав морены вследствие резкого увеличения содержания крупных включений известняков карбона. Э. И. Девятовой, Э. И. Лосевой и другими исследователями отмечается двучленное строение московской морены — бурой в верхней части и серой, с ракушечным детритом — в нижней [31]. Морена мощностью около 10 м располагается в понижениях дочетвертичного рельефа.

Московская морена занимает обширные площади южной половины Архангельской и восточной части Вологодской областей. Мощность морены в верхней части бассейна р. Сев. Двины и во-

дораздела рек Пинеги и Вашки составляет в среднем около 5 м. Морена представлена суглинками, реже супесями. Н. А. Апухтин и Л. А. Щукин отмечают наличие в морене разложившихся растительных остатков [25]. В районе Вологды московская морена выходит на поверхность или залегает под отложениями последнего оледенения. Представляют интерес описываемые В. Б. Соколовой 3—4-метровые прослои суглинков рыхлой пористой текстуры, состоящих из «окатышей» диаметром от 1—2 мм до 1—1,5 см и пустот между ними, что связывается ею с процессами ледяного выпучивания в период отложения морены [25]. Местами в морене наблюдается слоистость, обусловленная чередованием прослоев разного цвета и различного состава. Гравий, галька и валуны состоят преимущественно из местных пород — известняков и песчаников. Большой фактический материал, собранный В. Б. Соколовой, В. И. Гаркушей и Е. И. Хавиным, показывает, что в минеральном составе московской морены присутствует больше роговой обманки и эпидота и меньше карбонатов, рудных минералов и гидрослюд, чем в нижележащих моренах. По сравнению с моренами верхнего отдела в отложениях московского оледенения отмечается повышенное содержание карбонатов, рудных минералов и роговой обманки [25].

Наиболее широко распространены в рассматриваемом регионе морены калининского и осташковского оледенений.

Морена калининского оледенения выходит на поверхность в низовьях р. Сев. Двины и занимает обширную площадь бассейна р. Онеги. Морена представлена суглинками с включениями преимущественно известняков; обломки кристаллических пород имеют подчиненное значение. Нередко в морене встречается ракушечный детрит. В пределах южной половины Архангельской области калининская морена является почти повсеместно первым ют поверхности моренным горизонтом. Она обычно подстилается морскими осадками микулинского межледниковья, реже коренными породами, а местами непосредственно московской мореной. Калининская морена по составу имеет большое сходство с московской. В ней встречаются перегнившие остатки растений, ракушечный детрит и даже целые раковины.

Моренные отложения осташковского оледенения развиты в северо-западной части региона в низовьях рек Сев. Двины и Онеги. Морена представлена коричневато-серыми или красно-бурыми суглинками с линзами и прослоями супесей и песков. Среди валунов широко распространены граниты и гнейсы Кольского полуострова, местные песчаники и известняки встречаются реже. Морена содержит очень мало крупных включений и местами трудно отделяется от подстилающих морских отложений. Минеральный состав морены также имеет много общего с морскими осадками. В районе Архангельска моренная толща обычно слоиста и содержит детрит ракушек. Исключительный интерес представляет послойное микропалеонтологическое изучение осташковской морены низовьев р. Сев.

Градулометрический состав суглинков

Номер участка	Район	Число определений	Градулометрический состав, % (размеры частиц, мм)						
			>10	10-2	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,05	0,05-0,002	<0,002
<i>Московская морена</i>									
44	г. Вельск	3	Следы	5	4	5	34	39	13
43	г. Котлас	2	«	1	2	3	38	33	13
51	Волго-Балтийский водный путь	111	0-18	3-31	3-35	0-22	14-40	18-52	4-20
			1	8	7	12	28	34	10
<i>Калининская морена</i>									
40	р. Икса	120	0-5	1-9	1-11	3-15	7-55	30-84	7-35
			1	3	4	6	30	40	16
41	г. Няндама	81	0-18	1-22	1-7	4-12	10-39	26-68	3-22
			1	7	4	7	25	39	17
39	г. Пинега	12	0-4	1-9	4-11	8-12	24-41	25-57	7-21
			1	4	6	10	32	34	13
42	г. Каргополь	3	1	3	8	6	35	37	10
50	г. Вологда	28	0-7	0-14	0-6	1-7	10-42	16-67	6-16
			Следы	7	4	5	26	47	11
			0-5	1-27	2-3	2-5	13-23	41-64	9-15
45	пос. Сокол	5	1	10	3	3	18	53	13
<i>Осташковская морена</i>									
38	г. Архангельск	92	0-6	1-13	1-13	1-15	7-43	24-77	13-30
			Следы	4	5	6	25	40	20



Номер участка	Район	Число определений	Гранулометрический состав, % (размеры частиц, мм)						
			> 10	10—2	2—0,5	0,5—0,25	0,25—0,05	0,05—0,002	
47	г. Вытегра . . . . .	10	Следы	$\frac{1-12}{4}$	$\frac{3-23}{6}$	$\frac{2-14}{5}$	$\frac{18-41}{27}$	$\frac{31-53}{43}$	$\frac{9-19}{15}$
48	р. Шексна . . . . .	14	$\frac{0-10}{3}$	$\frac{0-8}{5}$	$\frac{0-8}{6}$	$\frac{1-8}{5}$	$\frac{20-58}{30}$	$\frac{32-57}{43}$	$\frac{4-19}{8}$
51	Волго-Балтийский водный путь . . . . .	155	Следы	$\frac{0-24}{7}$	$\frac{0-20}{7}$	$\frac{0-25}{11}$	$\frac{6-72}{32}$	$\frac{16-57}{30}$	$\frac{6-30}{13}$

Примечания. 1. Анализ выполнялся с подготовкой образцов полудисперсным способом.  
2. Здесь и далее в числителе—пределы изменений, в знаменателе—средние значения.

Двины, проведенное В. Г. Легковой. Эти исследования показали, что верхние слои морены не содержат органических включений, в то время как нижние обогащены большим количеством хорошо сохранившихся раковин фораминифер. Указанное обстоятельство позволило В. Г. Легковой сделать вывод об отложении нижних слоев морены в морской среде с глубиной бассейна около 50 м [60].

Моренные отложения московского, калининского и осташковского оледенений, наиболее часто попадающие в сферу воздействия сооружений, представляют особый интерес с инженерно-геологической точки зрения. Ниже рассматриваются состав и свойства этих образований.

**Гранулометрический состав.** Как уже отмечалось, моренные отложения региона представлены чаще всего суглинками, реже супесями с редкими включениями гравия, гальки и валунов. Гранулометрический состав морены иллюстрируется табл. 6.

Количество крупного материала в морене редко превышает 10% и лишь при залегании морены непосредственно на коренных породах увеличивается до 20—30%. Преобладающий размер валунов 10—20 см, но местами встречаются глыбы до 2—5 м в поперечнике. Крупные обломки имеют преимущественно плохо окатанную и угловатую форму.

Как видно из табл. 6, основными компонентами гранулометрического состава явля-

ются фракции мелкого песка, пыли и глины, содержание которых как для разных участков, так и для разновозрастных морен довольно постоянно. Следует отметить повышенное содержание глинистых частиц в моренных отложениях района Архангельска, что связывается нами с обогащением их материалом морских глин и, возможно, с отложением моренного материала в морской среде.

Предварительная химическая обработка проб грунта повышает выход глинистых частиц за счет диспергации более крупных фракций главным образом размером 0,05—0,002 мм, что подтверждается данными, приведенными в табл. 7, и может быть объяснено коагулирующим действием карбонатов.

Таблица 7

Влияние метода подготовки на результаты гранулометрического анализа

Метод подготовки образцов к анализу	Число определений	Гранулометрический состав, % (размеры частиц, мм)			
		>2	2—0,05	0,05—0,002	<0,002
Полудисперсный . . . . .	28	7	35	47	11
Дисперсный (с химической обработкой)	17	7	34	39	20

Следует отметить, что именно пылеватые частицы определяют такие свойства морен, как пучение при промораживании, размокаемость и др.

*Физические свойства.* В соответствии с довольно устойчивым минеральным составом моренных суглинков средние значения удельного веса для разных морен и разных участков изменяются в весьма узких пределах, составляя 2,71—2,75 г/см<sup>3</sup> (табл. 8). Об однородности ряда распределения частных значений удельного веса свидетельствуют средние квадратические отклонения, составляющие 0,01—0,02 г/см<sup>3</sup>, и коэффициенты вариации, изменяющиеся обычно в пределах 0,5—0,8%, но не более 1%. Эти данные позволяют отказаться от массовых определений удельного веса для моренных суглинков, сведя их к минимальному количеству контрольных определений (не более 5—7), а для расчетов принимать величину 2,73 г/см<sup>3</sup>.

Средние значения объемного веса при естественной влажности и объемного веса скелета по отдельным участкам варьируют так же незначительно (не более чем на ±0,1 г/см<sup>3</sup>), хотя пределы изменения этих показателей довольно широки.

В соответствии с плотностью морены находится и ее пористость составляющая в среднем 30—36%, и коэффициент пористости (0,28—0,72). В то же время следует отметить, что пористость для образцов, исследованных в отдельных точках, может существенно

Таблица 8

## Физические свойства суглинков

Номер участка	Район	Число определений	Физические свойства суглинков				Пористость, %	Коэффициент пористости
			Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес скелета, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %		
<i>Московская жорена</i>								
44	г. Вельск . . . . .	3	2,73	2,18	1,91	30	0,43	
46	пос. Верхн. Тойма . . . . .	2	2,71	2,09	1,75	35	0,55	
43	г. Котлас . . . . .	2	2,74	2,14	1,84	33	0,49	
51	Волго-Балтийский водный путь	59	2,77—2,90	2,09—2,39	1,71—2,14	27—37	0,37—0,59	
			2,82	2,27	2,04	28	0,39	
<i>Калининская жорена</i>								
40	р. Икса . . . . .	178	2,66—2,79	2,02—2,24	1,65—2,07	22—39	0,28—0,64	
			2,73	2,14	1,86	32	0,47	
41	г. Няндомы . . . . .	80	2,69—2,77	2,00—2,28	1,65—2,19	21—37	0,27—0,66	
			2,75	2,17	1,90	31	0,45	
39	г. Пинега . . . . .	16	2,68—2,72	2,07—2,24	1,78—2,02	27—35	0,37—0,54	
			2,71	2,16	1,90	30	0,43	
42	г. Каргополь . . . . .	4	2,72—2,74	2,00—2,06	1,73—1,76	35—37	0,54—0,59	
			2,7	2,03	1,78	36	0,56	
50	г. Вологда . . . . .	78	2,70—2,79	2,01—2,26	1,73—2,00	26—37	0,35—0,59	
			2,75	2,12	1,85	33	0,49	
49	г. Череповец . . . . .	4	2,70—2,78	2,01—2,11	1,75—1,85	31—37	0,46—0,59	
			2,75	2,07	1,80	35	0,55	
45	пос. Сокол . . . . .	16	2,68—2,74	2,06—2,16	1,77—1,84	32—36	0,47—0,56	
			2,71	2,12	1,82	33	0,49	

Номер участка	Район	Число опытных	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес скелета, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент пористости
<b>Осташковская морена</b>							
38	г. Архангельск . . . . .	163	2,64—2,79 2,73	2,04—2,23 2,14	1,67—2,00 1,83	26—42 33	0,35—0,72 0,49
47	г. Вытегра . . . . .	19	2,69—2,78 2,73	2,01—2,22 2,14	1,79—1,97 1,86	28—36 32	0,39—0,56 0,47
48	р. Шексна . . . . .	12	2,70—2,79 2,74	2,06—2,27 2,15	1,70—2,04 1,86	24—37 32	0,32—0,59 0,47
51	Волго-Балтийский водный путь .	155	2,69—2,77 2,73	2,02—2,27 2,19	1,63—2,02 1,90	21—41 30	0,27—0,69 0,43

Таблица 9

## Влажность и пластичные свойства моренных суглинков

Номер участка	Район	Число опытных	Естественная влажность, %	Влажность на пределе, %		Число испытаний, %	Показатель консистенции, В
				текущей	раскатываемая		
<b>Московская морена</b>							
44	г. Вельск . . . . .	3	14	25	13	12	0,1
46	пос. Верхн. Тойма . . . . .	1	19	31	18	13	0,1
43	г. Котлас . . . . .	3	16	26	15	11	0,1
51	Волго-Балтийский водный путь . . . .	66	7—18 11	19—27 23	10—18 12	6—15 11	(—0,4)—0,4 0,1

Продолжение табл. 9

Номер участка	Район	Число опреледеленн	Естественная влажность, %	Влажность на пределе, %		Число пластичности, %	Показатель консистенции, В
				текущая	раскатывания		
<i>Калининская морена</i>							
40	р. Икса . . . . .	176	$\frac{10-23}{15}$	$\frac{16-34}{24}$	$\frac{9-20}{14}$	$\frac{6-12}{10}$	$\frac{(-0,1)-(0,8)}{0,1}$
41	г. Нандома . . . . .	81	$\frac{10-27}{15}$	$\frac{19-40}{24}$	$\frac{12-24}{14}$	$\frac{7-16}{10}$	$\frac{(-0,4)-(0,3)}{0,1}$
39	г. Пинега . . . . .	16	$\frac{12-18}{14}$	$\frac{18-27}{21}$	$\frac{11-16}{13}$	$\frac{7-12}{8}$	$\frac{0-0,3}{0,1}$
42	г. Каргополь . . . . .	4	16	22	15	7	0,1
50	г. Вологда . . . . .	98	$\frac{10-20}{14}$	$\frac{18-34}{24}$	$\frac{11-23}{14}$	$\frac{5-15}{10}$	$\frac{(-0,4)-(0,5)}{0}$
49	г. Череповец . . . . .	4	15	24	14	10	0,1
45	пос. Сокол . . . . .	24	$\frac{14-19}{17}$	$\frac{24-31}{26}$	$\frac{14-19}{15}$	$\frac{9-19}{11}$	$\frac{(-0,2)-0,6}{0,18}$
<i>Осташковская морена</i>							
38	г. Архангельск . . . . .	219	$\frac{11-23}{17}$	$\frac{15-34}{24}$	$\frac{7-21}{14}$	$\frac{5-14}{10}$	$\frac{(-0,4)-0,5}{0,30}$
47	г. Вытегра . . . . .	28	$\frac{12-18}{15}$	$\frac{19-32}{24}$	$\frac{12-19}{14}$	$\frac{7-13}{10}$	$\frac{(-0,1)-0,4}{0,10}$
48	р. Шексна . . . . .	30	$\frac{11-22}{15}$	$\frac{17-36}{23}$	$\frac{11-21}{15}$	$\frac{5-16}{8}$	$\frac{(-0,6)-0,7}{0}$
51	Волго-Балтийский водный путь . . . . .	155	$\frac{8-31}{15}$	$\frac{21-37}{26}$	$\frac{11-22}{14}$	$\frac{8-15}{12}$	$\frac{(-0,7)-0,5}{0,1}$

отличаться. Так, в районе г. Няндомы отмечена пористость моренных суглинков в 21%, а в районе Архангельска — в 42%.

Как уже отмечалось, моренные отложения представлены в основном суглинками. Минеральный состав глинистых фракций с явным преобладанием гидрослюды и высокая карбонатность обуславливают низкие значения влажности на границе текучести и раскатывания (табл. 9). Этим объясняется и низкая коллоидная активность (коэффициент коллоидной активности составляет 0,3—0,8). Консистенция суглинков и супесей изменяется от мягкопластичной до полутвердой, однако наиболее часто встречаются породы тугопластичной и твердой консистенции (см. табл. 9). Обращает внимание исключительное постоянство средних значений влажности и пределов пластичности для всех морен региона.

В пределах Московской синеклизы встречаются так называемые, «слабые» морены, т. е. суглинки и супеси текучепластичной и мягкопластичной консистенции, что характерно для наиболее глинистых разновидностей с повышенной влажностью. Часто текучепластичная консистенция связана с участками, где в суглинках встречаются тонкие прослой и гнезда водонасыщенных песков. Следует особо отметить повышенные значения показателя консистенции морены ошашковского оледенения, особенно в районе Архангельска. Определение коэффициента консистенции по методу П. О. Бойченко не дает существенных расхождений по сравнению с показателем консистенции, изменяясь в среднем от  $-0,1$  до  $+0,03$ . Породы, как правило, полностью водонасыщены со степенью влажности 0,8—1,0.

По показателю уплотненности, который в среднем составляет 0,7—1,1, моренные суглинки относятся к нормально и сильно уплотненным грунтам.

*Механические свойства.* Моренные суглинки характеризуются высокой плотностью, низкой влажностью и в целом значительной прочностью.

Исследования сопротивления сдвигу в лабораторных условиях проводились как с предварительным уплотнением до полной стабилизации осадки при нагрузках среза, так и без предварительного уплотнения. Время среза не превышало 5—10 мин (ускоренный сдвиг). Между максимальным сдвигающим усилием при нагрузках 1, 2 и 3 кг/см<sup>2</sup> и объемным весом скелета, определенным после опыта, устанавливается четкая зависимость, несмотря на существенный разброс точек в поле графика, обусловленная как неоднородностью суглинков (различие размеров, формы и характер расположения включений в плоскости сдвига), так и погрешностями опытов. Результаты исследований моренных суглинков районов Архангельска и р. Иксы представлены в табл. 10.

Из табл. 10 следует, что некоторые условия опыта не оказывают существенного влияния на его результаты: при испытаниях без уплотнения получаются обычно несколько меньшие значения углов внутреннего трения и несколько большие — удельного сцепления,

Таблица 10

## Зависимость параметров сдвига от плотности и условий опыта

Объемный вес скелета, $g/cm^3$	Условия опыта			
	без уплотнения		с уплотнением	
	$tg \varphi$	$c, кг/см^2$	$tg \varphi$	$c, кг/см^2$
1,7	0,06	0,52	—	—
1,8	0,19	0,60	0,28	0,48
1,9	0,31	0,72	0,34	0,50
2,0	0,44	0,84	0,42	0,70
Число определений	132		96	

чем при испытаниях с уплотнением. Прочность морены более существенно зависит от водной среды и нарушения естественного сложения, особенно для супесей. Отсутствие влияния предварительного уплотнения подтверждается опытами на образцах, вырезанных из одного и того же монолита, что исключает влияние неоднородности состава и свойств суглинков на результаты эксперимента (табл. 11).

Таблица 11

## Влияние условий опыта на параметры сдвига

Влажность до опыта, %	Число пластичности, %	Условия опыта			
		без уплотнения		с уплотнением	
		$tg \varphi$	$c, кг/см^2$	$tg \varphi$	$c, кг/см^2$
20	12	0,31	0,14	0,30	0,15
25	11	0,44	0,04	0,43	0,05

Таблица 12

## Зависимость параметров сдвига от влажности (79 опытов)

Влажность, %	$tg \varphi$	$c, кг/см^2$
9	0,50	1,70
10	0,48	1,20
11	0,45	0,80
13	0,44	0,31

Соппротивление сдвигу суглинков московской морены детально изучалось при исследованиях в районе Беломорско-Балтийского водного пути. Прочность породы зависит как от влажности образца (табл. 12), так и от условий опыта (табл. 13).

Из табл. 12 следует, что влажность оказывает очень сильное влияние на сопротивление сдвигу. Прочность грунтов существенно снижается при испытаниях в водной среде (см. табл. 13). Исследования моренной супеси в районе Плявинской ГЭС показали, что при возрастании влажности с 10 до 14% угол внутреннего трения уменьшается от 22 до 7°, а сцепление — от 0,3 до 0,06  $кг/см^2$  [39]. При испытаниях на стабилометре суглинков из района р. Иксы

Зависимость параметров сдвига от условий опыта

Значение показателей	Срез без воды				Срез под водой							
	без уплотнения		с уплотнением под водой		без уплотнения		с разуплотнением под водой		с уплотнением		с уплотнением (вазущением: сложение)	
	tg φ	c, кг/см <sup>2</sup>	tg φ	c, кг/см <sup>2</sup>	tg φ	c, кг/см <sup>2</sup>	tg φ	c, кг/см <sup>2</sup>	tg φ	c, кг/см <sup>2</sup>	tg φ	c, кг/см <sup>2</sup>
Минимальное	0,44	0,56	0,43	0,59	—	—	0,42	0,11	0,32	0,36	0,16	0,26
Максимальное	0,65	2,00	0,59	2,09	—	—	—	—	0,42	1,45	—	—
Среднее	0,59	1,51	0,45	1,49	0,55	0,80	0,59	0,11	0,34	1,01	0,26	0,26
Влажность, %	8—11		8—12		10		9—11		8—11		9—10	
Число определений	13		17		9		12		12		9	

было получено среднее значение угла внутреннего трения 8°, в то время как при сдвиге без предварительного уплотнения по обычной методике среднее значение угла внутреннего трения составило 12°. Удельное сцепление суглинков по испытаниям в стабиле-метре составило 0,35 кг/см<sup>2</sup>, что вдвое больше, чем сцепление, полученное на приборах одноплоскостного среза.

Изучение прочностных свойств моренных суглинков района Вологды проводилось также в шурфах методами раздавливания призмы грунта и выпирания массива вертикальной подвижной стенкой. Результаты испытаний (табл. 14) показывают, что угол внут-

Таблица 14

Результаты испытаний на сдвиг в шурфах

Раздавливание		Выпирание				
Разрушающая нагрузка, кг/см <sup>2</sup>	Сопротивление сдвигу, кг/см <sup>2</sup>	Вертикальное усилие, кг		Длина поверхности скольжения, см	tg φ	c, кг/см <sup>2</sup>
		максимальное	минимальное			
1,73	0,86	865	720	60	0,45	0,08
1,80	0,91	1000	850	60	0,40	0,08

реннего трения составляет 22—24° при сцеплении 0,08 кг/см<sup>2</sup>, в то время как параметры прочности, полученные для суглинков из тех же шурфов в лаборатории, оказались равными; угол внутреннего трения 20°, сцепление 0,1 кг/см<sup>2</sup>.

Сжимаемость моренных суглинков, судя по данным лабораторных опытов, хотя и невелика, но неравномерна и зависит от плотности. По коэффициенту сжимаемости суглинки характеризуются как средне- и слабосжимаемые и лишь в единичных случаях как



## Сжимаемость суглинков

Номер участка	Район	Число определений	Коэффициент сжимаемости в интервале нагрузок 1—2 кг/см <sup>2</sup> , см <sup>2</sup> /кг			Модуль деформации в интервале нагрузок 2—3 кг/см <sup>2</sup> , кг/см <sup>2</sup>		
			наименьший	наибольший	средний	наименьший	наибольший	средний
<i>Калининская морена</i>								
40	р. Икса	66	0,006	0,040	0,018	60	470	100
41	г. Няндомы	12	0,007	0,022	0,013	70	210	110
50	г. Вологда	39	0,005	0,021	0,010	100	340	130
45	пос. Сокол	5	0,007	0,016	0,010	110	180	120
<i>Осташковская морена</i>								
38	г. Архангельск	57	0,006	0,042	0,018	60	240	120
47	г. Вытегра	8	0,009	0,023	0,019	80	240	100

сильносжимаемые (табл. 15). Компрессионные испытания с разгрузкой показывают, что полная деформация суглинков района р. Иксы при нагрузке 4 кг/см<sup>2</sup> соответствует остаточной. Испытания в стабилометре этих же образцов дают модуль деформации, отличающийся от компрессионного не более чем на 10%.

Определение деформативных характеристик моренных супесей и суглинков статическим нагружением штампов площадью 600 см<sup>2</sup> проводилось в районе Вологды. Результаты опытов показывают, что значения модуля деформации изменяются в зависимости от интервала нагрузок от 150 до 270 кг/см<sup>2</sup>, составляя в интервале нагрузок 2—4 кг/см<sup>2</sup> в среднем 150 кг/см<sup>2</sup>. Таким образом, полевые испытания не дают сколько-нибудь существенного увеличения значения модуля деформации, что является интересной особенностью морены описываемого региона.

## Глава III

**ПОГРУЖЕННЫЙ СКЛОН БАЛТИЙСКОГО ШИТА  
(ЛЕНИНГРАДСКАЯ, ПСКОВСКАЯ, НОВГОРОДСКАЯ ОБЛАСТИ  
И СЕВЕРНАЯ ЧАСТЬ БЕЛОРУССИИ)**

Регион занимает Ленинградскую, Новгородскую, Псковскую области и северную часть Белоруссии в пределах границы последнего оледенения. Здесь развиты отложения московского, калининского и осташковского моренных горизонтов.

Морена московского оледенения вскрывается скважинами в понижениях кровли коренных пород. Мощность ее составляет 0,4—5,0 м. Н. И. Апухтин и Э. Ю. Саммет отмечают, что состав моренных отложений зависит от состава коренных пород. Морена

представлена серыми глинами и супесями с валунами гранитов, гранито-гнейсов и порфиров, а также коричневато-красными суглинками с обломками девонских известняков, доломитов и песчаников [25].

Морена калининского ледникового сложена главным образом суглинками, а на западе региона существенное значение имеют супесчаные и песчаные разности. В морене часто встречаются линзы и прослои гравелистых песков. Цвет моренных отложений чрезвычайно разнообразен: от бурых до темно-серых тонов, мощность достигает 40 м и более. В составе валунов преобладают местные осадочные породы.

Основной интерес для инженерно-геологического изучения представляют отложения осташковского ледникового. В пределах осташковского моренного горизонта выделяют вепсовскую, крестецкую и лужскую стадии. Отложения первых двух стадий прослеживаются вдоль Валдайской гряды конечноморенных образований и рядом автором выделяются как осташковская стадияльная морена в отличие от лужской стадияльной морены, занимающей северную часть региона в районе Ленинграда.

Ниже рассматривается единый горизонт осташковского ледникового.

На водоразделах осташковская морена залегает, как правило, на коренных породах. Мощность ее изменяется от 1 до 20 м, иногда достигая 30—40 м. По составу морена представлена всеми разностями — от валунно-галечной до глинистой. Цвет морены обычно красновато-бурый, реже серый. В северной части региона морена залегает на кембрийских глинах, имеет темно-серый и серый цвет и представлена преимущественно суглинками.

К югу, в пределах Псковской области (Гдов, Плюссy, Псков), развиты пылевато-глинистые пески и супеси, содержащие значительное количество карбонатных включений.

*Гранулометрический состав.* Основной разностью морены являются суглинки с небольшим количеством гравия, гальки и валунов.

Валуны в моренных отложениях обычно немногочисленны, чаще всего это единичные обломки. Гравий и галька также содержатся в небольшом количестве (до 10—20%). Несмотря на относительную обедненность морены крупными включениями, последние нередко образуют линзы и прослои, затрудняя разведочные и строительные работы.

Основными фракциями моренных отложений, вне зависимости от состава, являются частицы размером менее 0,25 мм, содержание которых в морене всегда превышает 70%. Основную роль играют пылеватые частицы (исключение составляют пески, в которых песчаные фракции преобладают над пылевыми), составляющие в среднем до 65% (табл. 16). По содержанию частиц размером 0,05—0,002 м в суглинках четко выделяются три группы. В первой из них (суглинки) количество пыли составляет около 35%, во второй (суглинки пылеватые) — порядка 45—50%, в третьей

(суглинки сильнопылеватые) — 55—65%. Очевидно, их свойства будут отличаться друг от друга. Что касается глинистых частиц, то для суглинистой морены характерно их содержание в количестве 13—17%.

Супеси на разных участках имеют близкий состав, в котором преобладают пылеватые частицы. Гранулометрический состав песков имеет много общего с составом супесей, и в ряде случаев по содержанию глинистых частиц пески должны были бы классифицироваться как супеси. Однако определить влажность на границе раскатывания для них не удастся, и поэтому они отнесены к песчаным разностям (табл. 17).

*Текстура, структура, петрографический и минеральный состав.* Включения материала, отличающегося по составу от основной массы суглинистой морены (валуны, галька, гравий, линзы песка и т. д.), создают беспорядочную, гнездовую или порфиоровую текстуру. Изучение шлифов показало, что структура породы в основном псаммопелитовая. Однако из-за неоднородности морены в отдельных случаях она оказывается типично пелитовой. В этом случае весь образец представлен желтовато-бурым глинистым веществом, с редкими мелкими зернами различных минералов, среди которых легко различим кварц. Иногда суглинки характеризуются алевропелитовой, редко разнообломочной (псаммоалевропелитовой) структурой. Структура глинистой морены преимущественно алевропелитовая. Порода состоит из бурого изотропного вещества, в котором рассеяны мелкие обломки кварца, полевых шпатов и карбонатов.

В моренных отложениях рассматриваемого региона среди гравия, гальки и валунов встречаются обломки как местных, так и эратических пород. Привнесенный материал выделяется здесь особенно ярко из-за преобладания в породах коренного ложа осадочных образований. В пределах площади развития скальных осадочных пород, например на Ордовикском плато, доля местного материала весьма значительна. Она резко уменьшается там, где распространены полускальные и особенно рыхлые коренные породы. Так, например, на западе Ленинградской области валуны сложены в основном кристаллическими породами, развитыми в Финляндии, — различными гранитами (60—80%), гнейсами (10—40%), гранулитами, амфиболитами (5—10%), слюдяными сланцами (8—10%), филлитами, кварцитами и ютнийскими песчаниками (20—30%). В Ленинграде морена содержит валуны гранитов (красного мелко- и среднезернистого и светлого крупнозернистого) и гнейсов. Значительно реже встречаются диабазовые и амфиболитовые валуны и еще реже — валуны, сложенные кварцитами, песчаниками и кристаллическими сланцами. В южной части города в морене отмечаются галька, гравий, дресва и щебень нижнекембрийских песчаников и глин. На западе и юге области увеличивается содержание местных пород — главным образом известняков, песчаников, доломитов, мергелей и др.

Гранулометрический состав моренных суглинков

Номер участка	Район	Число опре-делений	Гранулометрический состав, % (размеры частиц, мм)											
			естественной смеси					мелкоземля						
			1,00—10	10—2	2—0,5	0,5—0,25	0,25—0,05	0,05—0,002	<0,002	2—0,5	0,5—0,25	0,25—0,05	0,05—0,002	
<i>Суглинки</i>														
36, 37	Юг-Карелии . . . . .	9	—	0—9	2—15	1—7	14—45	15—48	8—25	1—16	0—10	16—47	17—50	9—27
60, 62, 64	Центр Ленинградской обл.	33	0—3	0—7	1—13	4—13	13—42	22—59	7—26	1—14	4—15	15—44	24—62	8—28
74	Юго-восток Ленинградской обл. . . . .	7	—	0—4	1—7	2—7	23—50	23—50	9—25	2—8	2—7	21—50	25—51	10—25
<i>Суглинки пылеватые</i>														
58, 59	Центр Карельского перешейка . . . . .	21	1—10	0—8	0—12	1—9	4—44	24—48	3—29	0—13	2—9	4—48	27—52	4—30
56	Юго-восток Карелии . . . . .	4	—	6	7	7	26	38	10	8	7	30	43	12
61, 62, 65—71	Центр Ленинградской обл.	240	0—8	0—7	1—9	0—7	5—45	28—55	9—27	0—13	1—11	5—45	26—77	4—33
72	Восток Ленинградской обл.	6	0—3	0—7	1—10	0—5	5—47	30—52	10—29	1—10	0—5	6—48	30—54	10—32
75	Юго-восток Ленинградской обл. . . . .	46	0—5	0—9	2—11	0—10	6—48	23—51	7—20	2—8	3—10	22—52	27—53	8—19

78, 79	Северо-восток обл. . . . .	Псковской обл. . . . .	10	0—4 2	0—10 5	1—9 5	10—45 27	30—75 48	7—22 13	Сл—10 5	1—9 5	10—46 28	31—77 49	7—22 13
82, 83	Восток	Новгородской обл.	23	0—7 2	1—6 4	2—6 5	12—38 26	36—75 52	3—32 11	1—7 4	2—6 5	12—40 27	36—75 53	4—33 11

*Суглинки сильноклевательные*

63	Центр	Ленинградской обл.	351	0—26 17	0—18 9	0—6 3	2—27 12	21—70 44	6—25 15	0—21 11	0—7 3	2—31 14	27—86 54	7—29 18
73	Запад	Ленинградской обл.	118	0—8 5	1—17 7	0—7 3	10—31 18	32—74 48	9—22 14	1—19 8	0—7 3	11—34 20	34—75 53	9—24 16
76, 77	Юг	Ленинградской обл. . . . .	172	0—10 3	0—11 3	0—11 3	0—27 17	30—75 57	6—30 17	0—11 3	1—11 3	1—28 17	33—79 59	6—31 18
78, 79	Северо-восток	Псковской обл. . . . .	7	0—6 1	0—3 1	Сл—1 1	9—33 15	45—76 64	11—24 18	0—3 1	Сл—1 1	9—33 15	48—77 65	12—24 18
81	Северо-запад	Новгородской обл. . . . .	9	0—3 1	Сл—13 5	1—7 4	1—40 18	41—67 53	9—24 14	Сл—15 5	1—8 4	2—43 19	45—73 57	10—26 15

В песчаной фракции суглинков преобладают легкие минералы, составляющие до 99% (Приневская низменность). Примерно такое же содержание характерно для морены, развитой в долине р. Мсты.

Минеральный состав песчаных частиц исследован недостаточно, поэтому его характеристика дается на основании изучения единичных образцов. В минеральном составе частиц размером от 2 до 0,25 мм образцов суглинистой морены, распространенной в пределах Приневской низменности, преобладает кварц, количество которого увеличивается от 65—70% в зернах 2—1 мм до 80—96% в частицах 0,5—0,25 мм. Содержание полевого шпата составляет соответственно 10—27 и 0—13%. Подобные изменения для кварца и полевых шпатов согласуются с их устойчивостью к выветриванию.

В составе легкой фракции частиц диаметром 0,25—0,01 мм кварц составляет от 71 до 90%, а полевой

Гранулометрический состав моренных супесей и песков

Номер участка	Район	Число опытов	Гранулометрический состав, % (размеры частыц, мм)						
			100—10	10—2	2—0,5	0,5—0,25	0,25—0,05	0,05—0,002	
<i>Супесчаная морена</i>									
52, 53	Юго-восток Карелии . . . . .	17	0—18 6	0—19 7	3—19 10	1—21 11	10—79 42	8—41 19	3—11 5
58, 59	Центр Карельского перешейка . . . . .	26	0—10 2	1—20 9	3—25 12	1—29 12	15—64 39	10—38 22	4—10 4
78, 79	Северо-восток Псковской обл. . . . .	11	—	1—8 2	1—10 4	3—14 8	14—71 33	19—61 45	3—15 8
80	Северо-запад Псковской обл. . . . .	1	—	2	6	10	39	37	6
85	Юго-восток Псковской обл. . . . .	8	—	0—7 2	2—11 4	2—13 4	10—36 23	36—75 56	3—32 11
81	Северо-запад Новгородской обл. . . . .	13	0—24 4	0—20 7	Сл—8 9	4—18 9	9—54 32	15—42 33	2—13 6
86—88	Север Белоруссии . . . . .	14	Сл —	Сл—8 7	1—15 12	5—16 10	11—32 28	17—56 33	6—18 10
<i>Песчаная морена</i>									
80	Северо-запад Псковской обл. . . . .	34	—	0—22 4	2—13 7	4—22 13	15—85 44	4—59 27	1—10 5
81	Северо-запад Новгородской обл. . . . .	8	0—1 Сл	0—7 3	1—19 13	8—26 13	22—50 41	7—34 27	2—10 3

шпат — от 4 до 19%. В тяжелой фракции примерно в равном количестве содержатся роговая обманка и рудные минералы (21—48%). Гранат, эпидот и циркон составляют 3—17%. Такие же соотношения отмечаются и на севере Белоруссии.

Минеральный состав глинистой части моренных суглинков изучался в шлифах, а также методами термического, электронномикроскопического и электроннографического анализов. Исследование шлифов показало, что в тонкодисперсной глинистой основной массе породы рассеяны зерна кварца, полевого шпата, листочки и чешуйки слюды (биотит, мусковит, серицит) и рудных минералов.

Кварц наблюдается в виде мелких угловатых зерен. Полевые шпаты представлены обломками таблитчатой и призматической формы, трещиноватыми, часто нацело замещенными продуктами выветривания (пелитом, серицитом). Полевые шпаты по составу относятся к основным и щелочным, причем преобладают последние.

Биотит имеет бурую и зеленую окраску. Он ожелезнен и частично разложен до окислов железа. Рудные минералы находятся в тонкокристаллическом состоянии и встречаются в виде мелких скоплений.

Все кривые нагревания имеют весьма сходные очертания и характеризуются одним четким эндотермическим эффектом в интервале температур 500—600° (рис. 4). Это обстоятельство свидетельствует о том, что глинистая часть состоит в основном из гидрослюда. Небольшой экзотермический эффект около 450° и плавный подъем кривой нагревания при температурах более 550—600° свидетельствуют о наличии в моренных отложениях примеси железа. Преобладание гидрослюда в грунте подтверждается как электронномикроскопическим, так и электроннографическим анализами. На электронномикроскопических снимках видны серые, темно-серые зерна и агрегаты гидрослюда, а также черные зерна тонкодисперсного кварца. Электроннографический анализ кроме гидрослюда обнаружил небольшую примесь каолинита.

Гидрослюдистый состав тонкодисперсной фракции характерен для морены всего рассматриваемого района, так же как и для соседних областей. Прочие глинистые минералы встречаются в виде примесей в небольшом количестве.

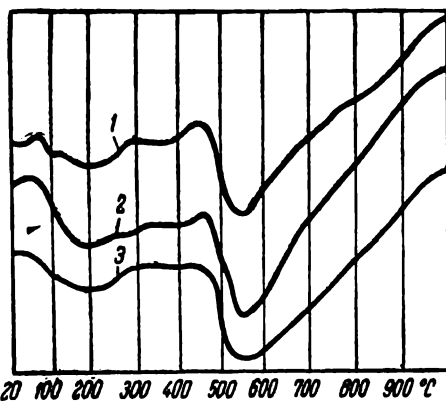


Рис. 4. Термограммы глинистой фракции моренных суглинков

1 — глубина 45 м; 2 — глубина 41 м; 3 — глубина 27 м

Результаты определения емкости поглощения образцов мореня района Ленинграда приведены в табл. 18.

В составе поглощенных ионов моренных отложений преобладают кальций и магний, содержание которых достигает 80% от общей суммы ионов. Емкость поглощения изменяется от 1,81 до 2,59 мг·экв на 100 г абсолютно сухой породы. Эта величина значительно меньше цифр, приводимых для моренных отложений других районов Европейской части СССР. Так, например, морена Подмосковья имеет емкость поглощения 18—26 мг·экв на 100 г породы [82]. С. С. Морозов для моренных отложений Русской платформы приводит цифры 4,1—26,3 мг·экв на 100 г породы [71]

Таблица 18

Поглощенный комплекс моренных суглинков

Глубина отбора образцов, м	Содержание в мг·экв на 100 г абсолютно сухой породы			
	K	Na	Ca + Mg	Емкость поглощения
27,0	0,29	0,23	2,00	2,52
41,0	0,18	0,34	2,07	2,59
45,0	0,18	0,27	1,36	1,81

В то же время А. Станковска получила данные, близкие к приведенным, — в среднем 4,4 кг·экв на 100 г сухой породы [134].

**Физико-механические свойства суглинистой морены** *Физические свойства*. Удельный вес моренных суглинков довольно постояен, в среднем по участкам он обычно изменяется от 2,67 до 2,72 г/см<sup>3</sup> (табл. 19). Примерно такой же размах имеют колебания значений этого показателя в пределах отдельных участков. Следует отметить, что однородность ряда распределений значений удельного веса моренных суглинков не меньше, чем других генетических типов отложений. Это следует, например, из того, что коэффициент вариации значений удельного веса для суглинистой морены равен 0,7%, а для нижнекембрийских глин, подстилающих четвертичные отложения в Ленинграде, — 1,1%.

Моренные отложения характеризуются высокими, хотя и разнообразными значениями объемного веса и объемного веса скелета.

Объемный вес суглинистой морены изменяется от 2,06 до 2,24 г/см<sup>3</sup>, а объемный вес скелета — от 1,73 до 1,99 г/см<sup>3</sup> (среднее по участкам). В пределах отдельных участков изменения бывают и большими, но они не превышают размаха колебаний тех же показателей для других генетических типов пород.

Плотность морены тесно связана с ее составом и не зависит от географического положения участка ее изучения. Так, для моренных суглинков объемный вес изменяется в пределах 2,21—2,24 г/см<sup>3</sup>, для пылеватых суглинков — 2,13—2,18 г/см<sup>3</sup>, для силь-



Физические свойства моренных суглинков

Номер участка	Район	Число опытных образцов	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес скелета, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент пористости
<i>Суглинки</i>							
36, 37	Юг Карелии	4	2,74	2,21	1,93	30	0,43
60, 62, 64	Центр Ленинградской обл.	10	2,68—2,72	2,14—2,28	1,87—2,02	22—35	0,29—0,54
			2,70	2,21	1,95	28	0,39
74	Юго-восток Ленинградской обл.	62	2,68—2,74	2,11—2,38	1,88—2,10	21—34	0,27—0,52
			2,70	2,28	2,06	24	0,32
78, 79	Юго-восток Псковской обл.	166	2,67—2,72	2,10—2,33	1,80—2,30	21—33	0,27—0,50
			2,69	2,23	1,97	27	0,37
81	Северо-запад Новгородской обл.	9	2,69—2,74	2,05—2,26	1,79—2,10	22—34	0,28—0,52
			2,72	2,17	1,92	29	0,41
84	Центр Новгородской обл.	29	2,66—2,71	2,18—2,32	1,94—2,12	21—27	0,27—0,37
			2,69	2,27	2,02	25	0,33
82, 83	Восток Новгородской обл.	33	2,67—2,71	2,13—2,28	1,82—2,03	24—32	0,32—0,47
			2,69	2,22	1,96	27	0,34
86—88	Север Белоруссии	25	2,63—2,71	2,03—2,32	1,87—2,25	21—33	0,27—0,50
			2,67	2,17	1,95	27	0,37
<i>Суглинки пылеватые</i>							
56	Юго-восток Карелии	20	2,71—2,76	2,02—2,26	1,84—2,03	20—34	0,25—0,52
			2,74	2,18	1,91	30	0,43

Номер участка	Район	Число опытных растений	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес скелета г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент пористости
61, 62 65-71	Центр Ленинградской обл. . . . .	169	$\frac{2,64-2,75}{2,74}$	$\frac{2,03-2,28}{2,18}$	$\frac{1,83-2,05}{1,88}$	$\frac{21-35}{31}$	$\frac{0,27-0,54}{0,45}$
74	Юго-восток Ленинградской обл. . . . .	61	$\frac{2,67-2,79}{2,74}$	$\frac{1,95-2,28}{2,13}$	$\frac{1,81-2,05}{1,86}$	$\frac{22-37}{32}$	$\frac{0,28-0,58}{0,47}$
78, 79	Северо-восток Псковской обл. . . . .	12	$\frac{2,61-2,72}{2,68}$	$\frac{2,01-2,30}{2,15}$	$\frac{1,69-2,07}{1,89}$	$\frac{22-35}{29}$	$\frac{0,28-0,54}{0,41}$
82, 83	Восток Новгородской обл. . . . .	27	$\frac{2,66-2,69}{2,69}$	$\frac{2,11-2,26}{2,18}$	$\frac{1,77-2,00}{1,88}$	$\frac{21-34}{30}$	$\frac{0,27-0,52}{0,43}$
<i>Суглинки сильнопылеватые</i>							
63	Центр Ленинградской обл. . . . .	1199	$\frac{2,66-2,75}{2,71}$	$\frac{1,90-2,28}{2,10}$	$\frac{1,64-2,00}{1,75}$	$\frac{27-44}{35}$	$\frac{0,39-0,78}{0,54}$
73	Запад Ленинградской обл. . . . .	85	$\frac{2,69-2,75}{2,72}$	$\frac{2,02-2,11}{2,07}$	$\frac{1,62-1,87}{1,75}$	$\frac{29-37}{36}$	$\frac{0,41-0,58}{0,56}$
76, 77	Юг Ленинградской обл. . . . .	49	$\frac{2,66-2,77}{2,71}$	$\frac{2,00-2,22}{2,09}$	$\frac{1,66-2,01}{1,73}$	$\frac{29-37}{36}$	$\frac{0,40-0,59}{0,56}$
78, 79	Северо-восток Псковской обл. . . . .	7	$\frac{2,71-2,75}{2,73}$	$\frac{2,02-2,21}{2,06}$	$\frac{1,68-1,99}{1,75}$	$\frac{32-40}{36}$	$\frac{0,47-0,67}{0,56}$

нопылеватых суглинков — 2,06—2,10 г/см<sup>3</sup>. Участки, расположенные в центре Ленинградской области, где морена представлена суглинками, имеют объемный вес 2,21 г/см<sup>3</sup>. В том же районе суглинки сильнопылеватые характеризуются объемным весом 2,10 г/см<sup>3</sup> (см. табл. 19). В целом суглинистая морена отличается значительной плотностью.

Различная степень дисперсности, разнообразие условий залегания и гидрогеологической обстановки на отдельных участках обуславливают широкие пределы изменения значений естественной влажности. В среднем она невелика и составляет 11—21% (табл. 20). На контакте с водовмещающими породами влажность моренных отложений возрастает до 30—35%. Нередко влажность уменьшается с глубиной, хотя часто эти изменения незначительны и не сказываются на инженерно-геологической оценке моренной толщи в целом.

По данным наблюдений на опытных участках Северо-Западной гидрогеологической станции, проводимых Н. Г. Верейским и Е. А. Чекиной, изменения естественной влажности в зависимости от атмосферных осадков наиболее интенсивно проявляются на глубине до 0,25—0,5 м. Для моренной супеси на лесном участке (Елизаветино) изменение естественной влажности на глубине 0,25 м составило по месяцам от 9 до 25%, а на глубине 1 м — от 6 до 20%. Для суглинков на полевом участке (Тайцы) естественная влажность изменялась от 9—42% на глубине 0,25 м до 10—20% на глубине 0,75 м.

Моренные суглинки вмещают линзы водонасыщенных песков и часто служат водупором для перекрывающих и подстилающих их водоносных горизонтов. Следовательно, имеются благоприятные условия для насыщения суглинков водой. Действительно, в естественном залегании коэффициент насыщения моренных суглинков близок к единице.

В соответствии с высокими значениями объемного веса скелета пористость моренных суглинков в среднем по участкам невелика (26—36%), хотя и изменяется в довольно широких пределах внутри каждого из участков. Наибольшие значения пористости относятся к глинистым разностям, наименьшие — к легким суглинкам.

Моренные отложения имеют обычно полутвердую и тугопластичную консистенцию. Довольно часто встречаются твердые разности, реже мягкопластичные. Это отмечается как при визуальном описании, так и при сопоставлении величины естественной влажности и пределов пластичности. Для суглинистых отложений показатель консистенции варьирует от (—0,2) до (+0,4). Значения показателя консистенции, как следует из табл. 20, довольно постоянны для всех разностей суглинистой морены.

Моренные суглинки отличаются низкими значениями влажности на пределах текучести и раскатывания (см. табл. 20), что объясняется небольшим содержанием глинистых частиц в грунте, их гидрослюдыстым составом и преобладанием в составе поглощенного

Влажность и пластичность моренных суглинков

Номер участка	Район	Число опытных	Естественная влажность, %	Влажность на пределе, %		Число пластичности, %	Показатель консистенции, B
				текущая	раскатывания		
<i>Суглинки</i>							
36, 37	Юг Карелии . . . . .	5	15	20	13	7	0,2
			9-19	13-30	11-16	5-12	(-0,1)-0,3
60, 62, 64	Центр Ленинградской обл. . . . .	33	13	19	12	7	0,1
74	Юго-восток Ленинградской обл. . . . .	158	5-21	14-30	9-18	5-10	(-0,5)-0,6
			11	21	12	9	-0,1
78, 79	Юго-восток Псковской обл. . . . .	166	8-20	14-27	10-16	2-11	(-0,4)-0,6
			13	20	12	8	0,1
81	Северо-запад Новгородской обл. . . . .	7	8-16	19-32	12-21	3-14	(-0,4)-(-0,2)
			13	25	16	9	-0,3
84	Центр Новгородской обл. . . . .	29	9-14	16-26	11-15	5-13	(-0,5)-0,6
			12	22	13	9	-0,1
82, 83	Восток Новгородской обл. . . . .	33	11-17	16-23	11-13	6-10	0-0,7
			13	20	11	9	0,2
86-88	Север Белоруссии . . . . .	25	6-14	18-39	6-26	6-29	(-0,2)-0,3
			11	25	13	12	-0,2
<i>Суглинки пылеватые</i>							
58, 59	Центр Карельского перешейка . . . . .	4	15	26	14	12	0,1
56	Юго-восток Карелии . . . . .	31	8-18	13-30	11-17	6-16	(-0,5)-0,5
			14	26	15	11	-0,1

Номер участка	Район	Число опытных	Естественная влажность, %	Влажность на пределе, %		Число пластичности, %	Показатель консолидации, B
				текущие	раскаты-вания		
61, 62, 65-71	Центр Ленинградской обл. . . . .	223	7-24	15-39	10-20	7-17	(-0,4)-0,5
			16	26	14	12	0,2
			10-21	18-35	5-21	6-18	(-0,4)-0,6
			15	26	14	12	0,1
74	Юго-восток Ленинградской обл. . . . .	98	9-19	19-31	13-18	8-12	(-0,5)-0,4
			14	25	16	9	-0,2
78, 79	Северо-восток Псковской обл. . . . .	12	12-19	19-29	12-17	7-12	(-0,2)-0,5
82, 83	Восток Новгородской обл. . . . .	27	16	23	14	9	0,2
<b>Суглинки сильнопесчаные</b>							
63	Центр Ленинградской обл. . . . .	838	10-29	14-33	10-21	5-17	(-0,3)-(0,6)
			20	25	17	8	0,4
73	Запад Ленинградской обл. . . . .	104	12-26	17-29	13-20	6-17	(-0,2)-0,2
			18	24	17	7	0,1
76, 77	Юг Ленинградской обл. . . . .	86	10-39	15-44	10-25	6-19	(-0,3)-0,5
			21	28	17	11	0,4
78, 79	Северо-восток Псковской обл. . . . .	7	14-22	29-44	19-28	7-15	(-0,5)-0,2
			18	32	23	9	-0,4

комплекса Са и Mg. Пределы пластичности моренных отложений в общем соответствуют их гранулометрическому составу. Исключения составляют суглинки, обогащенные карбонатами.

Показатель коллоидной активности в среднем по участкам изменяется от 0,33 до 1,08, но значения, превышающие 0,75, редки. т. е. моренные суглинки, как правило, неактивны. Небольшая величина показателя коллоидной активности обусловлена незначительной емкостью поглощения и минеральным составом дисперсной части морены.

**Водные свойства.** Максимальной молекулярной влагоемкости принято характеризовать общее содержание рыхло и прочно связанной воды в породе.

Результаты исследований максимальной молекулярной влагоемкости, приведенные в табл. 21, показывают, что средние величины

Таблица 21

Максимальная молекулярная влагоемкость суглинков

Номер участка	Содержание, %		Естественная влажность, %	Влажность на пределе, %		Максимальная молекулярная влагоемкость, %		
	пыли (0,05—0,002 мм)	глины (<0,002 мм)		текущей	раскатывания	пределы изменения	среднее	число определений
63	57	18	22	25	17	9—18	12	46
73	53	15	18	23	17	9—19	12	59
74	37	23	15	22	13	6—16	11	60*

\* По В. Н. Новожилову, 1962.

ны максимальной молекулярной влагоемкости для разных участков одинаковы и составляют 11—12%. Необходимо отметить, что между максимальной молекулярной влагоемкостью и влажностью на пределе раскатывания существует различие в среднем на 2—5%, что соответствует относительной ошибке в 15—30%. Следовательно, максимальная молекулярная влагоемкость значительно ниже влажности на пределе раскатывания и для моренных суглинков не может отождествляться с последней.

Количество прочно связанной воды в породе характеризуется гигроскопической влажностью, содержание которой в морене района Ленинграда не достигает 1%. Количество рыхло связанной воды характеризуется разностью между максимальной молекулярной влагоемкостью и гигроскопической влажностью (т. е. 11%) Естественная влажность морены составляет около 22% и примерно равна полной влагоемкости грунта. Следовательно, на долю свободной влаги приходится 10%, т. е. 20—25% от общего количества воды.

Таким образом, основные виды воды в суглинках — рыхло связанная и свободная. Учитывая небольшое содержание глинистой фракции в породе и ее слабую физико-химическую активность, следует предположить, что пылеватые частицы также способны удерживать рыхло связанную воду. Только этим можно объяснить относительно высокую максимальную молекулярную влагоемкость в грунте (более половины от всей воды).

Моренные суглинки в воде ведут себя различно. Наиболее пылеватые разности размокают через 7—10 мин, тяжелые суглинки распадаются через 3—5 суток и более. Образцы моренных суглинков, прикрытые слоем песка, за то же время не размокли и сохранили свою форму, при этом их влажность за 20 суток увеличилась всего на 2—4%. Процесс размокания суглинистых разностей обычно протекает следующим образом. Первое время (1—4 ч) образец разрушается весьма незначительно, от него отпадают небольшие кусочки. Затем обычно через 1—2 суток разрушение образца начинает идти интенсивней и появляются трещины, по которым он целиком или частично распадается на крошки и кусочки остроугольной формы. Часто вода, в которой происходит размокание, мутнеет. Склонность моренных грунтов к размоканию явилась одной из причин оползания стенок при сооружении тоннелей ст. Автово (г. Ленинград) открытым способом [95].

Результаты опытов по определению набухания моренных суглинков в приборе А. М. Васильева приведены в табл. 22, из ко-

Таблица 22

Набухание моренных суглинков

Влажность до опыта, %	Влажность после опыта, %	Величина набухания, %	Содержание, %		Влажность, % на пределе		Максимальная молекулярная влагоемкость, %
			пыли (0,05—0,002 мм)	глины (<0,002 мм)	теку-честя	раска-тыва-ния	
—	—	Не набухает	56	23	26	17	13
12,8	19,3	3,9	64	19	27	17	13
—	—	Не набухает	53	21	25	16	13
16,1	17,1	0,28	61	19	24	16	12
—	—	Не набухает	64	26	31	20	—
17,3	19,3	2,9	60	20	25	17	—
16,8	18,9	2,6	58	22	28	18	—

торой видно, что набухание моренных суглинков происходит не одинаково, а величина его мала и достигает только в одном случае 4%. В трех случаях из семи набухание не было зарегистрировано. Приведенные данные показывают, что при одном и том же составе образцы обладают различной величиной набухания. Таким образом, моренные отложения характеризуются малой величиной набухания, что объясняется гидрослюдистым составом минералов глинистой фракции и низкой емкостью поглощения. С. С. Поля-

ков, отмечая несоответствие между величиной набухания и гранулометрическим составом моренных суглинков Московской области, считает, что эта величина зависит от емкости поглощения, которая определяется как гранулометрическим, так и минеральным составом [82].

Липкость моренных отложений изучалась на 11 образцах. Максимальная нагрузка отрыва в среднем равна  $196 \text{ Г/см}^2$  при пределах изменения  $99\text{—}286 \text{ Г/см}^2$ . Влажность, соответствующая этой нагрузке, составляет 21%, варьируя от 12 до 31%. При естественной влажности моренные суглинки характеризуются максимальной величиной отрыва  $180\text{—}220 \text{ Г/см}^2$ .

Величина максимальной нагрузки отрыва возрастает с увеличением пластичности образца. Так, при числе пластичности 3—4% она равна  $100\text{—}110 \text{ Г/см}^2$ , а при числе пластичности 10% достигает  $290 \text{ Г/см}^2$ . Максимальную липкость имеют суглинки с влажностью, близкой к влажности на пределе текучести, и с содержанием глинистых частиц более 25%.

Водопроницаемость моренных суглинков низка, она измеряется величинами порядка  $n \cdot 10^{-5} \text{ м/сутки}$ .

Исследование морозного пучения моренных суглинков района Нарвской ГЭС проводилось под руководством Б. И. Далматова. Было установлено, что под нагрузкой  $0,05 \text{ кг/см}^2$  суглинки оказались сильнопучинистыми (коэффициент пучения 5—10%). Неблагоприятное поведение суглинков в отношении морозного пучения вынудило заменить эти суглинки в откосах подводящего канала песчано-гравийным материалом на глубину 1 м от бетонной облицовки, т. е. в зоне колебания уровня воды.

Довольно любопытные результаты получили П. Д. Евдокимов и И. И. Заурбрей [34], исследовавшие влияние замораживания и оттаивания на сопротивление сдвигу моренных суглинков. Оказалось, что при нагрузке, равной или превышающей  $1 \text{ кг/см}^2$ , прочность образцов, которая уменьшилась в результате процессов замораживания — оттаивания, вновь восстанавливалась до первоначальной.

*Механические свойства.* Прочность моренных суглинков обусловлена их относительно высокой плотностью и сравнительно небольшой влажностью. Сопротивление сдвигу суглинистой морены определялось после предварительного уплотнения под нагрузками 1, 2 и 3  $\text{кг/см}^2$ . Эти же нагрузки передавались на образец в процессе опыта. Данные о прочности моренных отложений, помещенные в табл. 23, свидетельствуют о связи сопротивления сдвигу морены с гранулометрическим составом.

Моренные суглинки обладают различной, но в общем небольшой сжимаемостью. Осадки образцов в приборах протекают обычно плавно, что характерно для плотных пород. Форма компрессионных кривых для образцов разных участков одинакова, т. е. процесс сжатия суглинков, несмотря на некоторые различия состава и физических свойств образцов, имеет много общих черт, обуслов-



## Прочность моренных суглинков

Номер участка	Район	Число определений	$\tau$ $\Phi$	$\sigma$ , кг/см <sup>2</sup>
<i>Суглинки</i>				
36	Юг Карелии . . . . .	2	0,45—0,56	0,15—0,82
60	Центр Ленинградской обл. . . . .	3	0,34—0,55	0,40—0,75
			0,47	0,57
74	Юго-восток Ленинградской обл. . . . .	7	0,38—0,53	0,10—0,45
			0,47	0,23
85	Юго-восток Псковской обл. . . . .	32	0,31—0,70	0,04—0,41
			0,51	0,24
81	Северо-запад Новгородской обл. . . . .	4	0,29—0,61	0,28—0,66
			0,51	0,47
<i>Суглинки пылеватые</i>				
61, 62, 71	Центр Ленинградской обл. . . . .	41	0,40—0,56	0,05—0,53
			0,44	0,22
72	Восток Ленинградской обл. . . . .	7	0,30—0,45	0,10—0,41
			0,42	0,20
75	Юго-восток Ленинградской обл. . . . .	2	0,41	0,31
78, 79	Северо-восток Псковской обл. . . . .	2	0,42	0,28
82, 83	Восток Новгородской обл. . . . .	7	0,39—0,60	0,24—0,50
			0,44	0,34
<i>Суглинки сильнопылеватые</i>				
63	Центр Ленинградской обл. . . . .	251	0,32—0,60	0,10—0,56
			0,45	0,34
73	Запад Ленинградской обл. . . . .	30	0,30—0,46	0,02—0,18
			0,40	0,17

ленных идентичными условиями образования моренных суглинков региона.

Изменчивость состава и физических свойств моренных отложений находит свое выражение в широких пределах изменения модуля деформации и коэффициента сжимаемости (табл. 24). Судя по средним значениям коэффициента сжимаемости, суглинки относятся к средне- и слабосжимаемым.

Сжимаемость моренных отложений, определенная в лаборатории, превышает их сжимаемость в природном залегании. В 1934 г.

## Сжимаемость моренных суглинков

Номер участка	Район	Число определений	Коэффициент сжимаемости, $\frac{\text{см}^2}{\text{кг}}$ , в интервале нагрузок 1—2 $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	Модуль деформации, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$
<i>Суглинки</i>				
36	Юг Карелии . . . . .	4	$0,004—0,034$ $0,014$	$40—290$ $100$
60	Центр Ленинградской обл. . . . .	7	$0,002—0,014$ $0,006$	$100—370$ $240$
74, 75	Юго-восток Ленинградской обл. . . . .	24	$0,002—0,022$ $0,013$	$80—410$ $220$
85	Юго-восток Псковской обл. . . . .	29	$0,009—0,054$ $0,015$	$50—130$ $90$
81	Северо-запад Новгородской обл. . . . .	4	$0,004—0,008$ $0,007$	$150—330$ $190$
<i>Суглинки пылеватые</i>				
61, 62, 71	Центр Ленинградской обл. . . . .	13	$0,004—0,020$ $0,012$	$90—250$ $120$
82, 83	Восток Новгородской обл. . . . .	6	$0,011—0,018$ $0,014$	$70—120$ $100$
<i>Суглинки сильнопылеватые</i>				
63	Центр Ленинградской обл. . . . .	244	$0,003—0,045$ $0,014$	$80—450$ $130$
73	Запад Ленинградской обл. . . . .	16	$0,004—0,023$ $0,012$	$80—220$ $130$
76, 77	Юг Ленинградской обл. . . . .	13	$0,006—0,022$ $0,016$	$70—200$ $100$

под руководством Н. А. Цытовича в Ленинграде были проведены опыты квадратным жестким штампом площадью  $5000 \text{ см}^2$  на моренных отложениях, представленных глинами и тяжелыми суглинками. Соотношение величин модулей деформации, полученных полевых и лабораторных экспериментах, изменялось в пределах  $1,02—1,69$ , в среднем составляя  $1,3$ . По данным Л. И. Иванова, модуль деформации, полученный по результатам испытаний суглинков твердой консистенции, изменяется от  $176$  до  $286 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$  [42]. Такие же данные получены при исследовании твердых суглинков района г. Новгорода.

При нарушении естественного сложения образцов сжимаемость их увеличивается в 1,5—2,5 раза, иногда больше (рис. 5). По мере увеличения вертикальной нагрузки разность между коэффициентами пористости образцов нарушенного и ненарушенного сложения с одинаковой начальной влажностью и плотностью уменьшается. Это уменьшение идет тем быстрее, чем меньше влажность грунта и пределы пластичности, т. е. чем меньше его глинистость. Сближение кривых уплотнений образцов нарушенного и ненарушенного сложения с ростом давления отмечено для различных глинистых пород и объясняется уменьшением влияния природного сложения на их сжимаемость при увеличении вертикальной нагрузки.

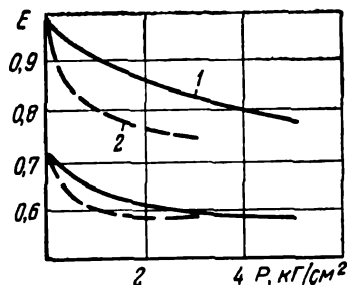


Рис. 5. Сжимаемость моренных суглинков естественного (1) и нарушенного (2) сложения.

Разуплотнение моренных пород в компрессионном приборе изучалось на 17 образцах. Породы уплотнялись до 6 или  $10 \text{ кг/см}^2$  и разгружались до нуля. Коэффициент пористости после освобождения пород от нагрузки во всех случаях оказался меньшим, чем начальный коэффициент пористости, что свидетельствует о преобладании остаточных деформаций в породе, которые в среднем в 1,5—2 раза больше упругих (последние изменялись от 1,1 до 2,7%, а остаточные деформации — от 1,6 до 4,7%). Таким образом, основным видом деформаций при уплотнении моренных суглинков в пределах нагрузок до  $10 \text{ кг/см}^2$  являются структурные деформации. Величина набухания, определенная по отношению к высоте образца после уплотнения, невелика и изменяется от 1,3 до 2,5%, составляя в среднем 2%, и не зависит от того, как разуплотнялась порода — сразу или ступенями.

#### Физико-механические свойства песчаной и супесчаной морены.

**Физические свойства.** Результаты исследования гранулометрического состава моренных супесей и песков указывают на их большое сходство. Поэтому и в физических свойствах супесчаной и песчаной морен нет существенных различий. Так, объемный вес супесей изменяется от 2,04 до  $2,31 \text{ г/см}^3$ , песков — от 2,00 до  $2,32 \text{ г/см}^3$ , а влажность соответственно 8—17 и 8—16% (табл. 25). Обе разности моренных отложений в целом характеризуются высокой плотностью и низкой пористостью. Супеси чаще всего находятся в твердом состоянии.

В связи со значительной плотностью водопроницаемость морены ничтожна, она оценивается коэффициентом фильтрации порядка 0,01—0,10 м/сутки для супесей и 0,05—0,25 м/сутки для песков. Низкая фильтрационная способность морены обуславливает образование поверхностных сплывов на склонах и откосах при воздействии гидродинамического давления на пески и супеси.

Показатели физических свойств и состояния моренных супесей и песков

Номер участка	Район	Число определений	Удельный вес, $g/cm^3$	Объемный вес, $g/cm^3$	Объемный вес скелета, $g/cm^3$	Пористость, %	Коэффициент пористости	Влажность, %			Число пластичности, %	Показатель консистенции В
								свободная	на пределе текучести	раскатывающаяся		
78, 79	Северо-восток Псковской обл. . . . .	20	2,60—2,70	2,04—2,24	1,79—2,09	23—36	0,30—0,56	8—15	12—24	8—16	4—7	(-0,5)—0
			2,68	2,15	1,94	28	0,39	11	19	13	6	-0,3
85	Юго-восток Псковской обл. . . . .	13	2,70	2,03—2,31	1,74—2,12	22—36	0,28—0,56	9—17	17—21	12—19	2—7	-1,0
			2,70	2,16	1,94	28	0,39	11	17	14	3	0—0,8
80	Северо-запад Псковской обл. . . . .	16	2,65—2,67	2,14—2,28	1,86—2,03	23—30	0,30—0,56	11—15	14—19	10—14	2—7	0—0,8
			2,67	2,23	1,97	26	0,35	13	16	11	5	0,4
81	Северо-запад Новгородской обл. . . . .	15	2,67—2,73	2,12—2,30	1,92—2,09	22—28	0,28—0,39	8—13	14—20	12—16	2—7	-0,4
			2,69	2,24	2,02	25	0,33	11	18	13	5	-0,4
86—88	Север Белоруссии . . . . .	29	2,64—2,76	2,01—2,30	1,70—2,00	23—38	0,30—0,61	10—19	17—30	11—22	2—7	(-0,1)—0,8
			2,70	2,10	1,81	33	0,49	16	20	15	5	0,2
<i>Супесчаная морена</i>												
<i>Песчаная морена</i>												
78, 79	Северо-восток Псковской обл. . . . .	1	2,67	2,21	1,92	28	0,39	15	-	-	-	-
			2,67	2,21	1,92	28	0,39	15	-	-	-	-
80	Северо-запад Псковской обл. . . . .	51	2,57—2,73	2,00—2,30	1,79—2,09	22—41	0,29—0,69	8—16	-	-	-	-
			2,65	2,16	1,97	26	0,35	10	-	-	-	-
81	Северо-запад Новгородской обл. . . . .	11	2,66—2,74	2,17—2,32	1,88—2,04	22—31	0,29—0,45	9—15	-	-	-	-
			2,71	2,23	2,01	26	0,35	11	-	-	-	-

**Механические свойства.** Прочностные и деформативные характеристики песков и супесей определяются прежде всего их высокой плотностью и присутствием в гранулометрическом составе частиц всех размеров.

Лабораторные опыты, выполненные на образцах ненарушенного сложения, подтверждают этот вывод (табл. 26).

Таблица 26

**Сопrotивление сдвигу и сжимаемость моренных супесей и песков**

Номер участка	Район	Число определений	$\lg \varphi$	$c, \text{ кг/см}^2$	Коэффициент сжимаемости, $\text{см}^2/\text{кг}$ , в интервале нагрузок $1-2 \text{ кг/см}^2$	Модуль деформации, $\text{кг/см}^2$
<i>Супесчаная морена</i>						
81	Северо-запад Новгородской обл. . . .	13	$0,47-0,90$	$0,14-0,51$	$0,002-0,017$	$80-400$
			$0,65$	$0,36$	$0,006$	$230$
<i>Песчаная морена</i>						
81	Северо-запад Новгородской обл. . . .	27	$0,58-1,0$	$0,0-0,40$	$0,004-0,022$	$60-330$
			$0,75$	$0,13$	$0,008$	$170$

При рассмотрении приведенных в табл. 26 данных следует иметь в виду, что высокие значения коэффициента внутреннего трения песков и сцепления супесей и песков являются следствием заклинки зерен и крупного песка в щели срезного прибора. Можно полагать, что при небольшом содержании глинистых частиц сцепление супесей и пылевато-глинистых песков должно составлять  $0,05-0,15 \text{ кг/см}^2$ , а коэффициент внутреннего трения — около 0,65.

Значительная плотность песков и супесей обуславливает их низкую сжимаемость — модуль деформации моренных отложений по лабораторным данным составляет в среднем  $170-230 \text{ кг/см}^2$ . В то же время прослои и линзы более глинистого материала приводят к снижению модуля деформации по отношению к его среднему значению в 2—3 раза (см. табл. 26). По результатам полевых опытов модуль деформации пылеватых песков составляет  $350-400 \text{ кг/см}^2$ , супесей —  $260-520 \text{ кг/см}^2$ .

**Глава IV**

**РЕГИОН ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ  
(БЕЛОРУССИЯ ЮЖНЕЕ ГРАНИЦЫ ПОСЛЕДНЕГО ОЛЕДЕНЕНИЯ)**

Рассматриваемый регион занимает всю территорию Белоруссии южнее границы последнего оледенения. Моренные отложения со-

ставляют здесь около 80% территории и залегают практически повсеместно вблизи дневной поверхности, за исключением полесий, где широко развиты зандровые водно-ледниковые отложения. В пределах Днепровско-Донецкой впадины выделяются окская, днепровская и московская морены. Условия залегания, состав и свойства морен рассматриваются по трем областям, выделенным по геоморфологическому признаку. Это области моренной равнины, моренной возвышенности и полесий [32, 98].

Отложения окского оледенения, представленные плотными суглинками серого, темно-серого и темно-коричневого цвета с включениями валунов, встречаются почти везде на глубине 60—100 м и более. Лишь в районе Гродно эти отложения в долине р. Неман выходят на поверхность [114]. Мощность окской морены различна и изменяется от единиц до десятков метров, а на смежной территории Польши (г. Белосток) достигает 50—75 м. Морена залегают в виде двух в достаточной степени выдержанных горизонтов, разделяемых водно-ледниковыми песчаными отложениями. Окская морена обычно подстилается известняками мелового периода, заполняя углубления в их кровле, и обогащена карбонатным материалом.

Наибольший интерес для инженерно-геологического изучения представляют моренные отложения днепровского и московского оледенений.

Морена днепровского оледенения широко развита в пределах всего региона и перекрывается до северной границы области полесий мореной московского оледенения. Лишь в долинах рек Днепра, Друти, Прони, Свислочи и их притоков, там, где последняя размыта, обнажаются отложения днепровского оледенения. В пределах области моренной равнины днепровская морена залегают обычно на меловых породах, а в районе Оршанско-Могилевского плато — на породах девона на глубинах от 1—10 м (города Дрибин, Славгород, Корма, Чечерск, восточная часть Центрально-Березинской равнины) до 30—80 м (южные отроги Смоленско-Московской возвышенности, Оршанская возвышенность и др.). Мощность морены в этих районах крайне изменчива и варьирует от 1—10 м (Дрибинско-Славгородская равнина) до 70 м и более (Оршанская возвышенность).

В области моренной возвышенности днепровская морена лежит на известняково-мергелистой толще верхнего девона, меловых и песчаных породах верхнего мела, местами на кварц-глауконитовых песках палеогена. Северо-западнее г. Молодечно в основании морены залегают песчаники и серые глины нижнего кембрия. Мощность днепровской морены в этом районе крайне неравномерна и изменяется от 1 до 70 м, так же резко изменяются и глубины залегания, составляющие в зависимости от рельефа 3—100 м.

В области полесий днепровская морена является, как правило единственным моренным горизонтом. Она подстилается почти по-

всеместно кварц-глауконитовыми песками и пестроцветными глинами третичной системы. По долинам рек Днепра, Сожа, Припяти и их притоков днепровская морена выходит на дневную поверхность. Мощность морены относительно выдержана, составляя в среднем 10—15 м, и лишь в районе Мозырской конечноморенной гряды достигает 20—50 м. Наибольшая глубина залегания отмечается в районе Брестского полевья (16—20 м), где морена перекрыта толщей зандровых песков.

Отложения московской морены также имеют широкое развитие на всей территории, за исключением Приднепровской низменности, где морена сохранилась в виде отдельных пятен (города Лоев, Рогачев, Жлобин, Будо-Кошелево и др.).

В области моренной равнины московская морена отсутствует лишь южнее линии Кричев — Славгород — Рогачев. В этой области она перекрыта толщей элювиально-делювиальных лёссовидных суглинков. Мощность морены, как правило, превышает 20 м, уменьшаясь до 10—15 м к долинам рек.

В пределах области моренной возвышенности московская морена слагает основные формы рельефа, в том числе все возвышенности (Минскую, Новгородскую, Грозненскую) и гряды (Ошмянскую, Копыльскую), и всюду выходит на дневную поверхность. Мощность морены достигает 100 м и более.

*Гранулометрический состав.* Гранулометрический состав морены весьма разнообразен и изменяется от валуников до глин. Однако наиболее часто встречаются супеси и суглинки, а в южной части региона — пылевато-глинистые пески. В целом можно отметить увеличение содержания песчаных фракций к южным границам оледенений и определенные различия в составе основных и конечных морен. В особую группу выделяются так называемые «местные» морены, почти целиком состоящие из переработанных пород ложа. К последним относится меловая морена районов Кричева, Бреста и ряда других мест. В составе валунов основной морены местные и эратические валуны встречаются одинаково часто, в конечной морене преобладают эратические валуны. В табл. 27 приведены результаты анализов гранулометрического состава морены, сгруппированные по основным областям. Следует отметить, что внутри каждой из областей различия в гранулометрическом составе морен одного и того же литологического состава несущественны. Как видно из табл. 27, все разновидности имеют весьма близкий средний гранулометрический состав. Для конечных морен отмечается несколько более широкий диапазон изменения содержания песчаных фракций, чем для основных морен, средний же состав их существенно не отличается. Обращает внимание постоянство содержания пылеватых фракций.

Предварительная обработка проб карбонатных морен соляной кислотой приводит к интенсивной коагуляции и разрушению карбонатных агрегатов. Обработка аммиаком практически не сказывается на результате анализа. Е. Ф. Винокуровым установле-

## Гранулометрический состав морен Белоруссии

Номер участка	Район	Число опре-делений	Гранулометрический состав, % (размеры частиц, мм)								
			песчаных (2—0,05)		пылеватых (0,05—0,005)		глинистых (<0,005)				
			от	до	от	до	от	до			
<b>Днепровская морена</b>											
<i>Пески</i>											
93—95 100—102	Полесье, основная морена . . . . .	106	37	98	58	1	63	39	1	11	3
<i>Супеси</i>											
96, 103—105 97	Полесье, основная морена . . . . .	48	23	88	64	10	77	28	2	18	8
	Полесье, конечная морена . . . . .	57	51	57	55	15	40	30	6	28	15
<i>Суглинки</i>											
69, 73 75—80	Моренная возвышенность, основная морена	16	21	70	50	21	25	23	9	54	27
<b>Московская морена</b>											
<i>Супеси</i>											
84—92 72—83 98—102	Моренная равнина, основная морена . . . . .	38	53	78	66	15	39	26	6	10	8
	Моренная возвышенность, основная морена	59	20	68	57	26	56	34	5	24	9
	Моренная возвышенность, конечная морена	24	10	80	57	14	62	33	5	15	10
<i>Суглинки</i>											
104—112 98—102	Моренная равнина, основная морена . . . . .	19	12	63	38	20	54	34	15	58	28
	Моренная возвышенность, конечная морена	15	1	70	40	18	56	33	11	71	27



но, что выход глинистых частиц в зависимости от способа подготовки пробы изменяется в 5—6 раз для суглинков и в 1,5—2 раза для супесей [19].

Коэффициент сортировки частиц уменьшается с возрастом морен: для морены валдайского оледенения он составляет 3,7; московского — 3,6; днепровского — 3,4 и окского — 3,3; за коэффициент сортировки принят корень квадратный из отношения третьей квартили к первой.

Валуны, галька и гравий изверженных, метаморфических и осадочных пород распределены чрезвычайно неравномерно. Необходимо отметить, что в пределах Белоруссии морена московского и днепровского оледенений гораздо беднее крупными включениями, чем морена последнего оледенения. Е. Ф. Винокуров подразделяет морену Белоруссии на породы, содержащие до 15% и более 15% крупных включений [19]. По нашим подсчетам, количество крупных включений в морене московского оледенения достигает 18% при среднем содержании 5—10%. Нановысшее содержание приурочено к конечноморенным отложениям: в районе г. Смоленичи — 18%, в районе г. Лепеля — 14%. В днепровской морене содержится в среднем 3—4% гравия, гальки и валунов, причем наибольшее содержание отмечается в районе Мозырской гряды (13%). Очень часто в пробе встречается не более 1% крупных включений. В районе Славгорода (область моренной равнины) скопления валунов московского ледника размерами более 1 м образуют залежи мощностью до 3—4 м, в днепровской морене на глубине более 60 м встречен слой гранитных валунов мощностью около 12 м (г. Полоцк). В районе г. Кричева московская морена обогащена обломками и глыбами известняка и мела.

*Текстура, структура, петрографический и минеральный состав.* Для моренных отложений характерна беспорядочная гнездовая текстура. В московской морене отмечается слабая рассланцованность. Для днепровской морены области полесий характерны горизонтальная слабо выраженная слоистость и ясная плитчатость.

Минеральный состав морен довольно однообразен. В нем выделяются три основные группы минералов: 1) остаточные (реликтовые) минералы материнской породы, подвергшиеся выветриванию и переотложению, — кварц, полевые шпаты, слюды, тяжелые минералы, сосредоточенные преимущественно в песчаной и пылеватой фракциях; 2) глинистые минералы: гидрослюда (иллит), каолинит, монтмориллонит, галлуазит и др.; 3) сингенетические минералы, возникшие в породе в процессе выветривания и диагенеза, как, например, окислы и гидроокислы железа, опал и др. Обломочный материал представлен преимущественно изверженными кислыми, метаморфическими и карбонатными породами (2—3%), а также отдельными минералами: кварцем (80—85%), полевым шпатом (~10%), карбонатами (3—5%), биотитом (1—2%), глаукоцитом и аксессуарными минералами (около 1%). В составе песчано-пылеватых фракций из легких минералов преобладают

кварц (71—88%) и полевые шпаты (8—26%), из тяжелых минералов — рудные (16—29%), роговая обманка (11—33%), гранаты (7—19%) и циркон (2—17%) [55, 62 и др.].

А. И. Коптев [55] установил интересную закономерность — увеличение коэффициента выветрелости (отношение устойчивых минералов к неустойчивым) в направлении от центра оледенения к его южным границам и по вертикали (сверху вниз при приближении к коренным породам). Этот коэффициент для моренных отложений района Березины, по подсчетам А. В. Матвеева, для валдайской морены равен 6,7, для московской и днепровской морен — 6,8 и для окской морены — 9,0—10,2. Для этого же района коэффициент влияния местных коренных пород (отношение содержания роговой обманки и граната к дистену, ставролиту и силлиманиту) составляет для валдайской морены 41; для московской — 24,7, для днепровской — 19,6, для окской морены верхнего слоя — 17,6, а нижнего — 26.

В соответствии с минеральным составом находится и химический состав морен, в котором существенно преобладают кремнезем (48—80%), окислы алюминия (7—20%), окислы кальция (1—16%) и железа (2—12%) [19]. Результаты обработки 57 анализов валовых проб химического состава морен Белоруссии сопредельных территорий хорошо увязываются между собой (табл. 28).

Таблица 28

Химический состав моренных отложений

Район	Содержание, %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	П. п. п.
Белоруссия, московская морена	63,8	11,6	5,3	6,9	2,6	0,3	7,7
Белоруссия, днепровская морена	65,5	10,9	4,0	7,1	2,3	0,3	8,0
Русская платформа [71]	69,1	11,8	5,2	3,0	1,1	0,2	5,4
Центральная Польша [127]	73—77	5—11	1,5— 1,8	1,3— 7,0	1,5— 2,0	—	—
Средний состав четвертичных глин Русской платформы [18]	59,6	13,5	6,0	4,9	3,1	0,0	4,3

Е. Ф. Винокуровым, К. И. Лукашевым и др. установлена тесная взаимосвязь между содержанием глинистых частиц и кремнезема [19, 62]. Минеральный и химический состав характеризует морены как породы с низкой коллоидной активностью.

*Физические свойства.* Удельный вес морены московского и днепровского оледенений весьма устойчив. Для супесей и суглинков он изменяется от 2,56 до 2,76 г/см<sup>3</sup>, составляя в среднем 2,68—2,70 г/см<sup>3</sup>, а для песков — от 2,59 до 2,73 г/см<sup>3</sup> при среднем значении 2,66—2,68 г/см<sup>3</sup> (табл. 29).

Объемные веса супесей и суглинков изменяются для московской морены в среднем от 2,11 до 2,14 г/см<sup>3</sup>, для днепровской морены, изученной там, где она является верхним горизонтом, от 1,99 до 2,08 г/см<sup>3</sup>. Песчаная морена имеет объемный вес 1,70—2,30 г/см<sup>3</sup> при среднем значении 2,10 г/см<sup>3</sup>.

Естественная влажность варьирует в довольно широких пределах, однако чаще всего от 10 до 15%. Средние же значения естественной влажности как по отдельным участкам, так и по различным областям удивительно постоянны. Влажность моренных суглинков по вертикали изменяется незначительно. До глубины 1—2 м она составляет около 12%, ниже — 8—10%.

В соответствии с плотностью морены находится и ее пористость, составляющая в среднем 29—33%. Из табл. 29 видно, что значения пористости конечных морен характеризуются существенно большей изменчивостью.

Минеральный состав глинистых фракций обуславливает низкие значения влажности на границе текучести и раскатывания (табл. 30). Число пластичности, как правило, получается меньше, чем следовало бы ожидать для соответствующего количества глинистых частиц. В целом числа пластичности, соответствующие супесям, приходится на образцы с содержанием глинистой фракции 8—15%. Коэффициент коллоидной активности составляет 0,4—0,7 и лишь в 5 из 85 случаев превысил единицу.

Как показал Е. Ф. Винокуров, при определении пластичных свойств моренной супеси из одной и той же пробы могут быть получены относительные расхождения в определении предела текучести — 8,6%, предела раскатывания — 12,3% и числа пластичности — 155,5% [19]. Особенно большие ошибки в определении этих показателей отмечаются для переходных разностей от супесей к пылеватым пескам, где иногда не удается получить влажность на границе раскатывания. Показатель консистенции варьирует от значений меньше нуля до 0,6 и лишь в единичных случаях до 1,0. В среднем этот показатель изменяется от минут 0,4 до нуля.

Обычно морена региона имеет твердую и тугопластичную консистенцию и чрезвычайно редко — мягкопластичную и текучую.

Показатель уплотненности (по В. А. Приклонскому) составляет в основном 0,5—1,0, т. е. супеси и суглинки имеют уплотненное состояние. Очень часто этот показатель превышает единицу, что соответствует переуплотненному состоянию, и лишь в единичных случаях (города Могилев, Быхов, Лида, Кореличи, Гродно) он имеет отрицательное значение, отвечающее недоуплотненному состоянию. В среднем значение показателя уплотненности для супесей московской морены составляет ~0,4; для днепровской ~0,8. Конечные морены имеют как наиболее высокие значения показателя уплотненности, так и наиболее низкие по сравнению с основными моренами. Между показателем уплотненности и коэффициентом пористости существует определенная зависимость.

## Физические свойства морен Белоруссии

Номер участка	Район	Число определенных	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемная вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес скелета, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент пористости
Днепровская морена							
<i>Пески</i>							
113—115 120—122	Полесье, основная морена . . . . .	386	$\frac{2,59-2,73}{2,68}$	$\frac{1,70-2,30}{2,10}$	$\frac{1,74-2,04}{1,90}$	$\frac{22-40}{29}$	$\frac{0,28-0,67}{0,41}$
<i>Супеси</i>							
117	Полесье, конечная морена . . . . .	96	$\frac{2,59-2,73}{2,68}$	$\frac{1,94-2,23}{2,08}$	$\frac{1,70-1,97}{1,85}$	$\frac{23-38}{31}$	$\frac{0,30-0,62}{0,45}$
<i>Суглинки</i>							
89, 93, 95—100	Моренная возвышенность, основная морена	16	$\frac{2,66-2,75}{2,70}$	$\frac{1,97-2,01}{1,99}$	$\frac{1,65-1,91}{1,80}$	$\frac{30-34}{33}$	$\frac{0,43-0,52}{0,49}$
Московская морена							
<i>Супеси и суглинки</i>							
104—112	Моренная равнина, основная морена . . . . .	123	$\frac{2,64-2,76}{2,70}$	$\frac{1,68-2,24}{2,11}$	$\frac{1,73-2,01}{1,89}$	$\frac{25-42}{30}$	$\frac{0,33-0,73}{0,43}$
89—103	Моренная возвышенность, основная морена	61	$\frac{2,65-2,73}{2,70}$	$\frac{1,81-2,31}{2,14}$	$\frac{1,78-2,02}{1,91}$	$\frac{23-35}{29}$	$\frac{0,30-0,54}{0,41}$
98—103	Моренная возвышенность, конечная морена	94	$\frac{2,56-2,72}{2,69}$	$\frac{1,41-2,30}{2,12}$	$\frac{1,71-1,96}{1,88}$	$\frac{18-44}{30}$	$\frac{0,22-0,78}{0,43}$

## Влажность и пластинные свойства морен Белоруссии

Номер участка	Район	Число опре- делений	Естественная влажность, %	Влажность на пределе, %		Число пластичности, %	Показатель консистенции, $B$
				текучести	раскатывания		
Днепровская морена							
Сулеси							
116, 123, 125	Полесье, основная морена . . . . .	160	6—22	13—31	8—22	1—14	$(-2,0) - 0,6$
117	Полесье, конечная морена . . . . .	80	8—20	13—42	10—23	5	-0,4
			12	19		3—18	$(-0,2) - 0,6$
			12	19	13	6	-0,2
Суглилки							
89, 93, 95—100	Моренная возвышенность, основная морена	15	9—10	26	14	12	-0,3
			10				
Московская морена							
Сулеси							
104—112	Моренная равнина, основная морена . . . . .	50	8—30	13—42	10—22	1—7	$(-1,0) - 1,0$
92—103	Моренная возвышенность, основная морена	22	9—20	15—26	11—17	4	-0,2
98, 102	Моренная возвышенность, конечная морена	42	4—29	12—43	10—28	2—11	$(-1,0) - 0,5$
			12	17	13	4	-0,2
			12	17	12	1—12	$(-1,0) - 0,5$
			12	17	12	5	0
Суглилки							
104—112	Моренная равнина, основная морена . . . . .	19	8—29	17—46	10—26	7—20	$(-0,3) - 0,4$
98, 102	Моренная возвышенность, конечная морена	15	4—31	18—55	14—33	10	-0,1
			12	23	13	8—22	$(-0,8) - 0,3$
			12	26	15	11	-0,3

**Водные свойства.** Моренным супесям и суглинкам присущи слабая водопроницаемость и низкая водоотдача. Коэффициент фильтрации для пылеватых песков (г. Гомель) составляет  $8 \cdot 10^{-4}$ — $6 \cdot 10^{-6}$  см/сек; для песков (г. Мозырь) —  $9 \cdot 10^{-3}$  см/сек; для супесей (в этом же районе) —  $8 \cdot 10^{-5}$  см/сек; для супесей (г. Васильевичи) —  $2 \cdot 10^{-5}$ — $3 \cdot 10^{-8}$  см/сек.

Среди морен региона часто встречаются прослои и линзы песков от мелко- до крупнозернистых, галечников и валунов, обладающие высокой водообильностью. Грунтовые воды таких линз как правило, являются напорными.

При определении водопроницаемости опытными наливками в шурфах и скважинах фильтрация быстро (в течение 3—4 ч) снижается в результате оплывания пор, вызванного легкой размокаемостью морены.

Таблица 31

Параметры прочности моренных супесей и суглинков

Номер участка	Район	Консистенция	Число определений	tg φ	c, кг/см <sup>2</sup>
---------------	-------	--------------	-------------------	------	-----------------------

Днепровская морена

*Супеси*

116	г. Светлогорск	Твердая	29	$0,40-0,51$ $0,47$	$0,11-0,23$ $0,15$
113	г. Гомель	»	4	$0,49-0,63$ $0,58$	$0,04-0,12$ $0,08$
117	г. Мозырь	»	10	$0,58-0,70$ $0,63$	$0,01-0,02$ $0,02$
114	пос. Костюковка	Пластичная	20	$0,37-0,49$ $0,45$	$0,10-0,15$ $0,12$
113	г. Гомель	»	4	$0,35-0,38$ $0,36$	$0,08-0,15$ $0,10$

Московская морена

*Супеси и суглинки*

108	г. Могилев	Твердая	6	$0,58-0,65$ $0,62$	$0,12-0,30$ $0,20$
112	г. Бобруйск	»	1	$0,65$	$0,10$
97	г. Гродно	Тугопластичная, твердая	23	$0,55-0,87$ $0,63$	$0,10-0,50$ $0,32$

Максимальная молекулярная влагоемкость, определенная по методу А. Ф. Лебедева, для супесей равна 7—17%, для суглинков 9—19%. Гигроскопическая влажность изменяется в пределах 1—8%, максимальная гигроскопичность 1—10%, высота капиллярного поднятия — 1,5—3,0 м.

По данным Ю. А. Соболевского, влияние осушительных каналов на снижение уровня воды в моренных породах сказывается на расстоянии до 200 м, уклоны откосов при длительном замачивании составляют от 0,01 до 0,50, чаще 0,2—0,3.

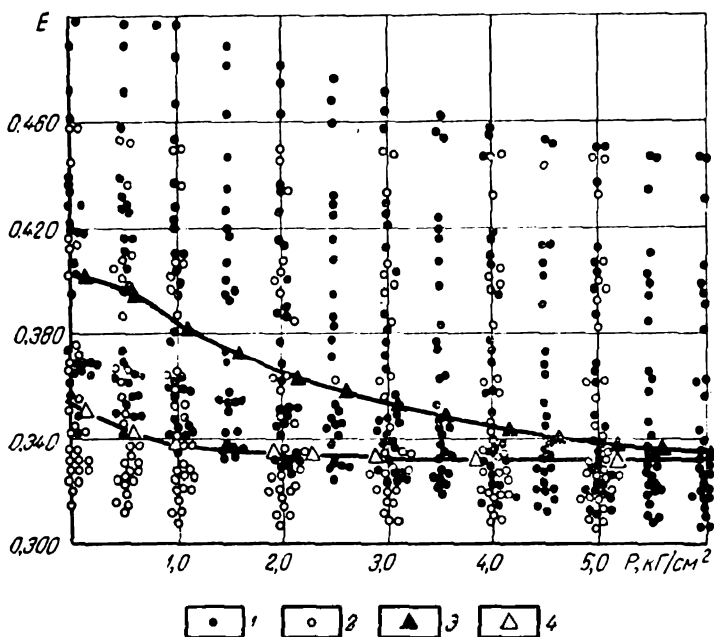


Рис. 6. Сжимаемость моренных супесей Белоруссии (г. Светлогорск)  
 1 — частные значения кривой нагрузки; 2 — частные значения кривой разгрузки;  
 3, 4 — средние значения соответственно кривых нагрузки и разгрузки

При строительном водопонижении в моренах ввиду слабой водоотдачи последних и глинизации приемной части иглофильтров возникают существенные трудности.

**Механические свойства.** Испытания суглинков и супесей на сдвиг без предварительного уплотнения показывают, что значения углов внутреннего трения и сцепление изменяются в широких пределах, причем сопротивление сдвигу почти не зависит от влажности и коэффициента пористости в плоскости среза. Отношение влажности в плоскости среза до и после сдвига составляет обычно 1,02—1,11. Значения параметров прочности при продолжительном воздействии на образец сдвигающей нагрузки оказываются меньшими, чем при быстром сдвиге [20]. Результаты испытаний на

сдвиг по методике быстрого сдвига без предварительного уплотнения приведены в табл. 31.

Деформативные свойства моренных отложений изучались лабораторными и полевыми методами. Компрессионные испытания супесей твердой консистенции районов Гомеля и Светлогорска (48 испытаний) дали коэффициенты сжимаемости от 0,004 до 0,015  $\text{см}^2/\text{кг}$ , что соответствует значениям модуля деформации от 100 до 260  $\text{кг}/\text{см}^2$ . Следует отметить, что отношение максимального значения модуля деформации к минимальному даже в пределах небольшой площадки составляет 2,4—3,7.

Разница между коэффициентами пористости до опыта и после разгрузки составляет от 0,014 до 0,079, в среднем — 0,046, что свидетельствует о незначительном уменьшении пористости при относительном смещении частиц скелета за счет сдвигов (рис. 6).

По результатам испытаний штампами модуль деформации зависит от консистенции и составляет для твердых супесей 250—700  $\text{кг}/\text{см}^2$ , для пластичных супесей 80—280  $\text{кг}/\text{см}^2$ , для суглинков твердой консистенции 400—600  $\text{кг}/\text{см}^2$ , для полутвердых и тугопластичных суглинков 120—300  $\text{кг}/\text{см}^2$ . Исследование штампами площадью 600  $\text{см}^2$  пылеватых песков района Гомеля показывает, что в зависимости от интервала давлений модуль деформации изменяется от 100 до 500  $\text{кг}/\text{см}^2$ .



## ЧАСТЬ ВТОРАЯ

# ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

### Глава V

#### МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Текстурная неоднородность моренной толщи, присутствие в составе морены большого количества крупнообломочных включений определяют особенности инженерно-геологического изучения моренных отложений, основные из которых рассматриваются ниже.

*Изучение условий залегания.* Характерной чертой моренных отложений является резкое изменение ее мощности и отметок кровли на небольших расстояниях, а также наличие линз и прослоев, отличных по составу от основной породы. Нередко в толще плотных моренных суглинков и супесей встречаются так называемые «слабые морены», т. е. породы, находящиеся в пльвунном, мягкопластичном и даже в текучем состоянии. Такие морены изредка встречаются в Белоруссии, Архангельской, Ленинградской областях и в других районах. На участке Плявинской ГЭС в моренных суглинках была вскрыта линза супеси, которая под влиянием гидростатического давления приобретала пльвунные свойства, препятствуя строительным работам. При проходке подобных линз скважинами возникали трудности, связанные с образованием пробок мощностью 6—10 м [39].

Основными методами изучения условий залегания и строения моренной толщи являются бурение скважин и проходка шурфов. При этом часть скважин при встрече с крупными валунами не достигает проектных отметок, что приводит к увеличению объемов разведочных работ. Изменчивость положения кровли моренных отложений и их неравномерная мощность нередко вынуждают проводить дополнительные работы. Из рис. 7 видно, что в зависимости от расстояния между скважинами изображение профиля может быть различным.

В последнее время широкое развитие получило вибробурение, которое успешно применяется при проходке моренных отложений, имеющих небольшое количество крупных включений. Следует отметить, что при отборе монолитов из виброзондов нарушение ес-

тественного сложения моренных пород происходит в меньшей степени, чем, например, в ленточных или лёссовидных породах. Экспериментально установлено, что разница объемных весов, определенных по монолитам, которые отбирались виброндом и из шурфов, обычно не превышает  $0,02-0,03 \text{ г/см}^3$ , а значений естест-

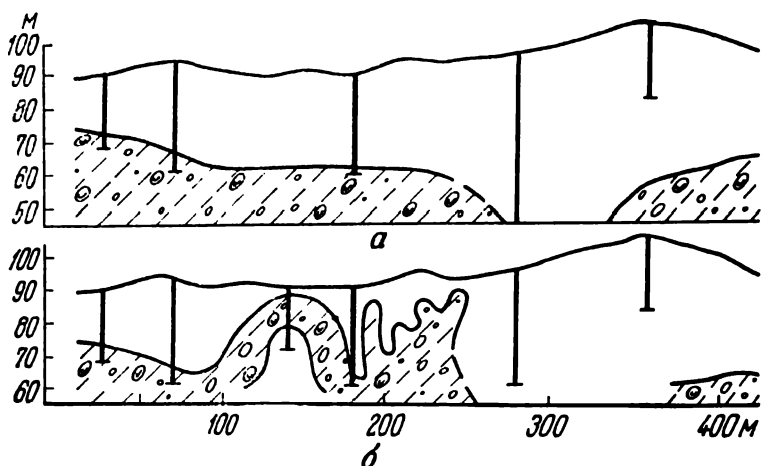


Рис. 7. Изображение разреза моренных отложений по данным бурения (а) и по результатам дополнительного бурения и зарисовки котлована (б). По А. В. Румянцевой

венной влажности —  $1-3\%$ , что вполне допустимо [89]. Расхождения в физических свойствах образцов моренных суглинков района Архангельска, отобранных виброндом и забивным грунтоносом, находятся в пределах естественного рассеяния значений этих показателей.

Специфические условия залегания донной и конечной морен, часто создающих основные формы рельефа, позволяют успешно применять методы аэрофотосъемки для картирования этих образований. Именно основная и конечная морены Ярославской области и Литвы послужили примером дешифрирования аэрофотосъемок четвертичных отложений. В настоящее время установлены достаточно детальные признаки для дешифрирования отложений основной морены [96].

Весьма перспективным является изучение условий залегания и строения моренной толщи методами геофизики, статического и динамического зондирования.

Из геофизических методов широко развита сейсмо- и электроразведка. О. К. Воронков и Т. В. Игунина установили, что для морены Мурманской области и Карелии характерен положительный вертикальный градиент скорости порядка  $100-270 \text{ сек}^{-1}$ . Указанная особенность морены наряду с полимодальным распределением средней скорости продольных волн и относительно высокими

значениями математического ожидания этой величины позволяет уверенно выделять морену среди других генетических типов пород. Сейсморазведочные работы в бассейне р. Иксы (Архангельская обл.) также показали, что мореным суглинкам свойственны высокие значения скоростей продольных волн (1800—2100 м/сек и более). Однако, если в морене содержится много крупных включений и она залегает на разрушенных скальных породах, то провести границу между последними и мореной с помощью только геофизических методов не удается. Часто подошва моренных отложений хорошо фиксируется с помощью электропрофилеирования. Удельное сопротивление суглинистой морены в Архангельской области по результатам 156 замеров составляет 100—180 ом·м. По данным Р. С. Зиангирова, удельная электропроводимость моренных суглинков равна  $1,7 \cdot 10^{-4}$  ом·см [40].

Динамическое и статическое зондирование, сопровождающее бурение опорных скважин, позволяет достаточно точно выявить положение моренных отложений в разрезе и характеризовать их однородность, выделять зоны с пониженной прочностью и отдельные отторженцы.

В районе Архангельска при динамическом зондировании молотом весом 100 кг погружает стандартный конус десятью ударами на 4—15 см в зависимости от консистенции суглинков. Для забивки зонда весом 60 кг на глубину 10 см в моренные суглинки центральных областей требуется 3—8 ударов [103]. Интересные исследования по интерпретации графиков динамического зондирования основной морены Ярославской области проведены Г. К. Бондариком и М. М. Максимовым. Им удалось не только расчленить моренные суглинки и перекрывающие породы, но и выделить прослой различной консистенции внутри моренной толщи [13].

Особенно успешно применяется динамическое зондирование при изучении песчаных морен и внутриморенных песчаных линз. По результатам зондирования моренные пески в районе Новгорода были расчленены на плотные, для которых осадка зонда от десяти ударов составляла 1—4 см, и пески средней плотности с осадкой зонда 9—17 см. В плотных пылеватых песках района Пскова приведенная осадка зонда от десяти ударов изменяется от 2 до 4 см. Следует отметить, что данные, полученные при зондировании, искажаются, если конус встречает крупные включения.

Результаты зондирования очень часто выражают величиной удельного динамического сопротивления пенетрации, которая для тугопластичной и полутвердой морены Архангельска составляет 60—120 кг/см<sup>2</sup>. А. Моосом динамическое сопротивление донной морены Швейцарии определено в 100—200 кг/см<sup>2</sup> [13].

Статическое зондирование моренных отложений позволяет не только определять условия залегания и выявлять прослои различной консистенции, но и получать ряд важнейших характеристик физико-механических свойств. Эти вопросы рассматриваются в конце настоящей главы.

**Гранулометрический состав.** В большинстве случаев фракции размером менее 2 мм обуславливают физико-механические свойства моренных отложений, причем при содержании песчаного заполнителя в количестве более 40% и глинистого более 30% последний имеет основное значение. Для определения содержания крупных включений необходимо проводить грохочение пробы весом не менее 50—70 кг ситами размером отверстий 100, 10 и 2 мм. Для песчаной и супесчаной морен грохочение не представляет трудностей, а для суглинистой и глинистой морен обломки более 2 мм в диаметре приходится отбирать после предварительного рыхления породы. Грохочение обычно выполняется в поле, а частицы размером менее 2 мм анализируются в лаборатории общепринятыми методами. После получения результатов исследования фракций размером больше и меньше 2 мм их объединяют путем пересчета на 100%. В ряде случаев, имея результат полного анализа, для установления наименования заполнителя и его влияния на свойства породы приходится проводить обратную операцию, т. е. пересчитывать на 100% фракции размера менее 2 мм. С целью упрощения вычислений рекомендуется пользоваться номограммой (рис. 8).

Объединение фракций производится следующим образом. Находят точку, одна из координат которой равна содержанию крупнообломочного материала (вертикальная ось), а вторая — содержанию фракций в составе частиц меньше 2 мм (горизонтальная ось). Линия номограммы, на которую попадает эта точка, соответствует количеству данной фракции в смеси. При пересчете содержания мелкозема на 100% ищут пересечение линии, которая проводится через ординату, равную количеству мелкозема в смеси, и линии графика, отвечающей содержанию данной фракции в полном составе. Перпендикуляр, проведенный через эту точку до горизонтальной оси, покажет нужный результат.

Для моренных грунтов, содержащих карбонаты, предварительная обработка пробы аммиаком и кипячением повышает выход глинистых фракций в 1,5—2,0 раза по сравнению с обычным полудисперсным способом подготовки к анализу. Исследования М. Г. Хохловой показали, что моренные суглинки имеют глинистую фракцию в скоагулированном состоянии в виде частиц размером от 0,05 до 0,001 мм [113], что подтверждается и другими работами.

**Объемный вес.** Присутствие крупных включений представляет известные трудности при определении объемного веса моренных отложений. Для получения достоверных значений необходимы монолиты больших размеров, отбор и доставка в лабораторию которых не всегда возможны. Е. Ф. Винокуров рекомендует определять объемный вес моренных грунтов по формуле

$$\gamma = \frac{P_1 \alpha_1 V_2 + P_2 \alpha_2 V_1}{V_1 V_2},$$

где  $P_1$  — вес навески скелета грунта естественной влажности объема  $V_1$ ;

$P_2$  — вес навески включений естественной влажности объема  $V_2$ ;

$\alpha_1, \alpha_2$  — процентное содержание грунтового скелета и включений (в долях единицы).

Для песчаной и супесчаной морен Балтийского шита, имеющих очень большое количество крупных включений, наиболее надеж-

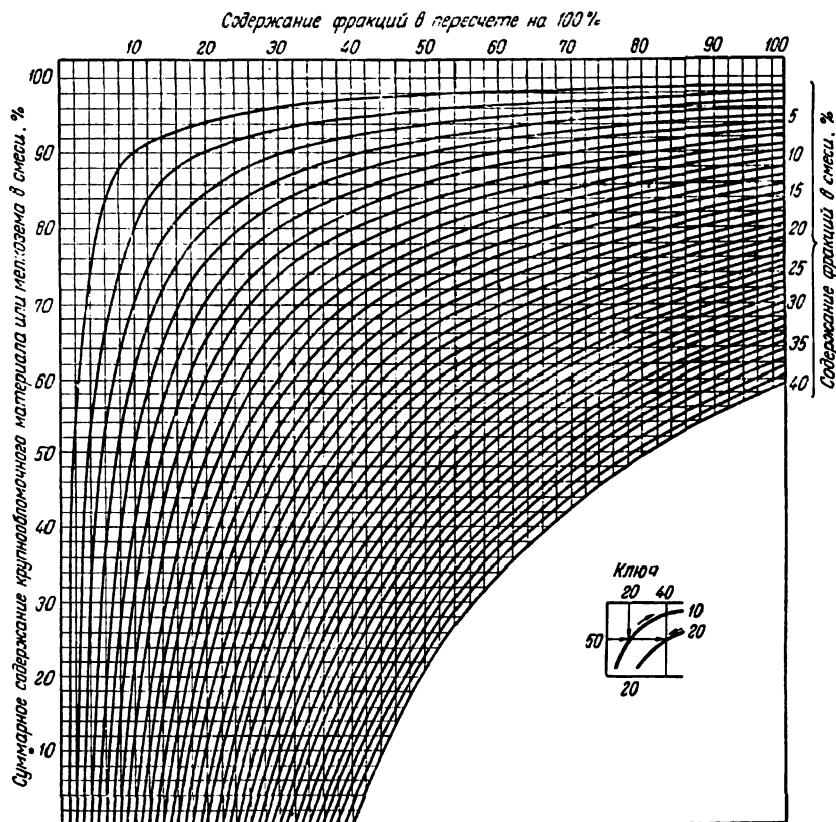


Рис. 8. Номограмма для пересчета мелкосемя и крупнообломочного материала на 100%.

ным, хотя и весьма трудоемким, является способ определения объемного веса замером объема и веса породы, вынутой из шурфов. Эти опыты значительно упрощаются, если в шурфы, дно и стенки которых предварительно покрыты полиэтиленовой пленкой, наливать воду из любого сосуда известной емкости. При отборе образцов режущими кольцами в них обычно попадают частицы размером не более 10—20 мм, что приводит к ошибкам в определении объемного веса при большом содержании крупных включений.

ний. Для учета влияния включений на значение объемного веса морены рекомендуется пользоваться теоретическим решением

$$\delta = \frac{\gamma_{ч} \delta_{м}}{P_{к} \delta_{м} + P_{м} \gamma_{ч}}, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\delta_{к}}{P_{к}}, \quad (2)$$

где  $\delta$  — объемный вес скелета грунта;  
 $\delta_{м}, \delta_{к}$  — объемные веса скелета мелкозема и крупных включений;  
 $\gamma_{ч}$  — удельный вес крупных включений;  
 $P_{к}, P_{м}$  — весовое содержание крупных обломков и мелкозема.

Первая из приведенных формул служит для определения объемного веса скелета, если объем мелкозема в единице объема грунта больше объема пор между крупными включениями ( $n_{к}$ ), вторая — если объем крупных включений превышает объем мелкозема. При равенстве этих объемов справедливы обе формулы.

Объемный вес скелета смеси можно определить по графику (рис. 9), построенному для значения удельного веса крупнообломочного материала  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Точка перегиба в этом графике, соответствующая граничным условиям применимости формул (1) и (2), находится с помощью следующих соотношений:

$$P_{к} = \frac{1}{1 + n_{к} \frac{\delta_{м}}{\delta_{к}}}; \quad (3)$$

$$P_{м} = 1 - P_{к} = \frac{n_{к}}{\frac{\delta_{к}}{\delta_{м}} + n_{к}} \quad (4)$$

Если  $P_{к}$ , полученное при анализе данного грунта, меньше рассчитанного по формуле (3), то для вычисления следует применять формулу (1), в противном случае — формулу (2). Если  $P_{к}$ , определенное при анализе, равно вычисленному по формуле (3), то для нахождения объемного веса скелета смеси можно использовать любую из формул.

Найденные граничные условия соответствуют точкам перегиба зависимости водопроницаемости и прочности смеси от относительного содержания в ней мелких фракций, последнее подтверждается экспериментальными данными.

Удельный вес крупнообломочного материала в большинстве случаев может быть принят равным удельному весу мелкозема без существенной погрешности. Однако для использования формул необходимо знать объемный вес скелета крупнообломочного материала. Эта величина известна не всегда, что вынуждает прибегать к эмпирическим зависимостям или использовать справочные данные.

В. П. Антипкин и В. В. Ерофеев предложили кривые, полученные экспериментально для грунтов различной окатанности и петрографо-минералогического состава, которые позволяют находить объемный вес скелета смеси при содержании мелкозема в ней от 15—20 до 100% [4, 102]. Однако объемные веса скелета сме-

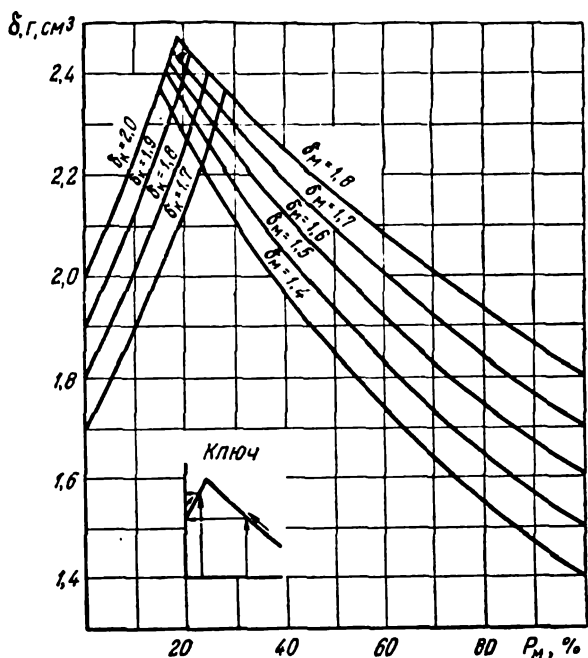


Рис. 9. Номограмма для определения объемного веса скелета грунта при удельном весе 2,70 г/см³

си, полученные по разным кривым, существенно отличаются. Сопоставление опубликованных в литературе данных об объемном весе скелета песчано-гравийных смесей и содержаний в них мелкозема показывает, что все опытные кривые ложатся в определенном поле рассеяния [4, 15, 102]. Нижняя граничная кривая характеризует смеси, мелкозем которых имеет объемный вес скелета около 1,5 г/см³, верхняя — 1,65 г/см³. Судя по характеру этих кривых, с увеличением содержания мелкозема в смеси объемный вес скелета последней возрастает, а затем, когда повышение доли мелкозема в смеси начинает идти за счет уменьшения количества крупнообломочного материала, объемный вес скелета уменьшается. Определенность, с которой очерчивается поле изменения объемного веса скелета смеси в зависимости от содержания в ней мелкозема, позволяет рекомендовать график, с помощью которого можно выбирать приблизительные значения объемного веса скелета смеси, зная объемный вес скелета мелкозема и его весовое

содержание в этой смеси (рис. 10). Эти графики не учитывают удельного веса зерен, но с точностью, достаточной для практических расчетов, этим можно пренебречь.

Вышесказанное, очевидно, справедливо для любых пород, но чем более они однородны, тем больше будут расхождения с результатами экспериментов. В среднем ошибки могут достигать 10—

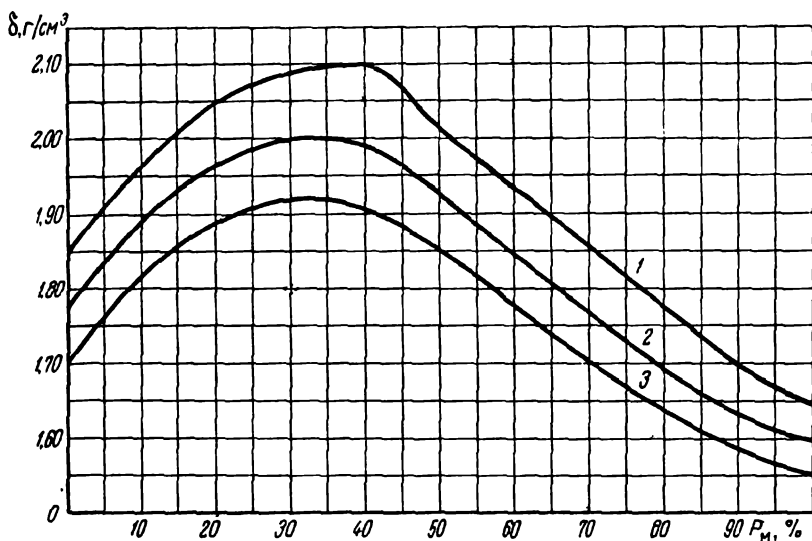


Рис. 10. График для оценки объемного веса скелета грунта  
При объемном весе мелкозема: 1 — 1,65 г/см<sup>3</sup>; 2 — 1,60 г/см<sup>3</sup>; 3 — 1,55 г/см<sup>3</sup>

20%. Эти ошибки могут быть следствием того, что мелкозем и крупнообломочный материал не заполняют всей единицы объема смеси вследствие заклиньки отдельных зерен с образованием при этом пустот, недоступных для мелкозема.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что если в породе содержится 90% заполнителя, то разница в объемном весе последней и смеси составит примерно 0,09—0,10 г/см<sup>3</sup>, что вполне допустимо. Следовательно, определение объемного веса морен с включением крупных обломков до 10% может производиться методами, используемыми для изучения обычных песчано-глинистых пород.

В практике плотность моренных отложений нередко характеризуют величинами объемного веса скелета в рыхлом и плотном сложении. Однако объемный вес скелета в природном залегании часто превышает объемный вес скелета в плотном сложении. Тогда коэффициент плотности становится больше единицы. Таким образом, понятие «объемный вес скелета в плотном сложении» а тем более «в предельно плотном сложении» теряет смысл. В то же время величины объемного веса скелета морены при разно-



уплотнения отличаются от тех же показателей для других генетических типов отложений (табл. 32), а поэтому могут служить в качестве дополнительного признака для распознавания морены.

Таблица 32

Сопоставление объемных весов пород различных генетических типов

Генетический тип песчаных отложений (Балтийский щит)	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес скелета, г/см <sup>3</sup>	
		в рыхлом состоянии	в плотном состоянии
Морена . . . . .	2,70	1,49	1,94
Флювиогляциальные . . . . .	2,70	1,42	1,80
Гляциально-морские . . . . .	2,69	1,42	1,72
Морские . . . . .	2,80	1,45	1,83
Аллювиальные . . . . .	2,67	1,41	1,76

**Консистенция.** Состояние моренных супесей и суглинков оценивают в настоящее время общепринятым способом, сопоставляя естественную влажность и пределы пластичности, которые определяются в соответствии с ГОСТом. Ряд исследователей предлагает характеризовать консистенцию моренных пород с помощью метода П. О. Бойченко. Выше уже упоминалось, что во многих случаях методы П. О. Бойченко и ГОСТа дают вполне сопоставимые результаты. Разница в оценке консистенции обычно становится существенной для суглинков сравнительно невысокой плотности (объемный вес скелета около 1,75 г/см<sup>3</sup>, влажность порядка 20%). Несмотря на то, что оба метода условны и не отражают физической сущности понятия «консистенция», они, и в особенности стандартный метод, широко применяются на практике. Так как моренные породы имеют низкую влажность, то малейшие изменения значения естественной влажности вследствие неполного заполнения пор водой существенно сказываются на величине показателя консистенции. В ряде случаев, например, для моренных суглинков Архангельска, визуальному описанию консистенции более соответствует показатель консистенции, вычисленный по полной влагоемкости, чем по естественной влажности. Этот прием позволяет также ввести поправку на уменьшение влажности в результате высыхания при отборе и транспортировке монолитов. Для дополнительной характеристики состояния моренных отложений может быть использован показатель естественной уплотненности, предложенный В. А. Приклонским. При полном насыщении пор водой показатель уплотненности аналогичен коэффициенту консистенции.

$$K_d = \frac{\varepsilon_T - \varepsilon}{\varepsilon_T - \varepsilon_p} = \frac{\gamma_v W_T - \gamma_v W}{\gamma_v W_T - \gamma_v W_p} = \frac{W_T - W}{W_T - W_p} = 1 - \frac{W - W_p}{W_T - W_p} = 1 - B = M_k,$$

где  $\epsilon$ ,  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_p$  — коэффициенты пористости соответственно: естественный, пласты с влажностью на границе текучести и раскатывания;

$\gamma_n$  — удельный вес;  
 $W$ ,  $W_t$ ,  $W_p$  — соответственно естественная влажность и пределы пластичности;

$B$  — показатель консистенции;

$M_k$  — коэффициент консистенции.

При неполном насыщении породы водой показатель уплотненности позволяет предсказать возможную консистенцию после заполнения пор водой.

Очевидно, что консистенция породы связана со степенью ее уплотнения. Поэтому естественно связать показатель естественной уплотненности с коэффициентом консистенции.

В соответствии с данными табл. 33 проводится классификация моренных отложений по величине  $K_d$ .

Таблица 33

Классификация моренных отложений по коэффициенту естественной уплотненности

Коэффициент естественной уплотненности	Состояние породы	Показатель консистенции $B$	Консистенция породы
$< 0$ 0,0—0,5	Неуплотненное Недоуплотненное	$> 1$ 0,5—1,0	Текучая Текуче- и мягкопластичная
0,5—1,0	Уплотненное	0,0—0,5	Тугопластичная и полутвердая
$> 1,0$	Переуплотненное	$< 0$	Твердая

В соответствии с предлагаемой схемой моренные суглинки относятся большей частью к породам уплотненным и в меньшей степени — к переуплотненным.

**Водопроницаемость.** Водопроницаемость моренных отложений должна определяться только в полевых условиях или на больших образцах того же состава и плотности, что и в естественном залегании. Экспериментально установлено, что коэффициенты фильтрации, полученные в лаборатории для моренных песков и супесей, в 5—10 раз превышают этот показатель, рассчитанный по результатам откачек. Для суглинков отмечается обратная зависимость из-за наличия песчаных прослоев в толще морены. Так, Р. С. Зиангиров [40] установил, что для моренных суглинков коэффициент фильтрации по лабораторным исследованиям составил  $10^{-8}$  см/сек, а по откачкам из шахты —  $10^{-5}$  см/сек.

Однако даже при производстве откачек неправомерно распространять результаты, полученные по отдельным точкам, на весь слой, если содержание крупнообломочного материала в этих точ-

ках и в среднем по слою существенно отличается. Для учета влияния крупных обломков на фильтрационную способность моренных отложений можно использовать следующие зависимости — (5) и (6). При объеме пор мелкозема, превышающем объем пор, создаваемых крупными обломками,

$$K = K_m \cdot V_m = K_m \frac{P_m \gamma_{ч}}{P_k \delta_m + P_m \gamma_{ч}}, \quad (5)$$

где  $K$  — коэффициент фильтрации смеси;  
 $K_m$  — коэффициент фильтрации мелкозема;  
 $V_m$  — объем пор мелкозема;  
 $P_k, P_m$  — весовое содержание крупных обломков и мелкозема;  
 $\gamma_{ч}$  — удельный вес крупных включений;  
 $\delta_m$  — объемный вес скелета мелкозема.

На рис. 11 приведена номограмма для нахождения объема пор мелкозема по известному весовому содержанию последнего в сме-

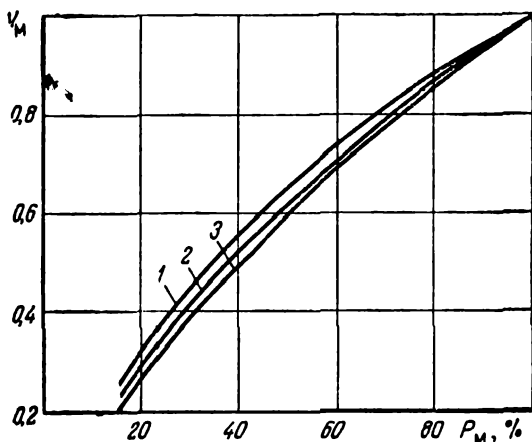


Рис. 11. Влияние весового содержания мелкозема на объем мелкозема при удельном весе 2,70 г/см³  
 При объемном весе мелкозема: 1 — 1,4 г/см³; 2 — 1,6 г/см³;  
 3 — 1,8 г/см³

си для объемных весов скелета мелкозема 1,4; 1,6 и 1,8 г/см³ при удельном весе 2,70 г/см³. В случае, когда объем пор, образуемых крупнообломочными частицами, превосходит объем мелкозема

$$K = K_k \left( 1 - \frac{P_m \delta_k}{P_k \delta_m n_k} \right) + K_m \frac{P_m \delta_k}{P_k \delta_m}, \quad (6)$$

где  $n_k$  — пористость крупнообломочного материала.

Подсчеты показывают, что вторым членом в формуле (6) можно пренебречь при  $P_k > 0,85$  и  $K_k/K_m = 5$ .

Зависимость величин  $\left( 1 - \frac{V_m}{n_k} \right)$  от весового содержания мел-

козема в смеси при удельном весе  $2,70 \text{ г/см}^3$ , объемном весе крупнообломочного материала  $1,8$  и  $2,0 \text{ г/см}^3$  и объемном весе скелета мелкокозема  $1,4$ ;  $1,6$  и  $1,8 \text{ г/см}^3$  показана на рис. 12. Если объем пор, образуемых крупнообломочным материалом, равен объему мелкокозема в смеси, справедливы обе формулы. Формула (5)

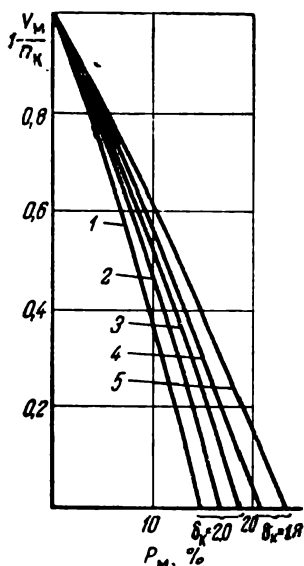


Рис. 12. Влияние весового содержания мелкокозема на величину  $(1 - \frac{V_m}{p_k})$  при удельном весе  $2,70 \text{ г/см}^3$

При объемном весе мелкокозема:  
1.  $4 - 1,4 \text{ г/см}^3$ ; 2.  $5 - 1,6 \text{ г/см}^3$ ;  
3.  $1 - 1,8 \text{ г/см}^3$

дает более точное решение, чем формула (6), так как во втором случае существенную роль играет характер заполнения мелкокозема крупных пор, возрастает значение фильтрации по контактам крупнообломочного материала и заполнителя и др. Однако подобные случаи встречаются в природе значительно реже, чем первый из рассмотренных вариантов.

Предлагаемые теоретические зависимости лишь в общих чертах отражают сложные явления, происходящие в породе при фильтрации через нее воды, а поэтому являются ориентировочными. Тем не менее они уточняют представления об истинной водопроницаемости пород, состоящих из мелкокозема и крупных обломков.

**Сжимаемость.** Исследования деформативных свойств моренных отложений показывают, что они обладают небольшой сжимаемостью. Модули деформации, рассчитанные по результатам лабораторных опытов, изменяются в очень широких пределах. Это объясняется как различиями в физических свойствах образцов, так и по-

грешностями опыта, в значительной степени определяемыми крупными включениями, содержание которых в каждом образце является случайным. Обычно компрессионные кривые пологие, что характерно для плотных морен. При уплотнении глинистые морены испытывают в основном структурные деформации — остаточные деформации в  $1,5-2$  раза превышают упругие. Для моренных песков упругая часть осадки при коэффициенте пористости  $0,5$  достигает почти  $75\%$  от общей деформации образца. Процесс уплотнения песков и супесей практически заканчивается через несколько минут после начала опыта, а время полной консолидации составляет  $15-60 \text{ мин.}$

Динамика развития деформаций моренных суглинков при вертикальных нагрузках  $0,5$ ;  $1,2$  и  $4 \text{ кг/см}^2$  показывает, что время стабилизации осадки увеличивается для одного и того же образца с ростом вертикальной нагрузки (рис. 13).

В приборах осадка завершается за несколько суток, однако основная ее часть (75—95%) проходит за 1 ч и даже быстрее. Во всех случаях через 2 ч осадка превышала 90%. В этот период идет интенсивное перемещение частиц в результате нарушения связей между ними. По истечении этого периода порода упрочняется на-

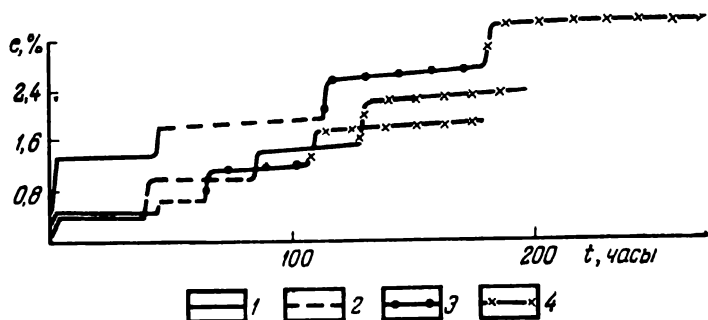


Рис. 13. Динамика развития деформаций моренных суглинков во времени при нагрузках:

1 — 0,5 кг/см<sup>2</sup>; 2 — 1 кг/см<sup>2</sup>; 3 — 2 кг/см<sup>2</sup>; 4 — 4 кг/см<sup>2</sup>

столько, что скорость деформации под данной нагрузкой резко падает, и деформация приобретает характер ползучести. При приложении следующей ступени нагрузки этот процесс повторяется. Таким образом, для моренных пород можно выделить два этапа деформаций: 1) продолжающийся около одного-двух часов, во время которого происходит интенсивное нарушение связей между частицами и перемещение последних, скорость деформаций в этот период велика, а кривая изменения деформации во времени имеет крутые очертания и 2) протекающий до полной стабилизации осадки (более 40—100 ч в зависимости от нагрузки). Во время этого этапа происходит процесс упрочнения породы, что находит свое выражение в резком замедлении скорости деформации. Деформации в этот период носят характер ползучести, а кривая сжатия имеет пологую форму.

Быстрая консолидация образцов в процессе опыта позволяет рекомендовать сокращение времени уплотнения под каждой нагрузкой при массовых определениях до 1—4 ч в зависимости от состава образца.

Согласно теоретическим расчетам, для достижения степени уплотнения 0,85 потребуется около 140 ч, а для достижения степени уплотнения 0,90 — порядка 160 ч. Вопрос о причинах расхождения между экспериментальными данными и результатами, получаемыми в соответствии с теорией фильтрационной консолидации, подробно освещен в литературе.

Немногочисленные результаты наблюдений за осадками зданий, возведенных на моренных супесях, свидетельствуют о том,

что примерно 90% всей осадки протекает за строительный период [20, 97].

При многократном нагружении и разгрузении моренных суглинков естественного сложения характер их деформируемости имеет ряд особенностей, для выяснения которых были поставлены специальные опыты. К образцам, загруженным в компрессионный прибор, в течение 3; 5 или 10 сек прикладывались нагрузки. Ве-

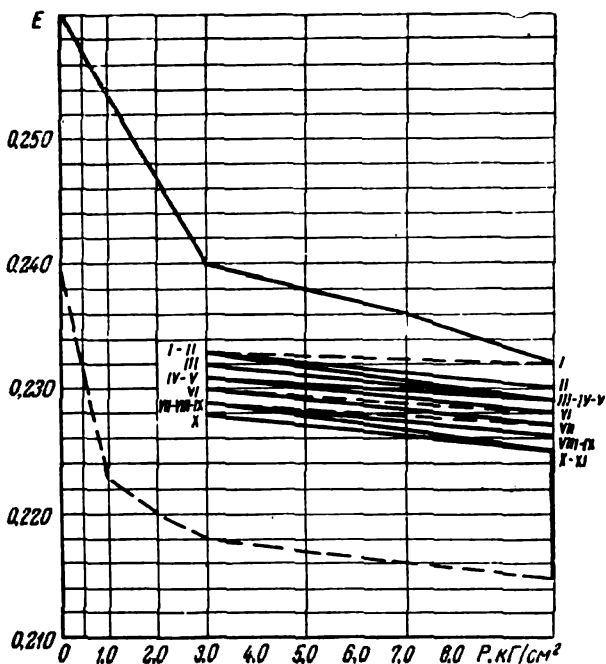


Рис. 14. Компрессионная кривая моренных суглинков при многократном нагружении. Цифры на графике соответствуют номерам циклов нагрузки

личина последних составляла 5, 7 и 10  $\text{кг/см}^2$ . После нескольких циклов нагружения и разгрузки (от 10 до 30 циклов) образец оставался в покое на 48 ч под давлением от 0,25 до 3  $\text{кг/см}^2$  после чего опыты продолжались. Через 10, 20 или 30 циклов в зависимости от принятой методики образцы разгружались (рис. 14).

Анализ проведенных исследований показал, что характер деформируемости исследованных пород при многократном нагружении одинаков, несмотря на различие в их составе и физических свойствах. Деформируемость изученных разностей моренных отложений в процессе их повторного нагружения и разгрузки в течение малого интервала времени уменьшалась с увеличением числа циклов нагружения; основным видом деформации при многократном нагружении являлась упругая деформация; остаточная

деформация имела подчиненное значение. Существенную роль в уплотнении играла осадка образца при его статическом сжатии после прекращения многократного нагружения и разгрузки породы. Изменение продолжительности приложения нагрузки в интервале 3—10 сек не сказалось на результатах нагружения. Разуплотнение образцов под нагрузкой при многократном кратковременном нагружении происходило очень быстро — практически мгновенно, что являлось следствием расширения заземленного воздуха. При длительном (около 10 ч) свободном набухании разуплотнение связано с увеличением влажности. Опыты показали, что основным отличием знакопеременного нагружения от статического является то, что при последнем из породы отжимается часть содержащейся в ней воды. При многократном кратковременном нагружении вода отделяется в небольшом количестве, и порода может уплотняться значительно меньше, чем при статическом воздействии на нее.

Небольшие величины осадки образцов в приборах приводят к значительным ошибкам в определении относительной деформации. Кроме того, существенная часть деформации породы происходит вследствие обжатия поверхности образца штампом прибора. Все это, а также ряд других широко известных обстоятельств вынуждают определять сжимаемость грунтов штампами в полевых условиях. Объем таких исследований морены рассматриваемого района невелик, однако полученные результаты позволяют сделать определенные выводы.

Опыты проводились в шурфах и скважинах плоскими штампами площадью 600 и 5000 см<sup>2</sup>. Результаты испытаний моренных песков, супесей и суглинков, залегающих на глубине 2,0—3,5 м, представлены на рис. 15.

Из рис. 15 и 16 видно, что величина осадки штампа возрастает по мере перехода от песчаных к глинистым породам, а для последних — с увеличением влажности. В ряде случаев более четко прослеживается связь между осадкой и показателем консистенции, установленная, например, для моренных супесей и суглинков Белоруссии Е. Ф. Винокуровым (рис. 17).

При исследованиях плотных пылеватых песков и твердых супесей штампом площадью 600 см<sup>2</sup> оказалось, что на графике зависимости осадки от нагрузки выделяются следующие участки: горизонтальный, соответствующий прочности связей в породе и отвечающий упругим деформациям; криволинейный, возникающий за счет нелинейной деформируемости породы при интенсивном ее уплотнении, и прямолинейный, где деформации в основании штампа пропорциональны действующим нагрузкам (рис. 18).

При обжатии моренных грунтов штампами с площадью основания 5000 см<sup>2</sup> второй участок не отмечается.

Осадки штампов на песках стабилизируются через 1—3 ч, на супесях — через 2—6 ч. Значительно дольше протекают осадки в суглинках. В зависимости от состава, плотности и нагрузки время затухания осадки изменяется от 10 до 100 ч и более.

Анализ соотношения упругой и остаточной части деформации свидетельствует о том, что последняя составляет основную часть в общем сжатии моренных пород и изменяется от 65 до 95% для штампов площадью 600 см<sup>2</sup>. В тех случаях, когда опыты велись

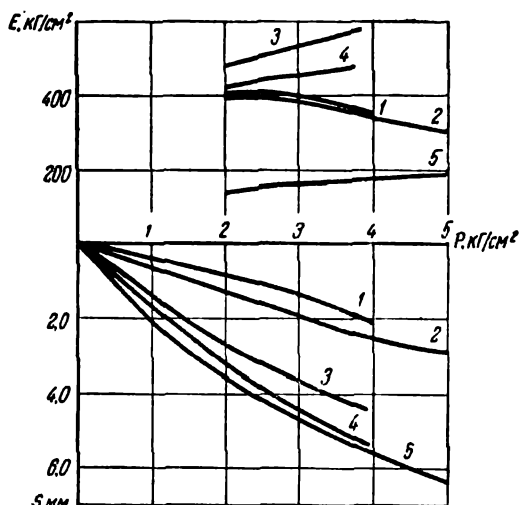


Рис. 15. Результаты испытаний статическими нагрузками песков (1), супесей (2—4) и суглинков (5) в районе Новгорода

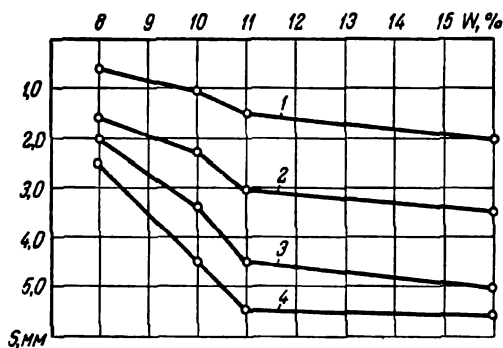


Рис. 16. Зависимость осадки штампа от естественной влажности

При нагрузке: 1 — 1 кг/см<sup>2</sup>; 2 — 2 кг/см<sup>2</sup>; 3 — 3 кг/см<sup>2</sup>; 4 — 4 кг/см<sup>2</sup>

штампами размером 5000 см<sup>2</sup>, упругая деформация была больше остаточной. Последнее обстоятельство дает возможность предполагать, что в основании сооружений моренные породы ведут себя как линейно деформируемое тело. Для пород, подвергшихся нагрузке, оказалось, что наибольшая доля упругой деформации



в общей ее величине отмечается для песков (30—35%), затем для супесей (15—30%) и, наконец, для суглинков (около 15%). Интересно, что соотношение упругой и остаточной деформации, полученное в лабораторных опытах, сохраняется примерно в тех же пределах.

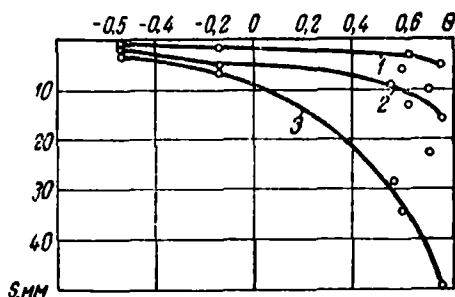


Рис. 17. Зависимость осадки штампа от консистенции моренной супеси района Солигорска (по материалам ИСИА Госстроя БССР)

При нагрузке: 1—1 кг/см<sup>2</sup>; 2—2 кг/см<sup>2</sup>; 3—3 кг/см<sup>2</sup>

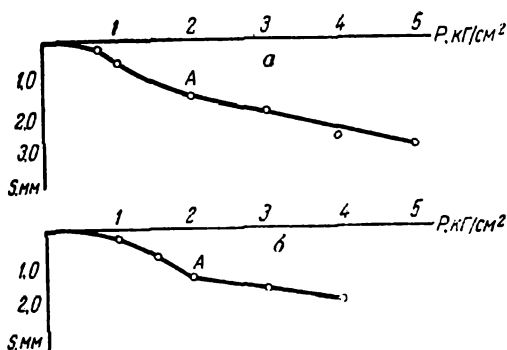


Рис. 18. Зависимость осадки штампа площадью 600 см<sup>2</sup> от нагрузки для супеси твердой консистенции (а) и пылеватых песков (б) (А — начало зоны линейной деформации)

Как уже отмечалось, зависимость осадка штампа от нагрузки в общем случае имеет нелинейный характер. Поэтому величина модуля деформации зависит от интервала давлений, в пределах которого он вычисляется.

В табл. 34 приведены результаты подсчетов модуля деформации для разных интервалов давлений, причем диапазону 2—4 кг/см<sup>2</sup> соответствует прямолинейный участок на графике зависимости осадка — давление. Как видно из табл. 34, расхождения в значениях модуля деформации в зависимости от принятого для

Результаты испытаний опытными нагрузками штампов

Номер о т а	Площадь штампа, см <sup>2</sup>	Порода	Модуль деформации (кг/см <sup>2</sup> ) в интервале нагрузок, кг/см <sup>2</sup>						Соотношение упругой и общей деформации
			0—2	0—3	0—4	0—5	0—6	2—4	
1	600	Песок пылеватый . .	380	350	400	—	—	650	0,31
2	600	Супесь . . . . .	260	320	320	360	—	400	0,04
3	5000	» . . . . .	460	510	520	—	—	610	0,51
4	5000	» . . . . .	390	390	400	—	—	410	0,61
5	600	Суглинок . . . . .	120	130	140	160	—	170	0,16
6	600	Супесь . . . . .	490	270	200	190	180	140	0,15
7	600	» . . . . .	190	180	160	150	—	140	0,15
8	600	» . . . . .	190	160	150	—	—	160	—
9	600	Песок пылеватый . .	200	170	160	160	150	140	0,30
10	600	То же . . . . .	220	140	100	—	—	100	0,34
11	600	Супесь . . . . .	400	260	190	170	140	300	0,27

расчета диапазона нагрузок весьма существенны и достигают 350%.

Таблица 35

Модуль деформации моренных отложений по результатам испытаний штампами

Район	Площадь штампа, см <sup>2</sup>	Модуль деформации, кг/см <sup>2</sup>	Автор
-------	---------------------------------	---------------------------------------	-------

*Супеси пластичные, суглинки мягкопластичные*

Эстония . . . . .	5000	70—270	[70]
Литва . . . . .	5000 и 10000	440—550	[120]
Белоруссия . . . . .	600 и 5000	80—220	[20]
Центральные р-ны . . . . .	5000	107—150	[37]
Московская обл. . . . .	5000	450—750	[43]
То же . . . . .	5000	86—171	[14]
Ярославль . . . . .	5000	170—330	[112]

*Супеси твердые, суглинки тугопластичные, полутвердые, твердые*

Эстония . . . . .	5000	300—800	[70]
Литва . . . . .	5000 и 10000	600—850	[120]
Белоруссия . . . . .	600 и 5000	150—600	[20]
Ленинград . . . . .	—	176—286	[42]
Московская обл. . . . .	5000	363—420	[105]
То же . . . . .	5000	550	[54]
Центральные р-ны . . . . .	5000	320	[37]
То же . . . . .	—	214—1376	[103]
Ярославль . . . . .	5000	420—660	[112]

В табл. 35 помещены значения модуля деформации, полученные разными исследователями при испытании морены штампами.

Эти данные свидетельствуют о существенной изменчивости моренных отложений по сжимаемости.

Большинство исследователей считает, что деформативные свойства морены следует изучать только полевыми методами.

Рассмотрим необходимую и достаточную точность определения модуля деформации. Формула для расчета осадки по методу элементарного суммирования может быть представлена в виде

$$S = \frac{\Phi}{E},$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^n p_i h_i \beta;$$

где  $p_i$  — полусумма вертикальных нормальных давлений на границах  $i$ -го слоя;

$h_i$  — мощность  $i$ -го слоя;

$E$  — модуль деформации;

$\beta$  — коэффициент, равный 0,8.

Пусть  $\pm \Delta E$  — допустимое отклонение в значении модуля деформации, которое обеспечивает принятую точность расчета осадки  $\pm \Delta S = S - S_1$ , где  $S$  — осадка, соответствующая модулю деформации  $E$ , а  $S_1$  — осадка, соответствующая модулю деформации  $E_1$ , при условии, что  $E_1 = E \pm \Delta E$ . Так как

$$S = \frac{\Phi}{E},$$

$$S_1 = \frac{\Phi}{E_1},$$

то 
$$\pm \Delta S = \Phi \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{E \pm \Delta E} \right) = \frac{S \Delta E}{E \pm \Delta E},$$

откуда 
$$\Delta E = \frac{E}{1 \pm \frac{S}{\Delta S}}.$$

Взяв дробь в знаменателе со знаком плюс, чтобы обеспечить наименьшую величину  $\Delta E$ , окончательно имеем:

$$\Delta E = \frac{E}{1 + \frac{S}{\Delta S}}, \text{ или } \Delta E = \frac{E^2 \Delta S}{E \Delta S + \Phi}.$$

Погрешность расчета обычно не менее 10%, поэтому  $\Delta E \approx 0,1E$ . Согласно требованиям СНиПа, предельное значение средней осадки фундаментов промышленных и гражданских зданий и сооружений составляет 8—10 см. При точности расчета этой величины  $(\pm 0,5) - (\pm 1,0)$  см, относительная ошибка расчета равна примерно 10%. Из рис. 19, на котором представлена зависимость между осадкой и модулем деформации для значений  $\Phi$  от

100 до 1000  $\text{кг/см}$ , т. е. в области практически всех возможных случаев, следует, что при  $E \geq 200 \text{ кг/см}^2$  осадка фундамента будет менее 5 см. При модуле деформации  $E \geq 300 \text{ кг/см}^2$  при значениях  $\Phi \leq 200 \text{ кг/см}$  величина осадки оказывается меньшей 0,5 см. Таким образом, если модуль деформации, полученный лабораторным путем превышает 200—300  $\text{кг/см}^2$ , то уточнение его полевыми

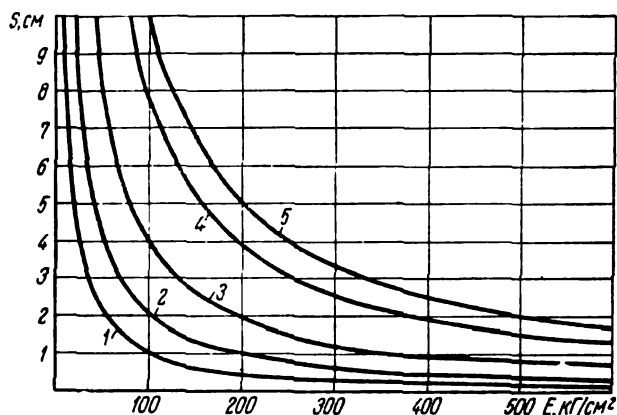


Рис. 19. Зависимость осадки фундамента от величины  $\eta$  модуля деформации:

При значении  $\Phi = \frac{\Sigma p_i h_i}{l}$ , равном: 1 — 100  $\text{кг/см}$ ; 2 — 200  $\text{кг/см}$ ;

3 — 400  $\text{кг/см}$ ; 4 — 800  $\text{кг/см}$ ; 5 — 1000  $\text{кг/см}$

опытами теряет смысл. С другой стороны, точность определения нормативного значения модуля деформации также не должна превышать 10%. Следует отметить, что полевые опыты на моренных породах имеют существенные погрешности, в частности, если в активной зоне под штампом находится скопление крупных обломков.

Приведенный выше анализ позволяет оценить допустимую изменчивость значений модуля деформации, что особенно важно для моренных отложений. П. А. Коновалов и Н. Я. Рудницкий предлагают характеризовать изменчивость значений модуля деформации для одной площадки по отношению максимального и минимального значений [54]. Для моренных суглинков одной из площадок ими получено это отношение равным 2,6. По нашим данным, это отношение может достигать 4—6, но обычно оно не превышает 2—3.

Многими авторами делаются попытки определять модуль деформации на основании результатов статического зондирования. Зависимости между модулем деформации и удельным статическим сопротивлением зондированию по данным разных исследователей приведены в табл. 36.

Модуль деформации моренных суглинков района Архангельска, вычисленный по формулам, приведенным в табл. 36, оказал-

Зависимость модуля деформации от удельного статического сопротивления ( $q$ ) для моренных суглинков

Район	Выражение для вычисления модуля деформации. $кг/см^2$	Способ определения модуля деформации	Автор
Подмосковье	$0,89q + 32$	Компрессионные приборы	[14]
Москва	$5,9q^{0,7}$	Штампопыты	[74]
Ярославль	$(7-13)q$	»	[111]
Центральные р-ны	$(6-7)q$	Теоретическое решение	[107]
То же	$5q + 100$	Штампопыты	[103]
Литва	$8q$	.	[3]

ся меньше, чем полученный при компрессионных испытаниях. Исключение составляет зависимость, полученная Ю. Г. Трофименковым и др. При использовании этой зависимости модуль деформации оказался близким к модулю деформации, определенному в лаборатории. В то же время Т. А. Грязнов установил, что отношение модулей деформации моренных суглинков Московской области, вычисленных по результатам зондирования и полученных нагружением штампов, составило 0,96—1,35 [109]. Таким образом, указанные зависимости справедливы только для конкретных условий в данном районе.

Здания и сооружения, основанием которых служат моренные породы, как правило, претерпевают небольшие осадки. По данным Е. Ф. Винокурова и Ю. А. Соболевского, осадки сооружений, построенных в Белоруссии на моренных супесях пластичной консистенции, изменяются в пределах 8—22 мм, на твердых супесях — 3—9 мм и на пылеватых песках — 3—13 мм [19, 97]. Между тем фундаменты зданий, возведенные частично на моренных, частично на парагенетически связанных с ними более слабых породах, часто испытывают неравномерные осадки, что приводит к деформациям сооружений. Так, например, при залегании моренных суглинков на глубине 6—7 м от подошвы фундаментов, основанных на ленточных глинах, осадка составила 60—120 мм, а в местах, где кровля морены поднимается до глубины 1,5—2,0 м, — всего 24 мм. Такая разница осадки отдельных осей фундаментов вызвала деформации семиэтажных крупноблочных зданий [28]. В этом случае высокие деформативные свойства морены выступают в определенном смысле как неблагоприятный фактор. С другой стороны, известны случаи неодинаковой осадки зданий, фундаменты которых расположены одновременно на морене и на скальных породах. Так, А. М. Попов [83] приводит пример деформации сооружения из-за того, что разность осадки между частями фундамента, заложенными на скале и моренных суглинках, достигала 24—33 мм.

*Соппротивление сдвигу.* Прочность моренных отложений в значительной степени зависит от количества и состава крупных включений. Поэтому исследования сопротивления сдвигу на приборах с малой площадью среза дают результаты, почти всегда отличающиеся от действительных. Значительно более достоверные данные получаются в приборах с площадью среза свыше  $2000 \text{ см}^2$  и высотой 20—50 см, а также при испытаниях в стабилометрах больших размеров. А. А. Ничипорович и Л. Н. Рассказов [77] считают, что определение сопротивления сдвигу пород, содержащих крупные обломки, может проводиться при соотношении диаметров прибора и наиболее крупной фракции не менее 5. Наиболее предпочтительным для оценки прочности морены является способ сдвига щеликов. Однако и в этом случае результаты опытов должны тщательно корректироваться по среднему составу слоя в целом.

Известно, что прочность породы, определенная полевыми методами, обычно ниже, чем полученная в лаборатории, в частности из-за большей анизотропности массива по сравнению с отдельным образцом. Однако для моренных отложений это соотношение нередко нарушается. Так, испытания моренных суглинков района Вологды полевыми и лабораторными методами дали вполне сопоставимые результаты (см. табл. 14).

Опыты, проведенные на участке Каунасской ГЭС, показали, что кривая зависимости коэффициента сдвига от нагрузки, построенная по результатам сдвигов на образцах размером 35 см, легла выше, чем такая же кривая зависимости, установленная по данным лабораторных экспериментов [49]. Эта особенность моренных суглинков может быть объяснена, в частности, влиянием гравия, гальки и валунов на прочность морены.

Если содержание крупных обломков в моренных отложениях не превышает 60—70%, то согласно существующим представлениям [15, 50 и др.] механические свойства породы определяются свойствами мелкозема. Поэтому в целом ряде случаев лабораторное изучение сопротивления морены сдвигу дает достаточно объективные результаты. Методика проведения опытов при этом определяется соотношением сжимаемости породы и нагрузкой от веса сооружений, с одной стороны, и стадией проектирования — с другой.

Если изучаются глинистые отложения, то при предварительных исследованиях, когда конкретные сведения о проектируемом сооружении, как правило, отсутствуют, достаточно получить общую характеристику прочности моренных отложений. В этом случае опыты производятся по методике быстрого сдвига без предварительного уплотнения. На стадии проектного задания испытания должны выполняться для каждого из вариантов сооружений в соответствии с работой породы в основании в данных инженерно-геологических условиях. На стадии рабочего проектирования, когда известен тип сооружения, методика испытаний увязыва-

ется с особенностями его конструкции и работы и обычно повторяет один из вариантов, использовавшихся в опытах на предыдущей стадии.

Нагрузки, которые передаются большинством сооружений на основания, сложенные моренными отложениями, не могут сколько-нибудь существенно уплотнить последние. Поэтому опыты следует производить без уплотнения, причем максимальная нагрузка при сдвиге должна быть равна нагрузке от веса сооружения. В этом случае, если предполагается уплотнение породы сооружением, то в силу низкой фильтрационной способности моренных отложений этот процесс будет происходить очень медленно. В связи с этим методика опытов должна сохраняться такой же, как и рассмотренная выше.

Время сдвиговых испытаний выбирается, исходя из следующих соображений. Если в основании сооружения допускаются ограниченные по величине деформации, то деформации ползучести не развиваются. В этом случае опыт ведется по схеме медленного сдвига, получаемые при этом величины сдвигающего усилия находятся на пороге ползучести и поэтому не могут привести к ползучести породы. Для сооружений, в основании которых возможно развитие значительных по величине деформаций, в расчет должны закладываться параметры прочности, соответствующие большему сопротивлению сдвига, чем в предыдущем случае. Их можно получить, применив схему ускоренного сдвига, при котором процессы ползучести не развиваются.

Исследования сопротивления сдвигу моренных песков должны выполняться при плотности, близкой к естественной, под нагрузками, максимальная из которых равна давлению, передаваемому сооружением, без предварительного уплотнения. Время опытов не сказывается на их результатах, поэтому в этом случае могут проводиться ускоренные сдвиги.

К. И. Тыльчевский [105] определял сопротивление сдвигу моренных суглинков в районе дер. Кашейково Московской области установкой, позволяющей определять механические свойства непосредственно в стенках буровых скважин. Сопротивление сдвигу по скважине составило  $0,71—1,06 \text{ кг/см}^2$ , что отличается от параллельных лабораторных определений не более чем на 8%.

*Статическое зондирование.* Основным методом изучения моренных отложений как основания свайных фундаментов является статическое зондирование. Этот метод применялся, в частности, при исследовании суглинков районов г. Архангельска и р. Иксы. Опыты, проводившиеся установкой С-979 по методике института Фундаментпроект, показали, что суглинки разной консистенции отличаются значениями удельного статического сопротивления конусу ( $q$ ) и суммарного бокового сопротивления ( $Q$ ) (табл. 37).

Тугопластичные суглинки характеризуются средней величиной удельного статического сопротивления  $17—22 \text{ кг/см}^2$ , для мягко-

**Результаты статического зондирования установки С-979**

Показателя	Глубина от кровли слоя, м											
	г. Архангельск (44 опыта)						р. Икса (17 опытов)					
	2		4		6		2		4		6	
	q	Q	q	Q	q	Q	q	Q	q	Q	q	Q
Пределы изменений . . .	10—30	0,6—1,5	10—30	1,0—3,3	10—30	2,0—4,0	20—26	0,7—1,5	—	—	14—40	0,6—2,0
Средние значения . . . .	18	1,0	18	2,0	17	2,9	22	1,1	—	—	22	1,2
Средние квадратические отклонения . . . . .	5,1	0,25	4,6	0,54	5,6	0,7	—	—	—	—	8,7	0,55

*Суглинки тугопластичные*

Пределы изменений . . .	4—20	0,2—1,1	4—12	0,6—2,6	8—16	2,0—3,7	8—18	0,2—0,8	8—18	0,4—1,0	8—20	0,6—1,1
Средние значения . . . .	10	0,5	8	1,2	10	2,6	12	0,4	12	0,7	13	0,9
Средние квадратические отклонения . . . . .	4,3	0,30	2,9	0,6	—	—	2,8	0,16	3,6	0,17	3,7	0,17

*Суглинки мягкопластичные*

Пределы изменений . . .	4—20	0,2—1,1	4—12	0,6—2,6	8—16	2,0—3,7	8—18	0,2—0,8	8—18	0,4—1,0	8—20	0,6—1,1
Средние значения . . . .	10	0,5	8	1,2	10	2,6	12	0,4	12	0,7	13	0,9
Средние квадратические отклонения . . . . .	4,3	0,30	2,9	0,6	—	—	2,8	0,16	3,6	0,17	3,7	0,17

Примечание: q — лобовое, кг/см<sup>2</sup>, Q — боковое сопротивление, т.



пластичных суглинков эта величина составляет 8—13  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ . Следует отметить, что примерно 40% значений удельных сопротивлений являются общими как для суглинков твердой, так и мягкопластичной консистенции. Следовательно, расчленить толщу с полной достоверностью только по результатам статического зондирования не удастся. О недостаточной разрешающей способности метода свидетельствуют также исследования ВСЕГИНГЕО [14].

При исследованиях моренных суглинков района Архангельска пенетрационно-каротажной станцией (СПК) получены значения лобовых сопротивлений 20—30  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ , причем выделялись многочисленные ослабленные зоны, где лобовое сопротивление падало до 10—15  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ , что в целом соответствует результатам статического зондирования, проведенного по методике Фундаментпроекта на этом же участке. Удельное боковое сопротивление в моренных суглинках Архангельска, замеренное установкой СПК, составляет 0,3—0,6  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ , падая в ослабленных зонах до 0,1  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ . Опытами Т. А. Грязнова в моренных суглинках Московской области получены такие же значения, и лишь в отдельных точках боковое сопротивление достигало 1  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ . Следует отметить, что лобовое сопротивление моренных суглинков повсеместно ниже, чем это следовало ожидать по физико-механическим свойствам, полученным в лаборатории.

По исследованиям ВСЕГИНГЕО лобовое сопротивление моренных суглинков Московской области не зависит от диаметра конусного зонда и составляет 20—25  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ . Несколько более существенно сказывается влияние угла при вершине конуса. Наименьшие значения лобового сопротивления (25  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ ) отмечаются при угле 60°, наибольшие (50  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ ) — при угле 90°. Применение конусов с острыми углами (15, 30°) в моренных грунтах нецелесообразно, так как такой конус существенно искривляет скважину при встрече с мелкими валунами и галькой [99].

При статическом зондировании по методике Фундаментпроекта удельное трение по боковой поверхности зонда ( $f$ ) для слоистой толщи рассчитывается по формуле

$$f = \frac{Q_2 - Q_1}{\pi d (H_2 - H_1)},$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  — суммарные сопротивления зонда по боковой поверхности соответственно в кровле и подошве слоя;

$H_1, H_2$  — глубина кровли и подошвы слоя;

$d$  — диаметр штанг.

По приведенной формуле легко вычислить удельное трение для одной точки зондирования. Для определения бокового сопротивления  $Q_i$  на глубине  $H_c$  исследуемого слоя в случае, если последний опробован в нескольких точках, рекомендуется использовать зависимость

$$Q_c = Q_n + H_c \operatorname{tg} \theta,$$

где  $Q_n$  — среднее боковое сопротивление зонда по слоям, перекрывающим исследуемый горизонт;

$\operatorname{tg} \theta$  — тангенс угла наклона осредненной линии бокового сопротивления к оси ординат.

Параметры  $Q_n$  и  $\operatorname{tg} \theta$  находятся по способу наименьших квадратов:

$$Q_n = \frac{\sum Q_i \cdot \sum (H_i)^2 - \sum H_i \sum Q_i H_i}{n \sum H_i^2 - (\sum H_i)^2},$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{n \sum Q_i H_i - \sum Q_i \sum H_i}{n \sum H_i^2 - (\sum H_i)^2},$$

где  $n$  — число средних значений величин  $Q_i$  на соответствующих глубинах от кровли слоя  $H_i$ . Рекомендуется принимать  $n$  не менее трех.

*Каротажные методы.* В последнее время при исследованиях моренных отложений все более широкое развитие получают каротажные методы. По результатам гамма-гамма-каротажа (ГГК) определяется объемный вес моренных суглинков с точностью не менее 0,02—0,04 Г/см<sup>3</sup>. При этом эффективный радиус исследований при длине зонда 40 см составляет в среднем 10 см, что позволяет более представительно оценить объемный вес моренных грунтов, чем по лабораторным методам [108]. По диаграмме ГГК хорошо отбивается кровля моренных суглинков в районе Архангельска.

Нейтрон-нейтронный каротаж позволяет определять объемную влажность с точностью порядка 5% от абсолютного значения этого показателя.

С помощью гамма-каротажа уверенно выделяются моренные отложения по естественному гамма-фону. Моренные суглинки по сравнению с песками имеют повышенный гамма-фон в два раза. Естественный гамма-фон моренных суглинков в районе Истры составляет 1700—2000 *имп/мин* [108].

В районе Архангельска естественный гамма-фон моренных суглинков имеет порядок 1500—2000 *имп/мин*, и, хотя перекрывающие и подстилающие породы характеризуются в среднем близким гамма-фоном с мореной, все же морена резко выделяется по «пилообразной» кривой гамма-фона за счет многочисленных песчаных прослоек, содержащихся в ней. Крупные пики диаграммы ГГК часто синхронны пикам лобового и бокового сопротивлений зонда.

В результате исследований естественного гамма-фона пород ледниковых отложений района Москвы, проведенных ВСЕГИН-ГЕО, получены экспериментальные данные (табл. 38) и предложена эмпирическая формула для оценки содержания глинистых частиц ( $C_{г.л}$ ) в породе по гамма-активности пород  $I_\gamma$  (в *имп/мин*):  $C_{г.л} = 0,019 (I_\gamma - 1000)$ , %:

**Результаты сопоставительных определений естественного  
гамма-фона и гранулометрического состава пород  
ледниковых отложений (по [108])**

Грунт	Содержание частиц мельче 0,005 мм, %	Интенсивность естественного гамма-излучения, имп/мин
Пески чистые	2—3	700—1000
Пески глинистые	3—8	1000—1300
Пески гравелистые	2—8	До 1500
Супеси	8—17	1300—1800
Суглинки	15—24	1600—2200

При естественном гамма-фоне моренных суглинков Архангельска 1500—2000 имп/мин количество глинистых частиц в них может быть оценено в 10—20%, что соответствует лабораторным исследованиям (см. табл. 6), принимая во внимание, что определение содержания частиц меньше 0,005 мм по гамма-активности породы производится с относительной точностью до 25%.

*Выбор нормативных и расчетных показателей.* Заключительным и наиболее ответственным этапом изучения моренных отложений является определение характеристик, непосредственно используемых для расчета прочности и деформируемости основания. Эти характеристики (нормативные и расчетные) выбираются для слоев, на которые толща основания разделяется в зависимости от результатов изучения слагающих ее пород. При выделении слоев используются как визуальные, так и опытные данные. Каждый из слоев должен состоять из породы, состав и состояние которой, а следовательно, и физико-механические свойства должны быть однородными во всех точках.

Для моренных отложений, неоднородных в текстурном отношении, очень важно установить, насколько линзы, прослои, скопления обломков, содержащиеся в морене, будут влиять на работу сооружения. Эта задача решается прежде всего на основании разведочных работ, совмещаемых с динамическим и статическим зондированием, которые позволяют не только выявить породы, отличающиеся по составу от морены, но и разные по консистенции. Если такие прослои, линзы и т. п. распределены в толще моренных отложений закономерно, то они выделяются в отдельный слой. Однако чаще они располагаются в морене без всякой закономерности, что позволяет рассматривать слой в целом. Большую помощь при выделении слоев, состоящих из моренных отложений, оказывают результаты лабораторных исследований состава и физических свойств пород. Гранулометрический состав морены, представленный частицами всех размеров, резко отличается от состава других генетических типов отложений. Данные табл. 39 и 40 подтверждают это положение.

Состав песчаных пород разного происхождения

Порода	Число определений	Гранулометрический состав, % (диаметр частиц, мм)							
		>100	100-10	10-2	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,05	0,05-0,002	
Озерно-ледниковые мелкозернистые пески . . . . .	82	—	—	—	3	14	72	11	Следы
Флювиогляциальные галечники с песком и валунами	29	18	31	17	13	8	10	3	Следы
Моренные пески . . . . .	97	19	16	13	11	10	9	11	1

Таблица 40

Состав и свойства глинистых пород разного происхождения и возраста

Порода	Число определений	Гранулометрический состав, % (диаметр частиц, мм)							Влажность, %	Объемный вес скелета, г/см <sup>3</sup>
		>10	10-2	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,005	0,05-0,002	<0,002		
Озерно-ледниковые ленточные глины (позднеледниковые) . . . . .	19	—	Следы	2	1	9	51	37	36	1,38
Моренные суглинки („верхняя“ морена) . .	24	Следы	2	3	3	18	60	14	16	1,88
Озерно-ледниковые ленточные глины (межморенные) . . . . .	17	—	—	—	—	14	63	23	27	1,55
Моренные суглинки („нижняя“ морена) . .	19	—	5	7	7	21	35	25	13	1,96
Кембрийские глины . . . . .	22	—	—	Следы	Следы	7	56	37	15	1,88

Оценка однородности показателей состава и свойств производится по критерию, рассмотренному ниже. Для приблизительной оценки влияния линзы или прослоя на работу сооружения могут использоваться следующие соотношения.

$$\frac{H_{\text{акт}}}{h_{\text{лин}}} \geq 10; \quad \frac{E_{\text{лин}}}{E_{\text{сл}}} \geq 0,5;$$

$$\frac{z_{\text{акт}}}{l_{\text{лин}}} \geq 10; \quad \frac{\text{tg } \Phi_{\text{лин}}}{\text{tg } \Phi_{\text{сл}}} \geq 0,5,$$

где  $H_{\text{акт}}$ ,  $z_{\text{акт}}$  — соответственно мощность и протяженность активной зоны основания;

$h_{\text{линз}}$ ,  $l_{\text{линз}}$  — соответственно мощность и длина линзы (прослоя);

$E_{\text{линз}}$ ,  $E_{\text{сл}}$  — модули деформации пород линзы и слоя, в котором она расположена;

$\text{tg}\varphi_{\text{линз}}$ ,  $\text{tg}\varphi_{\text{сл}}$  — коэффициенты сдвига пород линзы и слоя, в котором она расположена.

При одновременном сочетании указанных условий наличие линзы и прослоя не вносит существенных изменений в работу основания, и их можно не выделять в самостоятельный слой.

После окончательного выделения слоя производится обработка результатов исследований показателей свойств. При этом важно выяснить, какие из значений показателей являются нетипичными для слоя. Может оказаться, что наибольшая или наименьшая величина, например, объемного веса отражает наличие в слое небольшой по размеру линзы, не влияющей на общую оценку основания, и поэтому должна быть исключена. Такое решение может быть принято только на основании тщательного анализа всей геологической обстановки района строительства.

Нормативные характеристики, согласно указаниям СНиПа, вычисляются как средние из опытных данных при их количестве, достаточном для статистического обобщения. Вообще говоря, среднее значение показателя, полученное по результатам 15—20 опытов, может резко отличаться от среднего значения генеральной совокупности. Поэтому следует за нормативную характеристику принимать доверительный предел среднего значения показателя, рассчитанного по имеющемуся экспериментальному материалу. Однако, как показывают подсчеты, для моренных отложений даже при надежности 0,999 уже при четырех определениях среднее значение объемного веса будет с практической точки зрения незначимо отличаться от нижнего доверительного предела. Таким образом, нормативная характеристика объемного веса моренных грунтов совпадает с его средним значением.

Средняя величина показателей механических свойств может быть принята в качестве нормативной только в том случае, если проведено достаточное количество опытов при объемном весе образцов, равном нормативному. Это требование обычно выполнить трудно. Значительно проще оказывается построить зависимость между характеристикой рассматриваемого механического свойства и каким-либо показателем состава, состояния или физических свойств, а затем по линии, осредняющей с помощью способа наименьших квадратов опытные точки, установить нормативную величину показателя механического свойства в соответствии с нормативным показателем состава, состояния и т. п.

Расчетные характеристики показателей физических свойств практически совпадают с нормативными и поэтому соответствуют средним, вычисленным по опытным данным. Расчетные показатели механических свойств ( $Y_p$ ) устанавливаются методом доверительных пределов по формуле

$$Y_p = Y_{X_p} \pm t' \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y_i - Y)^2}{k(k-2)} \left[ 1 + \frac{k^2 (X_p - X_{cp})^2}{k \sum_{i=1}^k x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^k x_i \right)^2} \right]},$$

- где  $y_i$  — частное значение показателя механических свойств;  
 $Y$  — значение показателя механических свойств, вычисленных по уравнению регрессии  $Y = ax + b$ ;  
 $X_p$  — расчетное значение показателя физических свойств, вычисляемое по всем  $n$  значениям, полученным при исследовании слоя породы;  
 $x_i, X_{cp}$  — частное и среднее значение показателя физических свойств, определенное на  $k$  образцах, использованных при изучении механических свойств;  
 $k$  — число опытов;  
 $t'$  — величина, зависящая от принятой надежности и определенной по таблице распределения Стьюдента при  $k=2$  степени свободы.

Приведем пример вычисления расчетного значения сопротивления сдвигу моренных суглинков. Последнее определялось на образцах разной плотности при вертикальной нагрузке  $3 \text{ кг/см}^2$  (табл. 41). Кроме того, было выполнено еще 38 определений объемного веса скелета, и среднее из 64 опытов составило  $1,95 \text{ кг/см}^3$  при среднем квадратическом отклонении  $0,15 \text{ г/см}^3$ .

В данном случае расчетный показатель прочности выбирается по объемному весу скелета, дисперсия ряда распределения которого значительна. Поэтому необходимо установить расчетное значение плотности грунта

$$\delta_p = \delta_{cp} - \frac{t' \delta}{\sqrt{n}} = 1,95 - \frac{20,06 \cdot 0,15}{64} = 1,91 \text{ г/см}^3,$$

где  $\delta_{cp}$  — среднее значение объемного веса скелета, вычисленное по 64 образцам;

$t'$  — величина, зависящая от принятой надежности и определенной по таблице распределения при  $k=1$  степенях свободы, надежность в примере взята равной 0,95.

В уравнении регрессии  $\tau = a\delta + b$  параметр  $a$  вычисляется как  $\delta_{cp}$  из 26 опытов, а  $b$  — по способу наименьших квадратов.

$$a = \frac{50,03}{26} = 1,93; \quad b = \frac{n \Sigma \delta \tau - \Sigma \delta \Sigma \tau}{n \Sigma \delta^2 - (\Sigma \delta)^2} = \\ = \frac{26 \cdot 98,86 - 50,03 \cdot 51,14}{26 \cdot 96,67 - 50,03^2} = 1,13.$$

Таким образом, уравнение регрессии имеет вид

$$\tau = 1,96 + 1,13 (\delta - 1,93) = 1,13\delta - 0,22;$$

$$\tau_{\delta=1,91 \text{ г/см}^3} = 1,13 \cdot 1,91 - 0,22 = 1,94 \text{ кг/см}^2;$$

Определение расчетного значения сопротивления сдвигу моренных суглинков

Объемный вес скелета $\gamma_s$ , г/см <sup>3</sup>	Сопротивление сдвигу $\tau$ , кг/см <sup>2</sup>	$\delta\tau$	$\delta^2$		$\tau$ , вычисленное по уравнению регрессии $\tau_{per}$	$\tau - \tau_{per}$	$(\tau - \tau_{per})^2 \times 10^{-4}$
1,66	1,55	2,57	2,76	2,40	1,66	-0,11	121
1,72	1,77	3,04	2,96	3,13	1,72	0,05	25
1,75	1,75	3,06	3,06	3,06	1,75	0,00	0
1,79	2,02	3,62	3,20	4,08	1,80	0,22	484
1,80	1,88	3,38	3,24	3,53	1,81	0,07	49
1,81	1,75	3,17	3,28	3,06	1,82	-0,07	49
1,82	2,05	3,73	3,31	4,20	1,84	0,21	441
1,83	1,72	3,15	3,35	2,96	1,85	-0,13	169
1,86	1,92	3,57	3,46	3,69	1,88	0,04	16
1,87	1,82	3,40	3,50	3,31	1,89	-0,07	49
1,89	1,75	3,31	3,57	3,06	1,92	-0,15	225
1,90	2,10	3,99	3,61	4,41	1,93	0,17	289
1,92	2,07	3,97	3,69	4,28	1,95	0,12	144
1,95	1,87	3,65	3,80	3,50	1,98	-0,11	121
1,96	2,05	4,02	3,84	4,20	1,99	0,06	36
1,97	2,21	4,35	3,88	4,88	2,01	0,20	400
1,99	1,85	3,68	3,96	3,42	2,03	-0,18	324
2,01	1,88	3,78	4,04	3,53	2,05	-0,17	289
2,02	2,10	4,24	4,08	4,41	2,06	0,04	16
2,04	1,93	3,94	4,16	3,72	2,09	-0,16	256
2,05	2,06	4,22	4,20	4,24	2,10	-0,04	16
2,06	2,24	4,61	4,24	5,02	2,11	0,13	169
2,07	2,21	4,57	4,28	4,88	2,12	0,09	81
2,08	2,03	4,22	4,33	4,12	2,13	-0,10	100
2,10	2,35	4,93	4,41	5,52	2,15	0,20	400
2,11	2,21	4,66	4,45	4,88	2,16	-0,05	25
$\Sigma 50,03$	51,14	98,86	96,67	101,53	—	—	0,43

$$\tau_p = 1,94 - 2,06 \sqrt{\frac{0,43}{26 \cdot 24} \left[ 1 + \frac{26^2 (1,93 - 1,91)^2}{2513,45 - 2503,0} \right]} = 1,94 - 0,08 = 1,86 \text{ кг/см}^2.$$

В заключение остановимся на вопросе о том, с какой точностью необходимо определять нормативные и расчетные характеристики. Выше было показано, что точность определения модуля деформации должна быть не менее 10%. К этому выводу можно прийти и следующим образом. Как известно, осадка фундамента определяется по формуле  $S = \frac{P}{E} f(\alpha, h)$ , где  $P$  — нагрузка,  $\alpha$  — коэффициент изменения дополнительного давления в грунте;  $h$  — толщина элементарного слоя. При постоянной нагрузке, используя известные зависимости теории ошибок, получим:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta E}{E},$$

где  $\Delta S$  — допускаемая погрешность в определении осадки;  
 $\Delta E$  — допускаемая погрешность в определении модуля деформации.

Точность инженерного расчета не превышает 10%, поэтому

$$\frac{\Delta S}{S} = 0,1 = \frac{\Delta E}{E} \text{ и } \Delta E = 0,1E.$$

Из выражения для расчета модуля деформации  $E = \frac{1+\epsilon}{a}$ , где  $\epsilon$  — коэффициент пористости,  $a$  — коэффициент сжимаемости, применив принцип равных влияний, легко получить

$$\Delta a = 0,5a \frac{\Delta E}{E} = 0,5 \frac{\Delta S}{S};$$

$$\Delta \epsilon = 0,5(1 + \epsilon) \frac{\Delta E}{E} = 0,5(1 + \epsilon) \frac{\Delta S}{S}.$$

Например, при  $a = 0,007 \text{ см}^2/\text{кг}$  и  $\epsilon = 0,52$   $E = 217 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Принимая  $\frac{\Delta S}{S} = 0,1$ , находим  $\Delta a = 0,5 \cdot 0,007 \cdot 0,1 = \pm 0,0003 \text{ см}^2/\text{кг}$ ,

$\Delta \epsilon = 0,5 \cdot 1,52 \cdot 0,1 = \pm 0,08$ . Тогда,  $E = \frac{1+(0,52 \mp 0,08)}{0,007 \pm 0,0003} \text{ кг}/\text{см}^2$ .

Значения модуля деформации по комбинации различных знаков составляют 198, 219, 219, 239  $\text{кг}/\text{см}^2$ . Наибольшая абсолютная ошибка, получаемая при самом невыгодном сочетании знаков погрешностей коэффициента пористости (наибольшее значение) и коэффициента сжимаемости (наименьшее значение), равна 22  $\text{кг}/\text{см}^2$ , что соответствует относительной ошибке 10%.

Нагрузка под подошвой фундамента, согласно СНиПу, не должна превышать величины

$$R'' = (Ab + Bh) \gamma + Dc'',$$

где коэффициенты  $A, B, D$  зависят от угла внутреннего трения;  $b$  — наименьшая сторона фундамента;  $\gamma$  — объемный вес породы;  $c''$  — нормативное сцепление.

Из основных формул теории ошибок легко получить следующие зависимости:

$$\text{при } \varphi = \text{const}, c = \text{const} \quad \Delta \gamma = \gamma \frac{\Delta P}{P} = \gamma \frac{\Delta S}{S},$$

$$\text{при } \varphi = \text{const}, \gamma = \text{const} \quad \Delta c = c \frac{\Delta P}{P} = c \frac{\Delta S}{S}.$$

Анализ приведенной выше зависимости показывает, что для того, чтобы относительная ошибка при определении нормативной нагрузки не превышала 5—10%, погрешность в значении угла внутреннего трения должна быть не более 0,5—1°. Например, при



$\varphi = 28^\circ$ ,  $c = 0,2 \text{ кг/см}^2$ ,  $\gamma = 2,18 \text{ г/см}^3$ ,  $b = 1 \text{ м}$ ,  $h = 1 \text{ м}$ .  $R^n = (0,98 \cdot 1,0 + 4,93 \times 1,0) \cdot 2,18 + 7,4 \times 2 = 27,7 \text{ Т/м}^2 = 2,77 \text{ кг/см}^2$ . При  $\frac{\Delta S}{S} = 0,1$   
 $\Delta\gamma = 0,1\gamma = \pm 0,22 \text{ г/см}^3$ ,  $\Delta c = 0,1c = \pm 0,02 \text{ кг/см}^2$ .

Принимая во внимание различное сочетание знаков, получим, что наименьшее значение  $R^n$  составит  $2,61 \text{ кг/см}^2$ , а наибольшее —  $2,93 \text{ кг/см}^2$ . Это дает относительную ошибку в определении нормативного давления всего 5,8%.

Таким образом, для моренных отложений допустимы следующие погрешности в определении нормативных и расчетных показателей их свойств: угол внутреннего трения  $0,5\text{—}1^\circ$ , сцепление  $0,03\text{—}0,05 \text{ кг/см}^2$ , объемный вес порядка  $0,2 \text{ г/см}^3$ , коэффициент сжимаемости  $0,0002\text{—}0,0004 \text{ см}^2/\text{кг}$ , коэффициент пористости  $0,05\text{—}0,08$ , модуль деформации не менее  $15\text{—}40 \text{ кг/см}^2$ .

## Глава VI

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В настоящее время большинство исследователей считает, что для моренных отложений характерно отсутствие закономерностей в изменении состава и свойств в пространстве, а морену рассматривает как беспорядочное скопление обломков разных размеров, состав и физико-механические свойства которых нельзя оценивать обобщенными показателями.

Накопление и анализ громадного фактического материала показали, что моренным образованиям не в меньшей степени, чем отложениям других генетических типов, присущи определенные закономерности [92, 66, 119 и др.]. При этом закономерности изменения состава и свойств моренных отложений в целом и морен подформаций определенных оледенений в каждом из регионов имеют специфические черты и должны анализироваться отдельно. Ниже рассматриваются основные из этих закономерностей.

Цвет морены определяется составом пород, ассимилированных ледником, а также процессами выветривания и почвообразования. Так, в районе развития нижекембрийских глин морена имеет зеленоватые и голубоватые оттенки; моренные отложения, залегающие на красноцветных девонских песчаниках, приобретают бурый цвет; серые и светлые тона характерны для морены, покрывающей карбонатные породы. В районе Архангельска, где морена перекрывает темные морские глины и суглинки, по цвету ее трудно отличить от подстилающих пород. Однако связь цвета морены и подстилающих пород не является повсеместной. Самые верхние горизонты моренной толщи часто окрашены в бурые тона в результате воздействия процессов выветривания и почвообразования. Ожелезнение приводит к появлению бурых, коричневых и красноватых оттенков, закисные процессы придают морене зеленоватую и серую окраску, органические вещества окрашивают ее в темно-серые и

черные цвета [61]. Цвет морены закономерно изменяется от бурого к серому на контакте с озерно-ледниковыми, древними и современными болотными отложениями. Таким образом, в цветовом отношении морена может быть двух- и даже трехслойной.

Валуны являются обязательной составной частью моренных отложений. Обычно строгой закономерности в распределении их по разрезу не наблюдается, хотя часто отмечается увеличение содержания валунов в нижних и верхних горизонтах моренной толщи. Это характерно для валуно-прочных пород. Валуны, сложенные осадочными породами, обычно немногочисленны и концентрируются на границе раздела ледниковых и дочетвертичных отложений. Содержание валунов, гальки и гравия уменьшается к югу от центра оледенения. В Мурманской области и в Карелии количество валунов изменяется в пределах 15—25%, достигая местами 60—70% и более, а в Белоруссии часто отмечаются лишь единичные обломки размером более 100 м.

Распределение галечно-гравийного материала по разрезу подчиняется тем же закономерностям, что и распределение валунов. В изменении количества и состава гальки и гравия по площади также имеются некоторые закономерности. Первая из них заключается в том, что петрографический состав гальки и гравия в большей степени зависит от состава подстилающих пород, чем состав валунов. Поэтому морены, залегающие на осадочных породах, часто содержат много гальки и гравия этих пород. Так, например, морена, залегающая на известняках ордовикского плато, местами почти нацело состоит из гальки и гравия карбонатного состава с песчаным заполнителем. Следует подчеркнуть, что сказанное выше справедливо лишь в том случае, если морена залегает на породах коренной основы. В этом отношении показательна морена, развитая на участке Нарвской ГЭС. Здесь нижняя морена подстилается известняками, доломитами, песчаниками и содержит обломки этих пород. Отличительной особенностью верхней морены является отсутствие обломочного материала такого состава. Галька и гравий в ней сложены изверженными породами. Вторая закономерность, намечающаяся в распределении гальки и гравия по площади, состоит в том, что в направлении с севера на юг количество гальки и гравия уменьшается. В пределах Кольского полуострова и севера Карелии их содержание изменяется от 25 до 50%, в остальной части Карелии — от 15 до 40%, в юго-восточной части Карелии и в Ленинградской области — от 5 до 20%, а в Белоруссии — от 3 до 15%.

Указанные закономерности, раскрывая общий характер явления, не исключают того, что в южных районах могут встречаться скопления крупных обломков и, наоборот, в северных — отсутствовать. Так, например, в московской морене вблизи Славгорода и в днепровской морене у Полоцка были отмечены валунники гранитного состава мощностью от 3—4 до 12 м, а в Архангельске моренные суглинки практически не содержат валунов.

Петрографический состав валунов существенно меняется с севера на юг. В этом направлении уменьшается содержание пород, развитых в области, относимой к центру оледенения. В Мурманской области и Карелии преобладают обломки местных пород. В пределах Балтийского щита отношение пород гранитного состава ко всем остальным изменяется от 0,2 (Пальеозерская ГЭС) до 0,5 (Валазминская ГЭС), а в бассейне Березины, по подсчетам А. В. Матвеева, это отношение в среднем равно для валдайской морены 2,9 и для московской морены 3,9, что свидетельствует о резком уменьшении содержания валунов диабазов, кварцитов, песчанчиков и сланцев к югу. Доля участия местного материала зависит для каждого из районов от возраста морены. Коэффициент влияния местных пород (отношение роговой обманки и граната к дистену, ставролиту и силлиманиту) составляет в районе Березины для валдайской морены 41, для московской 24,7, для днепровской 19,6 и для окской от 17,6 до 26. Закономерно уменьшается от более молодых морен к более древним и коэффициент источника питания (отношение роговой обманки к эпидоту).

Е. В. Рухиной установлено, что минеральный состав песчаных фракций морен в разных районах различен: в направлении с севера на юг уменьшается содержание роговой обманки и увеличивается количество рудных минералов, в этом же направлении снижается содержание тяжелой фракции и возрастает содержание кварца в легкой фракции песка. А. И. Коптев [55] отмечает увеличение коэффициента выветрелости (отношение устойчивых минералов к неустойчивым) в направлении от центра оледенения к его южной границе. Коэффициент выветрелости легких минералов моренных отложений изменяется от 1,10 в районе Кольского полуострова (1,03 для Ленинградской и 1,50 для Калининской областей) до 7,2 на юге Белоруссии. Коэффициент выветрелости закономерно увеличивается сверху вниз по мере приближения к породам коренной основы.

Моренным отложениям всех оледенений в пределах Северо-Запада Европейской части СССР присуще разнообразие гранулометрического состава, выражающееся в том, что литологические разновидности морены содержат частицы всех размеров. Однако средний состав каждой из этих разновидностей на участках, разделенных сотнями километров, оказывается практически одинаковым. В качестве примера в табл. 42 приведен средний состав песков, супесей и суглинков морены последнего оледенения. В этой таблице сравниваются частицы размером менее 2 мм, так как установить достаточно строгих количественных закономерностей в распределении крупнообломочной составляющей пока не удастся ввиду технических трудностей, возникающих при определении содержания гравия, гальки и валунов. В связи с этим последние изучены в количественном отношении еще недостаточно. Как уже указывалось выше, в составе морены присутствуют все фракции. Это позволяет отличать моренные отложения от других генетических

## Влияние пород коренной основы на гранулометрический состав морены

Номер участка	Гранулометрический состав, % (размеры частиц, мм)					Породы коренной основы
	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,06	0,05-0,002	<0,002	
<i>Пески разнозернистые</i>						
9	25	20	37	17	1	Граниты
18	32	20	33	13	2	Гнейсы, амфиболиты, граниты
<i>Пески мелкозернистые</i>						
6	21	19	43	15	2	Гранито-гнейсы, амфиболиты
25	20	18	44	16	2	Гнейсы, биотитовые
8	21	21	44	13	1	Граниты
28	21	20	44	14	1	Граниты, гнейсо-граниты, гнейсы
<i>Пески пылеватые</i>						
11	16	18	38	26	2	Кристаллические сланцы, метадиабазы
26	14	12	46	26	2	Граниты, гнейсо-граниты, гнейсы
23	12	16	49	21	2	Гнейсы, гранито-гнейсы, граниты
33	13	14	50	22	1	Граниты, гнейсы биотитовые
<i>Суглеси</i>						
12	15	17	40	25	3	Граниты
59	12	14	45	25	4	Глины, песчаники
16	16	22	41	16	5	Гнейсы, амфиболиты
21	16	17	42	21	4	Гнейсы, гнейсо-граниты, габбро-нориты, амфиболиты
34	21	7	38	29	5	Граниты, гнейсо-граниты, окварцованные доломиты
17	15	10	47	21	7	Гранито-гнейсы, мигматиты
53	11	14	47	21	7	Гранито-гнейсы, граниты
<i>Суглинки</i>						
53	8	4	36	36	16	Гранито-гнейсы, граниты
64	5	6	36	35	18	Известняки
<i>Суглинки пылеватые</i>						
56	7	8	28	43	14	Известняки, доломиты, глины
59	6	5	29	44	16	Глины, песчаники
58	8	7	30	43	12	Глины, песчаники, пески
70	7	6	27	48	12	Известняки, доломиты
<i>Суглинки сильнопылеватые</i>						
63	11	3	14	54	18	Глины
73	3	3	21	57	16	Доломиты, известняки, песчаники
77	3	2	11	67	17	Доломиты

типов пород рассматриваемого района по гранулометрическому составу. Необходимо подчеркнуть, что содержание мелкозема, т. е. фракций размером менее 2 мм, для песчаной и супесчаной морен составляет не менее 40%, а для песчаной морены Псковской и Новгородской областей и Белоруссии — 70—85%. Количество этих же частиц в суглинистой морене обычно равно 75—85%. Таким образом, свойства морены, как правило, определяются ее мелкоземом.

Несмотря на то что в пределах даже небольших по площади участков встречаются две-три разновидности морен, можно выделить крупные районы, где преобладает та или иная из этих разновидностей. В пределах запада Кольского полуострова встречаются главным образом пески, которые на севере Карелии переходят в супеси. В центральной и юго-западной частях Карелии преобладает песчаная морена, а на юго-востоке — супесчаная. Моренные отложения Архангельской, Вологодской, частично Новгородской и Псковской областей представлены в основном суглинками. В северо-западной части Псковской области чаще всего отмечаются пылеватые глинистые пески, сменяющиеся к юго-востоку супесями и суглинками. В Белоруссии супеси и суглинки близки по составу, но последние встречаются чаще и лишь на юге. В области полесий преимущественно развиты пылевато-глинистые пески.

Районы развития морен различного состава показаны на рис. 1. Эти морены являются разновозрастными, но относятся к первому от поверхности моренному горизонту, служат основаниями сооружений и поэтому показаны на карте без расчленения.

Основными факторами, определяющими состав морены, являются: рельеф и состав пород ложа ледника, состав и особенности материала, переносимого ледником, удаленность от центра оледенения, динамика ледникового покрова, условия послеледниковой (либо межледниковой) обстановки, процессы изменения морен и др.

Наличие в разных районах морен, близких по составу, объясняется сочетанием трех основных факторов: 1) породы, из которых образовалась морена, были близки по составу; 2) фациальные условия отложения моренного материала были идентичны и 3) в этих районах в периоды послеледниковья (либо межледниковья) существовали близкие физико-географические условия. Нельзя согласиться с категоричным утверждением, что состав морен во всех случаях определяется исключительно составом пород коренного ложа. Действительно, подобная зависимость выявляется весьма часто. Так, на изверженных и метаморфических скальных породах Балтийского шита преимущественно развиты песчаные морены, а на коренных породах этого же региона, представленных глинами, известняками и доломитами, преобладают суглинистые морены. Известное сходство состава с подстилающими породами обнаруживают лужская морена района Ленинграда, подстилаемая кембрийскими глинами; ошашковская морена Архангельска, залегающая на межледниковых морских суглинках; московская и днепро-ровская морены Белоруссии, перекрывающие девонские песчаники,

и глины. Довольно часто встречаются так называемые локальные, «местные» морены, приуроченные к выходам коренных пород и отличающиеся по составу от развитой в данном районе морены («меловая» морена Белоруссии в районе городов Кричева, Бреста и др.).

Подобных примеров можно привести немало. Однако следует подчеркнуть, что известны не менее частые случаи, когда связь состава морены с подстилающими породами не прослеживается. Это относится прежде всего к районам, где моренные отложения залегают на мощной толще межледниковых и более древних ледниковых образований. Кроме того, разрушительная работа ледника привела в ряде мест к почти полному уничтожению пород, служивших его основанием. Это не дает возможности объяснить каждый факт нахождения морены того или иного состава в данной точке. Однако не вызывает сомнения, что во многих случаях образование супесчаной и суглинистой морен связано с переработкой ледником существенно глинистых образований. Так, образование супесей на севере Карелии, приуроченных к депрессиям коренного ложа, вероятно, связано с переработкой существенно глинистых отложений, заполнявших эти депрессии в доледниковое время. В пределах Белоруссии дочетвертичные отложения состоят преимущественно из песчаных и карбонатных пород, глинистые породы имеют подчиненное развитие. В то же время моренные отложения всех оледенений представлены в основном глинистыми разностями, мощность которых определяется десятками метров. Образование глинистых моренных отложений можно объяснить либо привнесом огромного количества глинистого материала ледником, что мало вероятно, либо глубокой переработкой различных по составу пород в глинистый материал.

Физико-механические свойства, как известно, определяются в значительной мере вещественным составом. Это подтверждается данными, приведенными в табл. 43, из которой следует, что суглинки с одинаковым гранулометрическим и минеральным составом имеют одни и те же показатели свойств.

При сравнении одновозрастных морен разных районов, имеющих один и тот же литологический состав, оказывается, что и для них характерна устойчивость средних значений показателей свойств. Примерно в одинаковых пределах изменяются и крайние значения этих показателей.

Постоянство средних величин показателей физико-механических свойств для районов, значительно удаленных друг от друга, является основной и наиболее важной инженерно-геологической особенностью моренных отложений. Следует, однако, иметь в виду, что указанная закономерность может нарушаться при различных гидрогеологических условиях или разном минеральном составе моренных отложений, а также под влиянием других факторов.

Так, например, в районе Череповецкого гидроузла суглинки московской морены имеют обычно полутвердую и тугопластичную консистенцию, характеризуемую средним значением показателя

## Физические свойства моренных суглинков различных районов

Номер участка	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес скелета, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент пористости	Естественная влажность, %
<i>Суглинки пылеватые</i>						
56	2,72	2,18	1,91	30	0,43	14
59	2,70	2,24	1,95	28	0,39	15
70	2,74	2,19	1,94	20	0,41	13
40	2,73	2,14	1,86	32	0,47	15
41	2,75	2,17	1,90	31	0,45	14
<i>Суглинки сильнопылеватые</i>						
63	2,71	2,10	1,75	36	0,56	20
73	2,72	2,07	1,75	36	0,56	18
77	2,73	2,07	1,72	37	0,59	20
78,79	2,73	2,06	1,75	36	0,56	18

консистенции 0,1. Однако на одном из участков гидроузла, где морена залегает в бортах и днище озера, показатель консистенции увеличивается до 0,35 (среднее из 73 опытов), причем встречаются значения этого показателя 0,88; 0,91; 1,11 и даже в одном случае 1,45. Гранулометрический состав морены на этом участке и по гидроузлу в целом один и тот же: содержание глинистых частиц соответственно 13 и 12%, а пылеватых — 30 и 32%.

Необходимо отметить, что постоянство средних значений показателей состава и свойств разновозрастных морен различных регионов является статистической закономерностью, проявляющейся при рассмотрении значительного количества определений. Средние показатели состава и свойств моренных отложений подформаций различных оледенений практически не отличаются, если сопоставлять их в целом по регионам, но для одной и той же точки эти различия могут быть существенными.

Указанное обстоятельство является следствием того, что на огромной территории каждого из оледенений существовали все типы фациальных условий, присущие ледниковой формации в целом. Однако в каждой конкретной точке фациальные условия формирования и изменения «верхней» и «нижней» морен обычно отличались, что и находит выражение в различии их состава и физико-механических свойств.

При соответствующих геологических условиях в пределах даже небольших по площади участков удастся выявить определенные закономерности в изменении физико-механических свойств моренных отложений. На рис. 20 схематически изображено изменение с северо-востока на юго-запад средних значений показателей состава и свойств лужской морены в пределах Ленинграда. Приве-

денные данные показывают, что закономерное увеличение содержания глинистых частиц, естественной влажности и уменьшение объемного веса скелета приводят к снижению прочностных и деформационных характеристик морены.

Отмечается также четкое увеличение пределов пластичности и пористости с северо-востока на юго-запад. В пределах каждого участка состав и свойства морены весьма неоднородны, но закономерный характер изменения

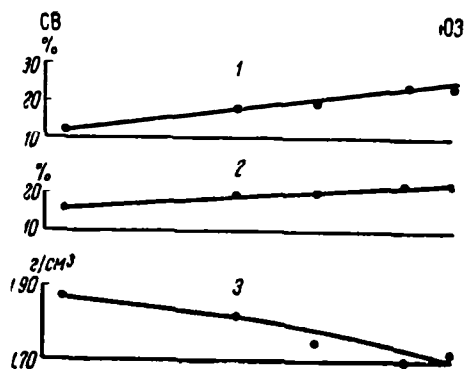


Рис. 20. Изменение состава и свойств лужской морены в районе Ленинграда: 1 — содержание частиц меньше 0,002 мм; 2 — естественная влажность; 3 — объемный вес скелета

ее состава и свойств по площади очевиден. Эти закономерности объясняются тем, что в южном направлении в общем повышается кровля нижнекембрийских глин, и морена зачастую непосредственно залегает на них. Двигаясь по глинам, ледник обогащался глинистым материалом и обломками подстилающих пород, что сказалось на окраске, составе и свойствах морены. В тех районах, где нижнекембрийские глины залегают на относительно больших глубинах, морена не носит следов обогащения этими глинами.

Отмеченные изменения состава и свойств моренных отложений вынуждают подходить к оценке лужской морены как основания и среды сооружений дифференцированно в каждом из изучаемых участков города. На севере Ленинграда морена отличается высокой плотностью, значительным сопротивлением сдвигу и низкой сжимаемостью. В южных районах моренные отложения характеризуются относительно высокой влажностью и сравнительно небольшим объемным весом. Здесь сопротивление сдвигу значительно ниже, чем на севере. На юге города встречаются наиболее сжимаемые разновидности моренных грунтов.

Исследованиями последних лет установлено, что для морены характерно двухслойное строение по вертикали [66, 91, 92]. В ряде случаев это связано с наличием в моренной толще абляционной и донной морен. Верхний слой отличается песчанистостью, меньшей плотностью и повышенной изменчивостью показателей состава и физико-механических свойств (табл. 44).

В других случаях свойства морены изменяются с глубиной при неизменном составе. Из рис. 21—23 видно, что плотность морены увеличивается по мере удаления от ее кровли. Это характерно как для супесчаной, так и для суглинистой морены различных регионов. Соответственно увеличивается прочность и уменьшается де-



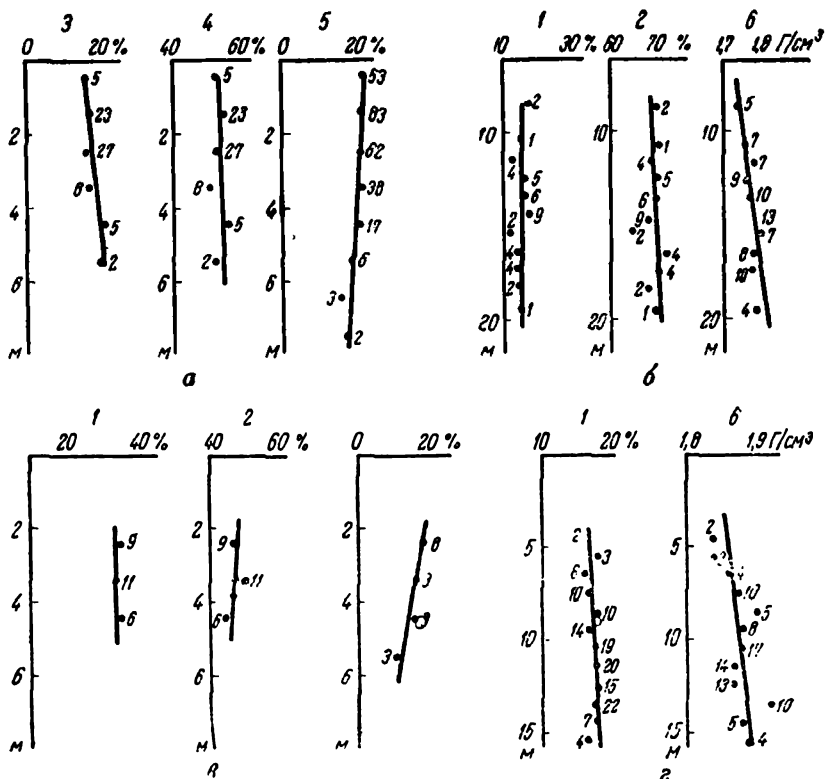


Рис. 21. Изменение состава и свойств моренных суглинков с глубиной (а — р-н Петрозаводска, б — р-н Ленинграда, в — Гатчинский р-н, г — Ленинградская обл. — Невская ГЭС). Содержание фракций размером: 1 — < 0,002 мм, 2 — 0,05—0,002 мм; 3 — 0,005 мм; 4 — 0,05—0,005 мм; 5 — естественная влажность; 6 — объемный вес скелета (цифры у точек — число определений)

Таблица 44

Изменение средних значений ( $\bar{X}$ ) и коэффициента изменчивости ( $\bar{V}$ ) с глубиной

Район	Зона	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>		Объемный вес, г/см <sup>3</sup>		Коэффициент гористости		Естественная влажность, %	
		$\bar{X}$	$V$	$\bar{X}$	$V$	$\bar{X}$	$V$	$\bar{X}$	$V$
Белоруссия	Верхняя	2,68	0,8	2,13	2,8	0,42	9,5	17	5,8
	Нижняя	2,68	0,4	2,21	1,8	0,38	7,8	20	5,0
Калужская обл. [66]	Верхняя	—	—	2,05	2,8	0,52	13,0	15	16,8
	Нижняя	—	—	2,19	1,4	0,40	8,5	12	10,5

формируемость моренных отложений. На этих же графиках показано изменение состава с глубиной. Для морены, развитой в пределах Ленинграда, содержание глинистой фракции остается

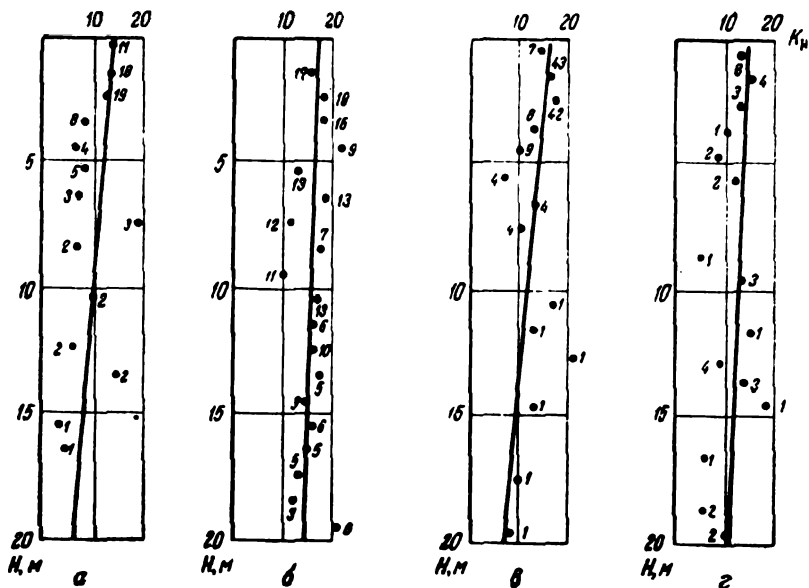


Рис. 22. Изменение коэффициента неоднородности моренных песков с глубиной

а — Хевоскоски ГЭС; б — Верхне-Туломская ГЭС; в — Серебрянская ГЭС; г — Иовская ГЭС (цифры у точек — число определений)

неизменным по мере удаления от поверхности, количество пыли на отдельных участках несколько увеличивается. В остальных изученных разрезах содержание глинистых частиц либо постоянно по глубине, либо незначительно возрастает. Количество пыли в одних случаях несколько увеличивается, а в других уменьшается. Все эти изменения настолько малы, что не могут сказаться на физических свойствах морены. Увеличение плотности морены Мурманской области и Карелии с глубиной подтверждается геофизическими методами [24].

Известно, что при соотношении ширины штампа и мощности сжимаемой толщи, превышающей 4 : 1, рассматривается однородная задача уплотнения грунта. В этом случае распределение напряжений и плотности по глубине аналогично распределению их в компрессионном приборе, т. е. практически постоянно. Указанное соотношение при воздействии ледников на подстилающие породы значительно превышало 4 : 1 и, следовательно, ледниковая нагрузка должна была бы выравнивать плотность морены по глубине. Не оказывается справедливым предположение о разуплотнении моренной толщи после снятия ледниковой нагрузки. Величина разуплотнения морены (подсчитанная в предположении, что объемный вес скелета в низах моренной толщи соответствует ее плотности, созданной в результате действия ледника, а объемный вес скелета

в верхних горизонтах сформировался вследствие разуплотнения) оказалась в четыре раза больше, чем по результатам компрессионных опытов. В то же время известно, что разуплотнение образцов в приборе больше, чем в природе из-за разной скорости снятия уплотняющей нагрузки и неизбежного нарушения слоения образца при его отборе, транспортировке и загрузке в прибор. Таким образом, изменение плотности и влажности моренных суглинков по разрезу не является следствием их разуплотнения.

Несмотря на разнородность состава морены, существует тенденция к уменьшению коэффициента неоднородности с глубиной, а в ряде случаев закономерно изменяется по вертикали и состав (рис. 21, 22, 23, 24, 25). Объяснение установленным закономерностям следует искать в условиях формирования свойств моренных отложений.

Анализ показал, что средние квадратические отклонения показателей разных свойств, вычисленные как для больших, так и для малых выборок, незначительно отличаются для разных по возрасту и составу морен. Это позволяет рекомендовать значения средних квадратических отклонений и коэффициентов вариации, которые получены по результатам обработки около 9 тыс. частных значений (табл. 45).

В настоящее время общепринятых критериев оценки однородности пород для инженерно-геологических целей не существует. М. М. Максимов для оценки однородности морен центральных районов предложил показатель неоднородности, численно равный отношению среднего квадратического отклонения к допускаемой ошибке парного определения [66].

Е. Н. Коломенский рекомендует в качестве показателя однородности принять частное от деления среднего квадратического отклонения на абсолютную величину разности среднего значения показателя и ближайшего к нему краевого значения классификационного интервала, причем под классификационным интервалом понимается интервал значений показателя, предусмотренный СНиПами и принятыми классификациями при разбивке породы на классы [51]. Подобный метод определения однородности носит условный характер, так как крайние значения классификационных показателей, приведенные в табл. 13 СНиП II-Б.1-62, ничем не обо-

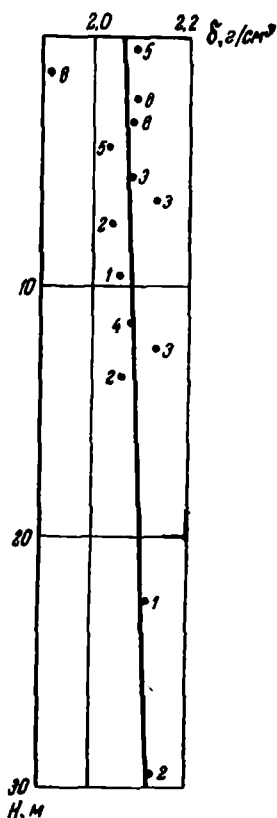


Рис. 23. Изменение объемного веса скелета моренной супеси с глубиной (Иовская ГЭС). Цифры у точек — число определений

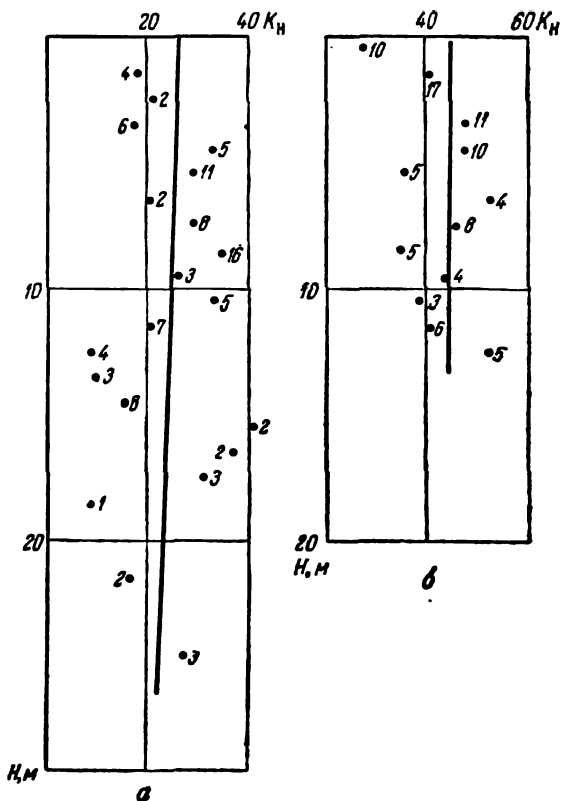


Рис. 24. Изменение коэффициента неоднородности моренных супесей с глубиной

а — Князегубская ГЭС; б — Иовская ГЭС (цифры у точек — число определений)

Таблица 45

Средние квадратические отклонения и коэффициенты вариации показателей свойств моренных отложений

Статистическая характеристика	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости	Естественная влажность, %	Пределы, %		Угол внутреннего трения	Сцепление, кг/см <sup>2</sup>	Модуль деформации (лабораторный), кг/см <sup>2</sup>	Сопrotивление статическому зондированию, кг/см <sup>2</sup>
					текучести	раскалывания				
Среднее квадратическое отклонение	0,02	0,05	0,06	4	4	3	6	0,02—0,20	50	5
Коэффициент вариации, %	1	3	15	20	20	20	30	30	50	30

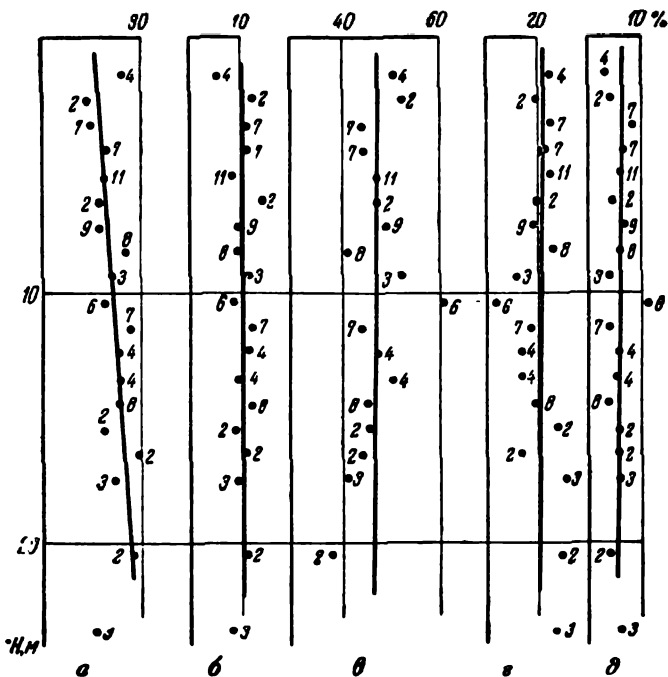


Рис. 25. Изменение гранулометрического состава морены с глубиной (Княжегубская ГЭС)

Частицы размером: а — 2—0,5 мм; б — 0,5—0,25 мм; в — 0,25—0,05 мм; г — 0,05—0,002 мм; д — меньше 0,002 мм

своны. С другой стороны, для одних показателей (удельный вес, влажность, объемный вес и др.) общепринятые классификации отсутствуют, а для других существует несколько классификаций. Так, пески могут попасть в одну группу по однородности, если использовать уже упоминавшиеся таблицы, и совсем в другую группу, если классифицировать их по коэффициенту пористости в соответствии с табл. 2 тех же СНиП.

Выделенный при инженерно-геологических исследованиях слой может считаться однородным, если одновременно выполняется условие однородности как суммарно по всем основным показателям физических свойств, так и по каждому из них. С этой целью в качестве критерия однородности предлагается величина  $K = \frac{\sigma}{\Delta}$ , где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение значений показателя;  $\Delta$  — абсолютная величина максимальной разности среднего  $\bar{X}$  и крайнего  $x_{кр}$  (минимального или максимального) значений.

Однородный в той или иной степени слой должен иметь значения  $K$  для каждого показателя больше 0,33. Однако поскольку однородность разных показателей неодинакова, то для оценки об-

шей однородности слоя вводится общий коэффициент однородности ( $K_o$ ), представляющий собой сумму коэффициентов однородности отдельных показателей. Этот коэффициент рекомендуется вычислять для четырех показателей — объемного веса ( $K_v$ ), естественной влажности ( $K_w$ ) и пределов пластичности ( $K_{w_T}$ ,  $K_{w_P}$ ),

$$K_o = K_v + K_w + K_{w_T} + K_{w_P}.$$

Вообще говоря, чем больше рассматривается частных значений коэффициентов однородности, тем меньше вероятность включения в данный слой величин показателей, не относящихся к изучаемому слою. Коэффициент однородности резко реагирует на значения, отличающиеся от типичных для слоя, и показывает, какие из них подлежат исключению или требуют дополнительного анализа. Коэффициент общей однородности может использоваться также для сравнения однородности разных слоев.

По величине частного и общего коэффициента однородности породы классифицируются в соответствии с табл. 46.

Таблица 46

**Классификация пород по однородности**

Степень однородности пород	Максимальная разность среднего и крайнего значений показателя $\Delta$	Коэффициент однородности для отдельных показателей $K$	Общий коэффициент однородности $K_o$
Весьма однородные	$\Delta < \sigma$	$K > 1$	$K_o > 4$
Однородные . . . . .	$\sigma < \Delta < 2\sigma$	$0,5 < K < 1$	$2 < K_o < 4$
Относительно однородные	$2\sigma < \Delta < 3\sigma$	$0,33 < K < 0,5$	$1,3 < K_o < 2$
Неоднородные	$\Delta > 3\sigma$	$K \leq 0,33$	$K_o < 1,3$

Примечание:  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение.

В качестве примера в табл. 47 приведена характеристика моренных суглинков и супесей разных районов по однородности.

Представляет интерес сопоставление однородности морены и пород некоторых других генетических типов. Из табл. 48 видно, что по однородности моренные суглинки и супеси существенно не отличаются от пород других генетических типов. Еще в большей степени указанное обстоятельство выявляется при сравнении моренных и покровных отложений на ограниченных по площади участках на примере одного из районов Белоруссии (табл. 49). Интересно отметить, что по визуальному осмотру покровные супеси представляются гораздо более однородными, чем морена, благодаря отдельным зернам гравия, беспорядочно разбросанным в моренной толще, которые не оказывают существенного влияния на физические свойства моренных супесей. В то же время обилие различных по размерам макропор, ходов землероев, следов корневой системы и т. д. в покровных отложениях существенно влияет на изменчивость свойств.

## Оценка однородности моренных суглинков

Номер участка	Район	$K_{\gamma}$	$K_{\psi}$	$K_{\psi T}$	$K_{\psi P}$	$K_o$	Степень однородности
<i>Суглинки</i>							
38	г. Архангельск	0,50	0,33	0,35	0,31	1,49	Относительно однородные
41	г. Нядома	0,40	0,60	0,40	0,70	2,10	Однородные
39	г. Пинега	0,44	0,50	0,30	0,53	1,77	Относительно однородные
40	р. Икса	0,33	0,25	0,30	0,28	1,16	Неоднородные
50	г. Вологда	0,50	0,33	0,34	0,20	1,37	Относительно однородные
<i>Супеси</i>							
116	г. Светлогорск	0,33	0,33	0,33	0,50	1,49	То же
113	г. Гомель	0,57	0,35	0,67	1,00	2,59	Однородные
81	г. Новгород	0,33	0,68	0,50	0,33	1,84	Относительно однородные

Следовательно, и покровные, и моренные супеси по своим физическим свойствам оказываются однородными, причем по величине общего коэффициента однородности моренные супеси более однородны, чем покровные. В. М. Фурса на основании анализа многочисленных образцов моренных, озерно-ледниковых и морских грунтов района Ленинграда получил наиболее низкие средние квадратические отклонения показателей состава и физико-механических свойств для моренных глинистых пород.

Таким образом, по характеру изменчивости свойств моренные отложения не отличаются от пород других генетических типов.

## Глава VII

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Вопросы образования моренных отложений в настоящее время еще не могут считаться в достаточной степени изученными. Это объясняется как труднодоступностью основания современных ледниковых покровов, так и тем, что широкие исследования ледниковых щитов, по сути дела, начались сравнительно недавно. Важно отметить, что антарктические и гренландские ледниковые покровы перекрывают изверженные и метаморфические породы, в то время как в пределах Европейской части СССР ледники воздействовали и на мощную толщу осадочных образований.

Следует указать на отсутствие единства взглядов как на количество оледенений, так и на механизм образования морен.

Движение ледников носит сложный характер. Большинство тео-

Оценка однородности пород некоторых генетических типов

Район	Литологический состав	Возраст						Степень однородности
			$K_{\gamma}$	$K_{\psi}$	$K_{\psi T}$	$K_{\psi P}$	$K_{\sigma}$	
г. Ленинград	Глина	$St_1$	0,70	0,64	0,38	0,67	2,39	Однородные
р. Кама	»	$P_2$	0,70	0,58	0,70	0,55	2,53	»
Донбасс		$Tr$	0,43	0,38	0,40	0,38	1,59	Относительно однородные
Юг Украины	Лёссовые суглинки	$Q_{III}$	0,37	0,23	0,27	0,25	1,12	Неоднородные
р. Нарова	Глины ленточные	$Q_{II-III}$	0,52	0,38	0,48	0,47	1,85	Относительно однородные
р. Нева	То же	$Q_{III}$	0,44	0,32	0,34	0,62	1,72	То же
г. Ленинград	» »	$Q_{III}$	0,62	0,66	0,62	0,80	2,70	Однородные
р. Кама	Суглинки аллювиальные	$Q_{III}$	0,73	0,80	0,83	0,80	3,16	»

Таблица 49

Оценка однородности покровных и моренных супесей (20 определений)

Характеристика	Объёмный вес, г/см <sup>3</sup>	Естественная влажность, %	Влажность на пределе, %		Общий коэффициент однородности $K_{\sigma}$
			теку-чести	раскаты-вания	

## Покровные супеси

Среднее значение . . . . .	1,98	19	26	22	—
Среднее квадратическое отклонение . .	0,07	1,7	1,3	1,4	—
Коэффициент вариации, % . . . . .	3,5	8,9	5,0	6,4	—
Коэффициент однородности $K$ . . . . .	0,58	0,57	0,43	0,70	2,28

## Моренные супеси

Среднее значение . . . . .	2,21	10	15	12	—
Среднее квадратическое отклонение . .	0,04	0,7	1,2	0,8	—
Коэффициент вариации, % . . . . .	1,8	7,0	8,0	6,7	—
Коэффициент однородности $K$ . . . . .	0,45	0,70	0,60	0,80	2,55

рий, описывающих этот процесс, справедливы лишь в определенных условиях.

Согласно гидродинамической теории течения, лед ведет себя как вязкая жидкость. Теории пластического течения рассматривают лед как упруго-пластическое тело, движение которого начинается после превышения напряжением сдвига предела упругости льда в основании ледника. По теории глыбового скольжения изменение условий движения ледника приводит к появлению в нем дополни-



тельных напряжений, вызывающих глыбовое скольжение по ложу. Усиление скалывающих напряжений на контакте с ложем способствует образованию разрывов в теле льда. В связи с этим часть глыбового скольжения происходит по плоскостям разрывов. При возникновении в теле льда дополнительного движения оно передается в сторону наименьшего сопротивления. Поэтому на участках уменьшения уклона ледникового ложа и увеличения содержания моренного материала движение приобретает вертикальную составляющую и идет по плоскости внутренних разрывов, поднимая таким образом обломки с основания ледника к его поверхности [122].

Теория вязко-пластического течения исходит из предположения, что скорость течения льда очень мала и подчиняется закону движения вязкой ньютоновской жидкости до значения напряжения сдвига, меньшего критического, которое близко к пределу упругости. При превышении предела упругости скорость течения резко увеличивается, приобретая характер пластического течения и переходя в глыбовое скольжение [48]. Таким образом, теория вязко-пластического течения имеет обобщающий характер. В настоящее время подавляющее большинство гляциологов согласны с существованием в леднике всех видов движения при преобладании одного из них в определенных условиях, т. е. лед может вести себя одновременно как пластичное и как твердое тело. Глыбовое скольжение по ложу, в том числе движение по плоскостям внутренних разрывов, обуславливает эрозионную деятельность ледников.

Многие исследователи рассматривают механизм образования морен как чисто механический процесс экзарации и аккумуляции. Р. Флинт [109] говорит об эффекте выпаживания и истирания в зоне контакта льда и коренной породы, приводящем к образованию тонкораздробленного материала, причем количественно эффект выпаживания существеннее, чем истирания. Форель и Грипп связывают образование морен с накоплением в основании ледника эродированного материала, который поднимается по трещинам к поверхности в ходе движения ледника, а затем после таяния оседает в виде рыхлых накоплений. В. А. Приклонский [87] считает, что в случае накопления обломков в подшве ледника основным фактором формирования свойств морены будет служить его давление, а при оседании рыхлого материала в процессе вытаивания — высыхание.

Следствием господства сугубо механической теории образования морен явился широко распространенный взгляд на моренные отложения как на грубую механическую смесь, состав и свойства которой не подчиняются никаким закономерностям. По мнению Ф. В. Котлова [57], при движении ледника под ним накапливались безводная механическая смесь, продукты срезания, дробления, перетирания, волочения и смешения верхних слоев пород. Эта смесь пород тут же одновременно уплотнялась ледником как огромным прессом высокого давления и уже на первой стадии литогенеза

приобретала свойства породы. По В. А. Приклонскому [87], глинистый материал в морене в значительной части образовался путем механического перетиранья движущимся льдом более крупных обломков, а не путем коллоидно-химического превращения во время химического выветривания. Это обусловило, по его мнению, повышенное содержание в моренных глинах и суглинках первичных минералов. кварца, полевых шпатов и т. д.

И. В. Попов [84] считает, что образование морен происходит только в результате механических сил, и делает вывод, что разнообразие морен не позволяет дать общую характеристику их физико-механических свойств. Подобные взгляды разделяются и другими исследователями. Рассмотрим в общем виде основные этапы формирования состава и физико-механических свойств моренных отложений по отдельным стадиям.

*Подготовка исходного материала.* Геологическая работа ледников привела к широкому развитию моренных отложений, простирающихся на тысячи километров и имеющих мощности до сотен метров. Площадь территории, подвергшейся днепровскому оледенению, составляет 1730 тыс. км<sup>2</sup>, а валдайского — 1400 тыс. км<sup>2</sup> [75]. Следовательно, было переработано огромное количество материала, отторженного ледником от пород, по которым он двигался. По данным Н. И. Николаева и А. И. Медянцева, объем морены в пределах европейской области развития днепровского оледенения превышает 17 тыс. км<sup>3</sup>. Средняя мощность пород, снесенных с территории Фенноскандии, по мнению различных авторов, составляет от 10 до 30 м [75]. С. А. Евтеев [35] определяет снос пород Восточной Антарктиды в 0,5 м/год. В значительно более подвижных альпийских ледниках годовая эрозия оценивается в 0,65—30 мм. По нашим подсчетам, объем моренных отложений только на территории Белоруссии достигает 6 тыс. км<sup>3</sup>.

Интенсивность ледниковой эрозии и количество материала, включенного в лед, зависят от многих факторов, среди которых основными являются: скорость движения льда, мощность ледника и длительность его воздействия на породы ложа, рельеф ложа, состав, состояние и свойства пород, по которым двигался ледник. Каждый из этих факторов отличается непостоянством, и, следовательно, разрушительная работа ледника приводит к различным результатам.

Разрушение пород в основании ледника происходит еще до деления их движущимся льдом. Как в периферической зоне, так и в области оледенения породы подвергаются воздействию агентов химического и физического выветривания. Последнее особенно активно проявляется в районах развития кристаллических пород. А. И. Коптев [55] считает, что в Фенноскандии ледник захватывал в основном продукты выветривания коренных пород. В. Л. Суходровский [101] наблюдал за процессами физического выветривания пород в приледниковой зоне Земли Франца-Иосифа, которое выражается в измельчении тонкого поверхностного слоя (до 1 мм).

В поставленном им опыте базальты, долериты и габбро превратились в материал, по составу близкий к супесям. В областях развития осадочных нескальных пород физическое выветривание имеет меньшее значение. По опытам Г. П. Мазурова и Е. С. Тихоновой [65] при многократном замораживании и оттаивании (до 700 циклов) состав песка изменился очень незначительно, а глины и суглинки после 216 таких циклов практически не изменились.

Весьма большую роль в разрушении пород коренного ложа играет химическое выветривание. Представление об области многолетнемерзлых пород как о зоне «химического покоя» противоречит как лабораторным исследованиям, так и наблюдениям в полярных областях, где обнаружены солевые выцветы и корки «пустынного загара» [27].

С. Л. Шварцев отмечает в ледниковых отложениях Сибири полностью разрушенные валуны габбро-долеритового состава. Выветрелые обломки гранитов и других кристаллических пород, сохранившие свою первичную форму, встречаются в моренных отложениях Белоруссии, Архангельской и Вологодской областей. Как показывают исследования, при замерзании пород происходит миграция водных пленок и химических элементов, а также протекают реакции, приводящие к изменению химического состава породы. При этом увеличивается содержание ионов калия и натрия, что способствует образованию минералов группы иллита, характерных для моренных отложений. Рассматривая различные факторы криогенеза, И. А. Тютюнов [106] приходит к выводу о накоплении в породах коллоидных частиц, что в свою очередь способствует активному протеканию процессов криогенеза. С. Г. Вишняков [21], основываясь на изучении минерального состава пород областей сноса, считает, что вопреки установившемуся мнению ледниковые отложения не представляют собой лишь простой продукт физического дробления; образование их происходило в сопровождении интенсивных процессов химического разложения неустойчивых, малоустойчивых, а частично и устойчивых минералов.

Роль химического выветривания в образовании материала, захватываемого ледником, подчеркивается и другими исследователями. Кроме того, в разрушении пород принимают участие бактерии, грибы, лишайники [33, 58, 81].

Как уже отмечалось, эрозионная деятельность ледника связана с глыбовым скользянием по ложу. Активно движущийся ледник разрушает в районах развития доледниковых уступов интенсивное разрушение, в результате чего существенно изменяется петрографический, минеральный и гранулометрический состав моренных отложений [91]. Интенсивность ледниковой эрозии зависит также от пересеченности рельефа. В ледниковой эрозии выделяются два вида: абразия и выпахивание. Абразия происходит в результате истирания пород ложа обломками, включенными в придонную часть ледника. Выпахивание заключается в отделении кусков из трещиноватого ложа и перемещении этих кусков льдом. Процессы лед-

никовой эрозии достаточно полно рассмотрены исследователями областей современных материковых оледенений.

В процессе скольжения льда по склону и по плоскостям разрывов внутри самой его толщи происходит плавление льда, что приводит к интенсивному разрушению породы при замерзании воды в стенках трещин, причем давление замерзшей воды на стенки трещин достигает  $6000 \text{ кг/см}^2$  [36, 101].

Состав, состояние и свойства разрушаемых льдом пород определяют экзарационную способность движущегося льда. Вероятно, эти факторы способствовали тому, что в направлении с севера на юг в пределах Северо-Запада СССР мощность морены возрастает. Прочности кристаллических пород с избытком хватает, чтобы противостоять раздавливающему и сдвигающему действию льда, поэтому отрыв сколько-нибудь значительного объема скального массива, не отчлененного трещинами, под действием движущегося ледника вряд ли может произойти. Смещение же по трещине, вообще говоря, возможно, но вертикальная составляющая давления массы льда, увеличивая общее сопротивление сдвигу скального блока, будет препятствовать его отделению. При большой мощности лед к основанию толщи становится пластичным, что отрицательно сказывается на его разрушающей способности.

Существенную роль в разрушении ледником трещиноватой породы играет угол между направлением движения льда и плоскостью структурного нарушения. Чем этот угол меньше, тем эффективнее идет эрозия. Большое значение имеет и характер трещиноватости. Замечено, что прочные, с хорошо выраженной отдельностью граниты оказались более эродированными, чем сланцы, разбитые многочисленными, но тесно сомкнутыми трещинами [125]. Относительно малая прочность осадочных нескальных и полускальных пород позволяет леднику отрывать значительные массивы пород, захватывать и перемещать их. Известно, что именно к таким отложениям приурочены проявления гляциотектоники. В то же время разрушению рыхлых пород препятствует их «вязкость», приводящая к замедлению скорости движения ледника, особенно резко на границе раздела между кристаллическими и рыхлыми породами [91].

Следует иметь в виду, что ледниковое выпахивание не является универсальным. В этом отношении весьма интересны наблюдения Г. Свинцова, просуммированные им следующим образом: «Вошедшее в учебники представление о том, что край ледникового щита действует как бульдозер, не согласуется с условиями исследованного района» [135]. Ряд данных свидетельствует о том, что конечные морены не носят следов нарушений, хотя они перекрыты моренными отложениями [133, 135].

*Транспортировка и переработка материала в теле ледника.* Многочисленными наблюдениями установлено, а теоретическими расчетами подтверждено, что эродированный материал поднимается к поверхности ледника в ходе его движения. Так, например,

Р. Флинт пишет: «Основная масса обломков на поверхности ледника имеет такое же происхождение, как наносы внутри ледника: они выносятся вверх восходящими потоками льда, которые наблюдаются в теле ледника ниже фирновой границы, и затем, освобождаясь от льда при абляции, скапливаются на поверхности ледника». Он приводит много примеров нахождения обломков пород на высотах в несколько тысяч футов (до 5300 футов) над наивысшей точкой их коренного залегания [128].

Наблюдения советских и зарубежных исследователей в различных районах подтвердили, что обломки попадают в тело ледника именно таким образом. В. А. Маркин и В. Л. Суходровский исследовали краевые части ледниковых куполов на островах Грэм-Белл и Земли Александра (Земля Франца-Иосифа).

На северо-западном склоне купола Солнечного (о. Грэм-Белл) выделена зона значительной концентрации моренного материала, поступающего со дна ледникового купола на поверхность. Зона выхода мореносодержащего льда на поверхность обнаружена на северо-западном склоне купола Кропоткина на Земле Александра, где в обрыве края купола прослежена система крутопадающих мореносодержащих слоев [67].

Закономерности, установленные для ледников северного полушария, подтверждены исследованиями С. А. Евтеева в Антарктиде, который отмечает, что при наползании льда на выступы коренных пород возникают плоскости разрывов, направленные вперед и вверх; по этим плоскостям моренный материал внедряется в тело ледника. Глубина внедрения таких разрывов зависит от размеров выступов и скорости движения льда, а также от соотношения высоты выступов и мощности ледника [36]. Возникновение систем разрывов при пересечении поднятий коренного ложа безусловно относится к общим явлениям, характерным не только для Антарктиды.

Все сказанное справедливо и для ледников, покрывавших Северо-Запад СССР в период последнего оледенения. Развитию разрывных дислокаций способствовали пересеченность рельефа поверхности моренных пород, сравнительно небольшая мощность ледникового покрова и его лопастной характер [100].

Наибольшая мощность ледникового покрова в области питания оценивается величиной порядка 1000—1500 м [38, 76]. По мнению К. Е. Зворыкина и М. И. Лопатникова, в Мурманской области и северной части Карелии мощность ледникового покрова лишь незначительно превышала высоту гор [38]. А. И. Спиридонов приходит к выводу, что ледниковый покров на Русской равнине даже в активную фазу максимального оледенения не перекрывал возвышенностей с относительными высотами 150—225 м [100]. Подобную оценку мощности ледника в районе Ленинграда (135 м) дают Н. И. Апухтин и С. В. Яковлева [7].

Разрывы в толще ледника могут появляться не только при пересечении последним уступов коренного ложа. Они являются след-

ствием торможения льда как в результате уменьшения мощности ледника, впадения неблагоприятно ориентированного притока, так и вследствие столкновения движущегося льда с остановившимся или мертвым льдом [36] или с крупными возвышенностями. Такое торможение должно было произойти, например, в районе глинта, при переходе льда через границу раздела кристаллических и осадочных пород севернее Ленинграда.

По мнению С. А. Евтеева [36], сколы в теле ледника возникают на границе контакта сред, обладающих различной прочностью, а именно: лед — коренные породы, лед — мореносодержащая толща. Таким образом, мощность мореносодержащей толщи может непрерывно увеличиваться, достигая при благоприятных условиях значительных величин [36]. С. А. Евтеев [36] справедливо подчеркивает, что существует неразрывное единство моренного материала и вмещающего его льда. Нельзя говорить о каких-либо скоплениях моренного материала в основании ледникового покрова, не связанных со льдом, активно участвующим в общем движении ледникового покрова.

Объем моренного материала по всей толще ледника составляет в среднем для Восточной Антарктиды примерно 1,8%. Мощность мореносодержащей толщи 100 м и даже более, однако основная масса обломочного материала сконцентрирована в нижних частях ледникового тела, составляя около 25% по объему [35, 36]. В 40-метровой мореносодержащей толще содержание моренного материала до глубины 20 м не превышает 1%, а непосредственно у кровли коренных пород достигает 25% [35]. Г. К. Свинцов определил количество моренного материала в тоннеле, пройденном в западной части Гренландского щита, от 1 до 53% [135]. Цифры того же порядка приводятся и другими авторами [48, 129].

Перемещение обломков пород, отторженных ледником, зависит от мощности, скорости движения и длительности существования ледникового покрова, его температуры (как фактора, определяющего прочность льда), мощности мореносодержащей толщи и др. В пределах Мурманской области и Карелии коренные породы почти полностью определяют состав валунов. Валунный материал переносился в основном не более чем на несколько десятков километров [12, 59, 76]. Те же закономерности установлены для морен центральной частиц Польши, США и др. [128, 131].

На достаточно больших площадях связь состава пород коренной основы и мелкозема морен вполне очевидна. Это подтверждается зависимостью цвета морены от подстилающих пород. Так, в Архангельской области моренные суглинки часто окрашены в черный и серый цвета, характерные для подстилающих их морских отложений. В пределах Ленинграда морена заимствует тона кембрийских глин. В северной части Белоруссии она унаследовала цвет и валовой химический состав пород девонского поля (табл. 50).

В районе Дрибинско-Славгородской равнины днепровская морена, залегающая на меловых породах, содержит гораздо больше

Химический состав морены и девонских глин

Породы	Содержание, %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	П. п. п.
Морена московского оледенения	61,5	13,9	5,1	5,2	2,7	0,4	8,8
Глины среднего девона [18]	49,9	16,3	6,7	5,8	3,9	0,2	4,8

карбонатных включений по сравнению с московской мореной. К выходам пород коренной основы нередко приурочены местные морены («меловая» морена Кричева, Бреста и др.).

Однако роль подстилающих пород в формировании состава морены нельзя во всех случаях считать определяющей. Иногда более существенное влияние оказывал привнос материала из соседних областей. Почти повсеместно моренные отложения резко отличаются от пород коренной основы повышенными значениями коэффициентов выветрелости (отношение содержания устойчивых минералов к неустойчивым). Это подтверждает глубокие изменения моренного материала в процессе транспортировки в теле ледника. Интересно отметить, что коэффициент выветрелости увеличивается с севера на юг и от «верхних» морен к «нижним», т. е. по мере продвижения ледника происходило разрушение неустойчивых и, следовательно, увеличение относительного содержания устойчивых минералов.

А. И. Коптев, М. М. Шукевич и другие исследователи установили, что в направлении с севера на юг и по вертикали уменьшается относительное количество пород Фенноскандии и увеличивается содержание доантропогенных терригенных пород. Выветривание пород Кольско-Карельской области приводит к образованию гидратизированных слюд и глинистых минералов и к новообразованию минералов группы эпидота [55, 121].

Основными факторами, влияющими на переработку моренного материала, кроме отмеченного выше химического преобразования, являются: прочность обломков, дальность и условия их переноса, тектонические деформации в теле ледника и другие факторы, определяющие условия отложения морены.

Обработка материала часто начинается еще до того, как обломок оторгнут от материнской породы. Процессы обработки приводят не только к сглаживанию, шлифовке поверхности пород ледникового ложа, но и готовят мелкий материал, который позже будет включен в тело ледника. Однако количество абрадированного материала невелико. Дальнейшее измельчение породы происходит при ее отделении от коренного ложа, особенно в процессе развития внутриледниковых разрывов, приводящих к динамическому воздействию на породу. Уже отторженные обломки до их включения в

лед подвергаются давлению, создаваемому весом ледника. Для пород с малой прочностью это давление может привести к их дроблению.

Опыты Е. М. Сергеева показали, что при нагрузке  $3000 \text{ кг/см}^2$  в песке увеличилось содержание пылевой фракции, количество глинистых частиц практически не изменилось. Это позволило Е. М. Сергееву сделать вывод о том, что образование глинистых частиц в природных условиях в результате механического разрушения более крупных гранулометрических элементов протекает в весьма ограниченных размерах [94]. В основании ледников создавались вертикальные давления, в десятки раз меньшие, чем в описанном опыте, и поэтому эффект давления должен был быть несущественным для образования глинистых частиц.

Некоторые авторы приписывают большое значение разрушающему действию течения льда по сравнению с давлением. Разрушающая способность течения пропорциональна скорости движения донных слоев ледника. Поэтому разрушение основания может быть эффективно и при малой мощности льда [125]. Однако применительно к покровным ледникам измельчение только течением весьма ограничено.

Намного существеннее измельчение обломочного материала происходит в результате дробления при перемещении обломков в подошве ледника. В этом случае размер обломков определяется, при прочих равных условиях, не столько прочностью материала, слагающего обломки, сколько длиной переноса. Сама по себе длина пути не может служить критерием оценки измельчения моренных частиц. Нельзя не согласиться с Н. А. Нагинским, который говорит о том, что измельчение обломков зависит не столько от длины переноса, сколько от процессов, происходящих во время этого переноса, т. е. от динамических условий в ледниковом покрове. Отсюда следует вывод: чем активнее динамика ледникового покрова, тем на более коротком расстоянии происходит обработка обломков [73].

В определенных условиях (например, активная аккумуляция и последующее усиление абляции) изменение давления приводит к повышению точки плавления льда и появлению пленок воды. Это, очевидно, усиливает процесс измельчения, особенно при транспортировке. В дальнейшем уменьшение давления приводит к усилению действия выветривания. И. Чарльсуортс [125] ссылается на эксперимент, установивший, что крупные обломки во льду, находящиеся в условиях переменного давления, разрушались так же, как под действием только температурных воздействий.

При подъеме обломков по плоскостям внутренних разрывов продолжается их измельчение. Результаты, полученные Крумбейном и Тисделом, показывают, что роль дробления при таком перемещении весьма существенна [91]. Перемещение по плоскостям надвигов внутри толщи льда сопровождается плавлением некоторого объема льда, что приводит к интенсивному разрушению обломков



как в процессе истирания, так и при замерзании воды в трещинах разных размеров [36]. Влияние рельефа подледникового ложа, скорости движения ледника и его размеров сказывается на образовании внутриледниковых разрывов, а следовательно, и на измельчении моренного материала.

В процессе отложения морены при таянии ледникового покрова обработку ее производят талые воды, при этом в связи с повышением температуры и облегчения доступа газам к моренному материалу повышается роль химического выветривания.

Транспортирующая способность ледника зависит также от высоты, на которой находится моренный материал в теле ледника. Валуну, естественно, поднимались на меньшую высоту, чем мелкие частицы. Находки валунов за многие сотни километров от их коренного залегания не являются доказательством большой транспортирующей (по протяжению) способности ледника хотя бы потому, что они, как правило, немногочисленны по сравнению с крупными обломками местного материала. Конечно, следует допустить возможность переноса обломочного материала на значительные расстояния при особо благоприятных условиях, но основная часть обломков имеет местное происхождение. Нельзя исключать и того обстоятельства, что валуны могли разноситься айсбергами и вытаивать из них очень далеко от района развития коренных пород. Измельчение обломков в теле ледника в результате физического дробления и химических процессов приводит к обогащению морены пылеватыми частицами, содержание которых в различных моренах очень постоянно.

*Отложение моренного материала.* Физико-механические свойства моренных отложений зависят от фациальных условий отложения обломочного материала.

Выпадение моренного материала происходит в процессе таяния ледников. Одни исследователи связывают исчезновение ледников с уменьшением их мощности [36, 76], другие допускают возможность таяния ледников сверху и снизу [133].

Существует мнение, что в период отступления ледниковый покров, занимавший Северо-Запад Европейской части СССР, оказался разбитым на блоки, т. е. происходило таяние «мертвого» льда. Известно, что изменение скорости движения льда в ледниках по глубине подчиняется параболическому закону. Снижению скорости в низах ледника способствовал находившийся там моренный материал, поэтому замедление движения низов ледника вплоть до их остановки, особенно у уступов коренных пород, могло происходить еще в процессе общего наступления ледникового покрова. В таких условиях транспортировка материала, отторгнутого от коренных пород, была незначительной.

Рассматривая процесс вытаивания моренного материала из тела ледника, прежде всего необходимо остановиться на том, как распределяются температуры в леднике.

Вопрос о донном таянии ледника связан с вопросом о темпера-

туре льда в его основании. Если распределение температур в верхних горизонтах ледниковой толщи исследовано сравнительно хорошо, то сказать это об изученности температурных режимов нижней зоны ледников нельзя. Однако натурные исследования и теоретические проработки позволяют представить общую картину температурного состояния ледников.

Прежде всего следует указать, что ледники существуют и существовали в различных географических условиях, а поэтому и температурные режимы их отличаются разнообразием.

Рассмотрим распределение температур в ледниках полярных стран. В. Уорд обратил особое внимание на температуру льда ледника Барнес на о. Баффин, в частности в придонных слоях его, как на фактор, влияющий на условия образования морены. Им установлено, что вся толща льда, в том числе и в основании ледника, имеет значительную отрицательную температуру [137]. Постоянные отрицательные температуры обнаружены Фьелстадом и Альманом на Шпицбергене [48]. Все замеры температуры, выполненные в глубоких скважинах Гренландии, показали, что лед находится в состоянии, далеко от точки плавления [48]. По данным Хольцшерера, в породах ложа до глубины 200 м развита мерзлота [110]. То же подтверждают исследования А. Бауэра [48]. Мерзлые породы под краевой частью ледникового покрова Восточной Антарктиды обнаружил С. А. Евтеев [36]. Несмотря на то что температура льда значительно ниже точки плавления, ряд исследователей на основании теоретического анализа приходит к выводу о возможности донного таяния. Причинами донного таяния могут явиться: 1) приток тепла из Земли в тело ледника; 2) уменьшение температуры плавления льда при повышении давления, т. е. нагрев его под давлением, и 3) выделение тепла при движении его по вертикали [48]. Как указывает С. В. Калесник, «после того, как тепло, излучаемое ложем, нагреет подошву ледника до точки плавления, передача тепла от Земли кверху через изотермический лед станет невозможной. А если тает еще и поверхность ледника, то вокруг всего его тела (и снизу и сверху) образуется тепловой барьер: тепло может лишь уходить из ледника, но не поступать в него» [48]. Нагрев нижних слоев ледника за счет повышения точки плавления льда незначителен. Кроме того, надо иметь в виду, что в процессе дегляциации давление от веса ледника уменьшается и точка плавления будет понижаться. Выделение тепла вследствие изменения уклона поверхности ложа или собственной поверхности для рассматриваемого района также не имело существенного значения, так как эти уклоны были невелики [125].

Величина донного таяния там, где оно имеет место, крайне незначительна. Для центральных частей Антарктиды И. А. Зотиков [41] определил среднюю величину донного таяния в 3 мм/год, а максимальную — в 6 мм/год. Это обстоятельство и непосредственные наблюдения позволили С. А. Евтееву сделать вывод о том, что таяние льдов в Антарктиде идет преимущественно сверху вниз [36].

Г. А. Авсюк и Е. Н. Цыкин оценивают донное таяние в  $0,5 \text{ см/год}$ , считая, что поток тепла через земную поверхность составляет  $50—60 \text{ кал/см}^2$  в год [2, 115]. Если принять, что последняя величина равна  $37,5 \text{ кал/см}^2$  в год [48], то данные Г. А. Авсюка и Е. Н. Цыкина совпадут с результатами подсчета И. А. Зотикова [41].

В процессе отступания ледникового покрова исчезает источник тепла, способствующий донному таянию, т. е. трение льда о ложе. Процесс донного таяния не может привести к вытаиванию морены из нижней части ледника при сохранении нарастающей массы льда сверху. Это показывают как приведенные выше данные, так и приближительные расчеты.

Процесс донного таяния не может привести к растаиванию льда сверху. Если принять скорость донного таяния  $0,7—1,0 \text{ см/год}$  (что соответствует фактическим наблюдениям и величине радиационного потока из внутренних частей Земли), то при средней мощности морены лужской стадии в районе Ленинграда  $10 \text{ м}$ , считая объем моренного материала в теле ледника  $25\%$ , время таяния ледника составит  $3—4$  тыс. лет. Эта цифра значительно превышает время отступания ледника лужской стадии, установленного многими исследователями [86, 94, 116].

По наблюдениям С. А. Евтеева, в Антарктиде образование конечных морен связано в основном с отчленением мореносодержащего льда и в редких случаях с осыпанием моренного материала у края ледника [36]. Е. В. Шанцер [117] рассматривает краевые (конечные) морены двух видов: насыпные и напорные, справедливо отмечая, что нет чистых форм.

Существенные различия фациальных условий отложения основных и конечных морен отражаются на их физико-механических свойствах. Так, например, совершенно различный характер имеют гистограммы распределения значений пористости основных и конечных морен Белоруссии (рис. 26) — конечные морены имеют в среднем более высокий коэффициент уплотнения, чем донные морены, хотя к первым приурочены как наиболее низкие, так и наиболее высокие значения.

Многими исследователями подчеркивается двучленное строение донной морены: верхний слой — абляционная и нижний — основная морена [66, 91, 92]. Абляционная морена, как правило, более опесчанена и обогащена валунами. В Белоруссии она имеет больший диапазон изменения пористости по сравнению с основной мореной.

В качестве примера приведем изменение коэффициента пористости по глубине абляционной и основной морен районов Светлогорска и Гомеля (рис. 27). Соответственно изменяются и деформативные свойства (рис. 28). Различия физико-механических свойств верхнего и нижнего слоев одновозрастной морены (на примере морены Калужской обл.) установлены М. М. Максимовым [66].

Основная морена района Архангельска, которая была отложена в морской среде, имеет повышенную пористость и большие значе-

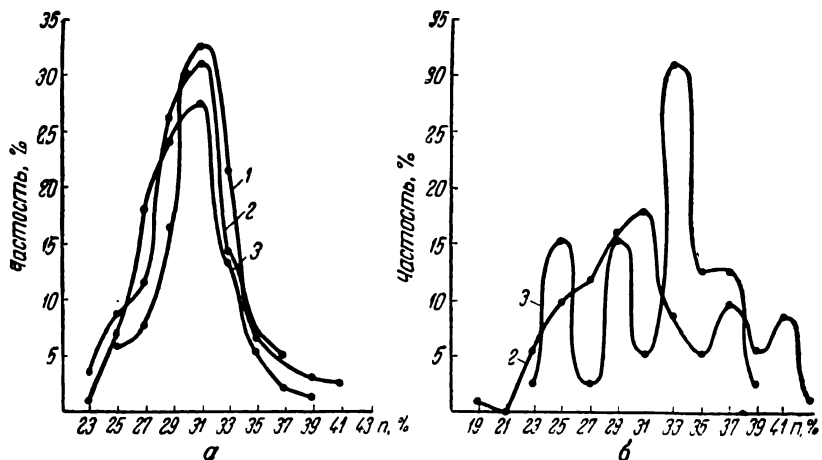


Рис. 26. Изменение значений пористости основных (а) и конечных (б) морен Белоруссии

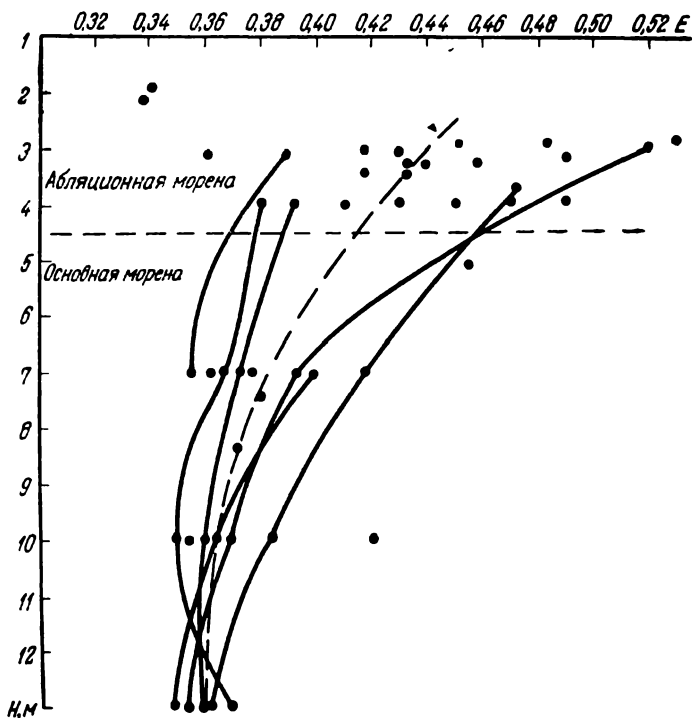


Рис. 27. Изменение коэффициента пористости моренной супеси Белоруссии с глубиной

ния показателя консистенции по сравнению с мореной других районов региона (см. табл. 9).

*Переход отложенного материала в породу.* Большое значение для понимания процесса формирования свойств моренных отложений имеют непосредственные наблюдения за образованием морен.

Э. Г. Коломыц [52], изучавший образование конечных морен на Новой Земле, так описывает этот процесс. «На поверхности льда лежит тонкий моренный чехол, мощность которого увеличивается по мере таяния льда. Моренный материал насыщается водой непрерывно подтаивающего снизу льда и расплзается по склонам гряды».

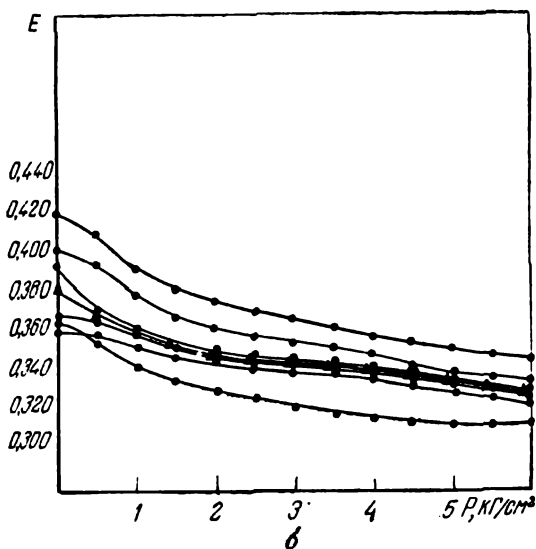
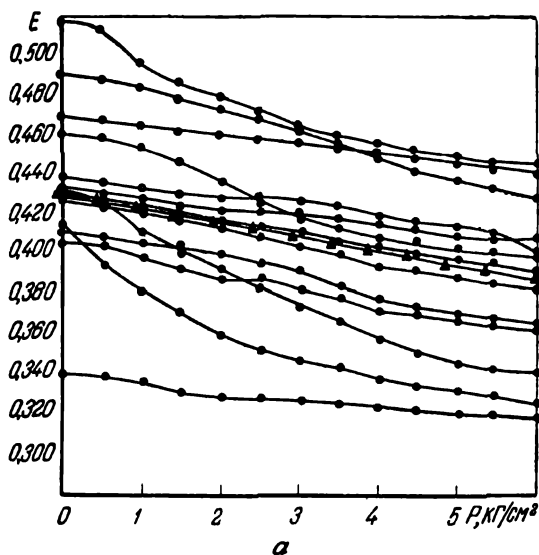
В. Окко в Исландии наблюдал в ряде мест морену, представляющую кашеобразный материал, насыщенный водой, над которой ледник нависал наподобие навеса. В некоторых участках между льдом и морской водой можно было наблюдать полости. Отложения основной морены прослеживались до самого края ледника. С глубины порядка 0,5 м они насыщены водой, причем по мере приближения к леднику влажность морены возрастает и она становится кашеобразной. В. Окко неоднократно подчеркивал, что лед не оказывает давления на морену [133]. Возможно, здесь роль донного таяния, как полагает Окко, значительна, но так или иначе после вытаивания морена остается уплотненной.

Формирование моренных отложений происходило из предварительно переработанного процессами физико-химического выветривания материала, представленного всеми фракциями.

Отложение материала происходило в условиях избыточной влажности. Важно отметить, что глинистые частицы имеют, как правило, низкую физико-химическую активность и поэтому не могут создать структурные связи, которые могли бы воспрепятствовать уплотнению и самоуплотнению породы, а низкая минерализация талых вод не создает условий для коагуляции.

В настоящее время существуют различные мнения о природе формирования плотности морены. По Р. Флинту, плотность морены является результатом ее усыхания, усадки и цементации [109]. Ф. Форель основным фактором уплотнения считает огромный вес ледника. Эта гипотеза, легко объясняющая высокую плотность и значительную прочность отложений, широко распространена среди инженеров-геологов. Однако В. А. Приклонский [87], принимая во внимание большую мощность основных морен, полагал, что процесс их формирования не ограничивается накоплением и уплотнением материала в основании ледника, а совмещается с процессом вытаивания материала, который высыхает, образуя верхний горизонт моренной толщи. В рассматриваемом случае подобная гипотеза должна быть отвергнута, так как кривая изменения плотности морены по глубине при таком способе должна иметь точку перегиба, которой на приводимых выше графиках нет (см. рис. 27). Р. Флинт в своей обстоятельной работе «Ледники и палеогеография плейстоцена» пишет: «Образование необыкновенно плотной

морены объясняют давлением перекрывающего ее льда, хотя еще не доказано, может ли оно привести к уплотнению подстилающего материала» [109]. П. Гаррисон [129], ссылаясь на данные Р. Пека и В. Рида, высказывает предположение, что из глинистой морены удаляется, возможно, лишь незначительное количество воды. Отсюда следует, что ледник должен оказывать на моренный материал небольшое давление. П. Гаррисон, основываясь на изучении морены в штате Иллинойс, считает, что к тому времени, когда зона лед-



ника в его основании, нагруженная обломками, перестала двигаться и начала таять, значительная часть ледника исчезла в результате абляции. Поэтому в упомянутом районе морена могла быть уплотнена льдом мощностью менее 50 футов [129]. Очевидно, что нагрузка порядка  $1 \text{ кг/см}^2$  не могла оказать сколько-нибудь существенного влияния на отложения, находящиеся под ее воздействием. Г. П. Мазуров придерживается точки зрения Ф. Фореля и считает, что накопление моренного материала идет главным образом в основании ледника. Внутриледниковый материал вытравивается из нижней части ледника и одновременно обжимается последним. Вытаивание накопленного материала происходит за счет тепла Земли [63, 64].

Гипотеза о выпадении моренного материала из ледника в результате донного таяния, высказанная Гудчайльдом в 1875 г. и поддержанная Р. Кэрразерсом, не получила, однако, широкого признания среди геологов [124, 126].

Материал, изложенный выше, показывает, что в общем случае обломки пород, эродированных ледником, распределяются в его теле, создавая зону значительной мощности, насыщенную терригенным материалом. После таяния ледника, которое, как правило, идет сверху вниз (преобладающее направление), морена представляет собой массу, насыщенную водой.

Очень важно, что состав моренного материала, представляющий собой естественную оптимальную смесь, позволяет получить высокую плотность даже без значительных нагрузок. В лабораторных опытах, выполненных С. А. Роза и А. Г. Горянским, через сутки

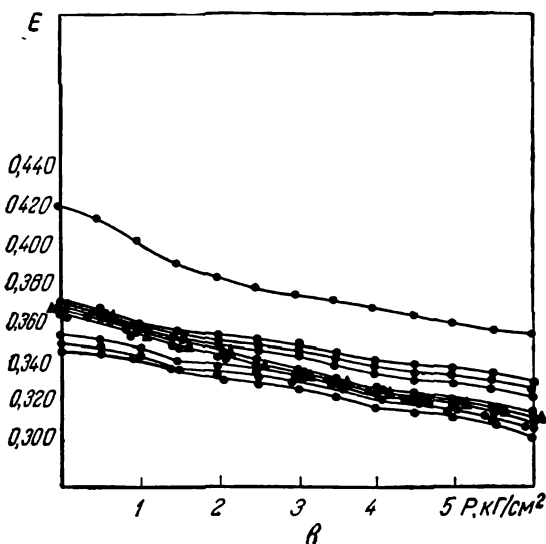


Рис. 28. Изменение сжимаемости моренной супеси Белоруссии с глубиной  
 $a$  — 4 м;  $б$  — 7 м;  $в$  — 10–13 м

после отсыпки моренного глинистого песка в воду в слое 80 см верхние 20 см представляли собой жидкий грунт, а до глубины 60 см — слабоуплотненный. Ниже его объемный вес скелета превышал  $2,05 \text{ г/см}^3$ .

При возведении плотины отсыпкой морены в воду под влиянием небольшой нагрузки, создаваемой весом слоя около 1 м, грунт хорошо и быстро уплотнялся до объемного веса скелета  $2,1 \text{ г/см}^3$  и более, т. е. достигал плотности, близкой к естественной ( $2,1—2,25 \text{ г/см}^3$ ) [90]. Весьма интересны результаты исследований Г. Т. Трункова, описавшего механизм самоуплотнения морены. Им показано, что наибольшую плотность грунт получает после отсыпки его в воду с последующим приложением нагрузки [104]. Впервые способ возведения земляных сооружений методом отсыпки моренного грунта в воду без отделения крупных фракций (в карьере оставались лишь очень крупные валуны) был применен А. Ф. Васильевым на строительстве плотины Нива-III [16]. Морена, отсыпанная в прудки, имела объемный вес скелета не менее, чем в естественных условиях. За 20 дней слой морены в 7,5 м, уложенный в плотину, не дал осадки, что свидетельствует о высокой плотности грунта. Объемный вес скелета моренных песков, из которых была построена плотина Верхне-Тулумской ГЭС, в естественном состоянии по 153 определениям равен  $2,10 \text{ г/см}^3$ , а в теле плотины он составил  $2,29 \text{ г/см}^3$  (среднее из 219 опытов). Следует отметить, что насыпь за три года дала осадку 15,5 см, что соответствует 0,6% от высоты сооружения. Этим способом возведены на севере семь плотин и четырнадцать дамб. В настоящее время земляные гидротехнические сооружения в Мурманской области и Карелии возводятся только таким методом. При этом достигаются плотности в сооружениях, близкие к естественным. Таким образом, моренные отложения в водной среде могут приобретать высокую плотность без уплотнения их сколько-нибудь значительными нагрузками.

Рассмотрим вопрос о распределении плотности — влажности в теле сооружений, возведенных отсыпкой в воду. Плотина Форт Пек сложена неоднородными грунтами, по составу сходными с моренными, а возможно, и мореной. Пористость грунта в плотине уменьшается с глубиной. То же отмечается для плотины Калаверас [22]. После намыва очень неоднородного грунта (коэффициент однородности больше 13) слоями по 0,4 м влажность поверхностного слоя интенсивно снижалась в течение 1—2 дней. Уменьшение влажности происходило в основном в результате отжатия воды после остановки намыва и в меньшей степени в результате испарения. Если в верхнем слое суглинок находился в текучем состоянии, то на глубине 6—8 м он приобретал мягко- и даже тугопластичную консистенцию [23].

Данные, изложенные в настоящей главе, позволяют предложить следующую гипотезу формирования свойств моренных отложений. После вытаивания из тела ледника моренный материал в результате самоуплотнения, которому в высшей степени способствует его



разнородный гранулометрический состав, при все возрастающем давлении от вышележащих слоев, приобретает весьма высокую плотность, меняющуюся по глубине. Скорость самоуплотнения моренного материала зависит от скорости его вытаивания из льда, условий отложения, мощности мореносодержащей толщи, рельефа пород коренного ложа и гранулометрического состава.

Особо следует подчеркнуть, что вытаивание моренного материала не имеет ничего общего с осаждением твердых частиц в водных бассейнах. Здесь идет два процесса: там, где концентрация обломков очень велика, — «постепенное вытаивание льда из морены» [117], и там, где она невелика, — образование очень жидкой массы. Участки, где одновременно протекают эти процессы, могут сменять друг друга по простиранию и по вертикали. В обоих случаях вода способствует наиболее удобной укладке частиц, образующих плотную породу. Во многих случаях еще долго после отложения морена содержит включения льда, который, вытаявая, увлажняет породу и способствует образованию так называемых «слабых морен».

Условия формирования отражаются на текстурных особенностях морены. Абляционные морены Белоруссии имеют преимущественно комковатую текстуру. В основной морене местами наблюдается сланцеватая текстура, позволяющая расщеплять суглинки на довольно тонкие слои. Подобная текстура отмечается в морене Полесья, а также наблюдалась С. С. Морозовым в морене Русской платформы [71]. С. А. Яковлев считает, что грубослонистая текстура формируется при послонном передвижении моренного материала в теле ледника [123].

Приведенная гипотеза позволяет объяснить закономерности, характерные для моренных отложений рассматриваемого района, а именно: увеличение плотности, прочности и уменьшение деформируемости с глубиной.

*Преобразование моренных отложений.* Моренные отложения преобразуются под воздействием воды, силы тяжести и процессов выветривания [91].

Влияние воды на морену сказывается особенно интенсивно при таянии ледника, когда потоки воды перебивают обломочный материал, вынося пылевато-глинистые частицы и обрабатывая поверхность более крупных обломков. Определенную, часто весьма существенную роль играет внутрiledниковый перемыв. В результате действия воды в толще морены формируются линзы и прослои хорошо промытого материала, а поверхность морены обогащается валунами, галькой и гравием.

Моренные отложения могут претерпевать размыв, если они слагают берега водных бассейнов. В таком случае образуются абразионно-бассейновые морены [91].

Значительное влияние на преобразование морены оказывают процессы солифлюкции, особенно интенсивно протекающие в песчаных и супесчаных моренных отложениях, так как низкая водо-

проницаемость последних способствует развитию сплывов. Солифлюкционно переработанные морены обычно приурочены к понижениям рельефа. Нередко на крутых обрывах по долинам рек и оврагов наблюдаются вывалы крупных валунов. Существенные преобразования моренных суглинков и глин происходят при их оползании.

Для песчаной морены процессы выветривания практически не имеют особого значения. Изредка поверхностные или подземные воды, содержащие соединения железа, в некоторой степени цементируют зерна песчаных частиц. Моренные суглинки при их выветривании могут изменять цвет и приобрести бурые тона. На контактной зоне с болотными отложениями (шириной 5—10 м) в результате действия вод, содержащих закисные соединения железа, морена окрашивается в характерные серые тона. Это позволяет при разведочных работах по изменению цвета морены предсказать наличие на участке слабых болотных отложений, даже если последние не выражены в рельефе.

Попеременное замораживание и оттаивание суглинков в пределах деятельного слоя приводят к образованию комковатой текстуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моренные отложения, широко развитые на территории Северо-Запада СССР, являются специфическими образованиями, формирование которых происходило в сложных естественноисторических условиях. Это привело к тому, что в морене встречаются все литологические разновидности — от валуников до глин. Тем не менее моренным отложениям присущи закономерности, которые определяют общность состава и свойств морен одного и того же литологического типа, а поэтому позволяют дать инженерно-геологическую характеристику последних на обширных площадях.

Анализ многочисленного фактического материала, изложенного в настоящей работе, приводит к следующим выводам.

1. Моренным отложениям свойственна существенная однородность состава и свойств литологически однотипных пород различных ледниковых подформаций, что свидетельствует об идентичности условий формирования основных морен как в отдельных районах, так и в периоды разных оледенений. Это положение позволяет широко применять для оценки условий строительства метод инженерно-геологических аналогий, в частности использовать результаты обобщений изучения физико-механических свойств морен. Во многих случаях можно существенно сократить объем полевых и лабораторных исследований при детальном изучении и свести его к минимуму определений простейших показателей состава и свойств, уделяя основное внимание выявлению условий залегания и текстурных особенностей морен с помощью геофизических методов, статического и динамического зондирования.

2. Специфика моренных отложений, заключающаяся в их высокой плотности и наличии крупных включений, предполагает ряд особенностей методики полевых и лабораторных исследований. Эти методические вопросы подробно рассмотрены в настоящей работе. Приведенные формулы и номограммы позволяют с достаточной точностью учесть влияние крупных включений на некоторые физико-механические свойства. Оценка результатов полевых и лабораторных определений показателей прочности и деформативности показывает, что в большинстве случаев лабораторные методы дают вполне надежные результаты. Сущствующее мнение о том, что механические свойства морен следует определять только полевыми методами, является несостоятельным.

Весьма перспективным для исследования свойств моренных отложений является применение статического и динамического зондирования, позволяющих оценить массив не по отдельным точкам, а в целом.

Критерии, предложенные для оценки однородности морен, дали возможность сравнить не только моренные отложения отдельных участков, но морену и породы других генетических типов и установить, что по характеру изменчивости свойств моренные отложения существенно не отличаются от других пород.

Значения необходимой и достаточной точности показателей физико-механических свойств, рекомендуемые в настоящей работе, позволяют более целенаправленно проводить полевые и лабораторные опыты.

3. Несмотря на чрезвычайное разнообразие литологических типов морен, изменяющихся от валуников до глин, достаточно четко выделяются районы с преобладанием той или иной разновидности. Наибольший интерес для инженерно-геологического изучения представляют песчаные, супесчаные и суглинистые морены, наиболее детально рассмотренные в настоящей работе. Закономерности изменения состава и свойств морен по площади и с глубиной достаточно хорошо подтверждаются характером изменения минерального состава морен. Роль подстилающих пород в формировании состава и свойств морен выявляется достаточно определенно, хотя и не является повсеместной.

4. Анализ условий формирования моренных отложений, опирающийся на большой фактический материал, дал возможность отказаться от упрощенной схемы образования морен как продукта чисто механической экзарации и рассматривать их образование как сложный многостадийный процесс, протекающий при активном участии физико-химического выветривания.

Участки, на которых проводились полевые и лабораторные исследования  
(номера участков соответствуют номерам на карте и в таблицах)

Номер участка	Район	Номер участка	Район
	<b>I. Регион Балтийского щита</b>	31	Верхний Чирка-Кемский створ
	<i>Северо-запад Мурманской обл.</i>	32	Ондская ГЭС
1	Хевоскоски ГЭС	33	Палакоргская ГЭС
2	г. Никель	34	пос. Повенец
3	р. Алла-ака-Ярви	35	Сандальская ГЭС
	<i>Север Мурманской обл.</i>		<b>II. Регион Московской синеклизы</b>
4	Кислая губа	38	г. Архангельск
5	р. Териберка	39	г. Пинега
	<i>Центр Мурманской обл.</i>	40	р. Икса (Казаково)
6	Тулумская ГЭС	41	г. Няндома
7	Вороньинский створ (р. Воронья)	42	г. Каргополь
8	Медвежинский створ (р. Воронья)	43	г. Котлас
9	Серебрянская ГЭС	44	г. Вельск
10	р. Умба	45	г. Сокол
11	пос. Ловозеро	46	пос. Верхн. Тойма
12	пос. Кица	47	г. Вытегра
	<i>Юг Мурманской обл.</i>	48	р. Шексна
13	г. Кировск	49	г. Череповец
14	ГЭС Нива-I	50	г. Вологда
15	ГЭС Нива-II	51	Волго-Балтийский водный путь
16	ГЭС Нива-III		<b>III. Погруженный склон Балтийского щита</b>
	<i>Север Карелии</i>		<i>Юг Карелии</i>
17	Князегубская ГЭС	36	Валазминская ГЭС
18	Иювская ГЭС	37	г. Суоярви
19	Кумская ГЭС		<i>Юго-восток Карелии</i>
	<i>Восток Карелии</i>	52	Нижний Вамский створ
20	Морской створ (р. Кемь)	53	р. Водла
21	Путкинская ГЭС	54	Каневский створ (р. Водла)
22	Подужемская ГЭС	55	г. Петрозаводск
23	Беломорская ГЭС	56	Антушевский створ (р. Водла)
	<i>Центр Карелии</i>		<i>Центр Карельского перешейка</i>
24	Кривопорожский створ	57	пос. Приморск
25	Юмский створ	58	Нижне-Вуоксинская ГЭС
26	Нижний Белопорожский створ	59	пос. Рошино
27	Нижний Куйтозерский створ		<i>Центр Ленинградской обл.</i>
28	Верхний Куйтозерский створ	60	пос. Мельничный Ручей
29	Юшкозерская ГЭС	61	пос. Нижн. Ладога
30	Нижний Чирка-Кемский створ	62	г. Ломоносов
		63	г. Ленинград

Номер участка	Район	Номер участка	Район
64	Всеволожский р-н	87	г. Полоцк
65	г. Волхов	88	г. Дисна
66	г. Красное Село		
67	Гатчинский р-н		<b>IV. Регион Днепровско-Донецкой впадины</b>
68	Невская ГЭС-15		
69	пос. Красный Бор		<i>Область моренной возвышенности</i>
70	пос. Волосово	89	г. Ошмяны
71	г. Гатчина	90	г. Молодечно
	<i>Восток Ленинградской обл.</i>	91	пос. Плещеницы
72	пос. Кузьрино	92	г. Борисов
	<i>Запад Ленинградской обл.</i>	93	пос. Крупки
		94	пос. Смолевичи
73	г. Нарва	95	г. Минск
	<i>Юго-восток Ленинградской обл.</i>	96	г. Лида
74	г. Тихвин	97	г. Гродно
75	г. Пикалево	98	г. Новогрудок
	<i>Юг Ленинградской обл.</i>	99	г. Кореличи
76	Тосненский р-н	100	г. Мосты
77	г. Кириши	101	г. Столбцы
	<i>Северо-восток Псковской обл.</i>	102	г. Марьино Горка
78	г. Порхов	103	г. Слуцк
79	ст. Дно		<i>Область моренной равнины</i>
	<i>Северо-запад Псковской обл.</i>	104	г. Орша
80	г. Псков	105	г. Шклов
	<i>Северо-запад Новгородской обл.</i>	106	г. Горки
81	г. Новгород	107	г. Чаусы
	<i>Восток Новгородской обл.</i>	108	г. Могилев
82	г. Боровичи	109	г. Кричев
83	г. Валдай	110	пос. Краснополье
	<i>Центр Новгородской обл.</i>	111	г. Костюковичи
84	г. Старая Русса	112	г. Бобруйск
	<i>Юго-восток Псковской обл.</i>		<i>Область полесий</i>
85	г. Великие Луки	113	г. Гомель
	<i>Север Белоруссии</i>	114	пос. Костюковка
86	г. Витебск	115	г. Речица
		116	г. Светлогорск
		117	г. Мозырь
		118	г. Рогачев
		119	г. Калинковичи
		120	пос. Корма
		121	г. Лоев
		122	г. Чечерск
		123	г. Брест
		124	пос. Ковчицы
		125	пос. Домановичи

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян Л. А. О некоторых строительных свойствах крупнообломочных образований двух разновидностей. Изв. Тбилисск. науч.-исслед. ин-та сооружений и гидроэнергетики, т. 12, 1960.
2. Авсюк Г. А. Гляциологические исследования в период Международного геофизического года 1957—1958—1959 гг. Изв. АН СССР, серия геогр., 1960, № 5.
3. Аликонис А. и др. О применении результатов зондирования для определения физико-механических свойств грунтов в условиях Литвы. В сб. «Полевые методы исследования грунтов». М., изд-во ПНИИИС, 1969.
4. Антипкин В. П. Об определении плотности грунта намывных сооружений. «Гидротехническое строительство», 1963, № 7.
5. Апухтин Н. И. К стратиграфии четвертичных отложений Центральной Карелии. Изв. Карело-Финск. науч.-исслед. базы АН СССР, 1948, № 2.
6. Апухтин Н. И. Четвертичные отложения Мурманской области. Материалы совещ. по изуч. четверт. периода, т. II. М., Изд-во АН СССР, 1961.
7. Апухтин Н. И., Яковлева С. Я. К вопросу об истории отступления ледника последнего оледенения на Карельском перешейке. Инф. сб. ОНТИ ВСЕГЕИ, № 29, 1960.
8. Арманд А. Д. Некоторые особенности строения морены на Кольском полуострове в связи с явлениями течения. Изв. Карельск. и Кольск. филиалов АН СССР, 1958, № 3.
9. Архангельский Б. В. Пучение грунтов в практике эксплуатации гидротехнических сооружений. Изв. НИИ гидротехники, т. 24, 1939.
10. Астратова Н. П. О физико-механических свойствах морены Карелии и западной части Мурманской области. Инф. сб. Ленгидроэнергопроекта, № 20, 1961.
11. Астратова Н. П., Каган А. А. Инженерно-геологическая характеристика четвертичных отложений Карелии. Тр. Ленгидропроекта, сб. 2. М.—Л., изд-во «Энергия», 1963.
12. Бискэ Г. С. Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск, Гос. изд-во Карельской АССР, 1959.
13. Бондарик Г. К. Динамическое и статическое зондирование грунтов в инженерной геологии. М., изд-во «Недра», 1964.
14. Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И. Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., изд-во «Недра», 1967.
15. Бушканец С. С. К вопросу определения сопротивления сдвигу гравелистых грунтов. Изв. ВНИИГ, т. 65, 1960.
16. Васильев А. Ф., Алексеев К. В. Возведение плотины из моренных грунтов отсыпкой в воду. «Гидротехническое строительство», 1951, № 3.
17. Верейский Н. Г. Краткая характеристика инженерно-геологических свойств отложений последнего материкового оледенения Европейской части СССР. Тр. ВСЕГИНГЕО, вып. 43. В сб. «Вопросы региональной инженерной геологии и методики инженерно-геологического картирования», М., изд-во «Недра», 1971.
18. Виноградов А. П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре. «Геохимия», 1956, № 1.
19. Винокуров Е. Ф. Строительные свойства моренных грунтов. Минск, изд-во АН БССР, 1962.
20. Винокуров Е. Ф. Моренные грунты как основания сооружений. Минск, изд-во «Наука и техника», 1968.

21. Вишняков С. Г. Область сноса обломочного материала, послужившего для накопления палеозойских отложений северо-западной окраины Подмосквой синеклизы. Тр. Воронежск. ун-та, т. 48, 1958.
22. Воллин Б. А. Высокие намывные и полунамывные плотины США. М., Госэнергоиздат, 1958.
23. Воллин Б. А., Тхай Фунг-Нэ. Некоторые результаты намыва суглинистых грунтов. «Гидротехническое строительство», 1963, № 3.
24. Воронков О. К., Акатов Ю. Е. Вертикальный градиент скорости сейсмических волн в моренных отложениях. Тр. Ленгидропроекта, сб. 2. М.—Л., изд-во «Энергия», 1964.
25. Геология четвертичных отложений Северо-Запада Европейской части СССР. Под ред. Н. И. Алухтина и И. И. Краснова. Л., изд-во «Недра», 1967.
26. Герасимов И. П., Марков К. К. Ледниковый период на территории СССР. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1939.
27. Глазовская М. А. Выветривание и почвообразование в Антарктиде. Науч. докл. высш. школы, «Геол.-географ. науки», 1958, № 1.
28. Голубев С. Л. Наблюдения за деформациями крупноблочных зданий. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1960, № 6.
29. Гроссвальд М. Г. История ледниковых покровов Земли Франца-Иосифа и тектоники льда. Материалы гляциол. исслед. Хроника. Обсуждения, вып. 8. М., изд-во Ин-та географии АН СССР, 1963.
30. Девятова Э. И. Стратиграфия четвертичных отложений и палеогеография четвертичного периода в бассейне р. Онеги. М., Изд-во АН СССР, 1961.
31. Девятова Э. И., Лосева Э. И. Стратиграфия и палеогеография четвертичного периода в бассейне р. Мезени. Коми фил. АН СССР. М., изд-во «Наука», 1964.
32. Деметьев В. А. Основные черты рельефа и геоморфологические районы Белоруссии. В сб. «Вопросы географии Белоруссии»; вып. 1. Минск, Изд-во АН БССР, 1960.
33. Дербенева И. М. К вопросу преобразования мерзлых пород под действием тонких водных пленок. В сб. «Криогенные процессы в почвах и горных породах». М., Изд-во АН СССР, 1965.
34. Евдокимов П. Д., Зауербрей И. И. Влияние замораживания и оттаивания моренного суглинка на его строительные свойства. «Гидротехническое строительство», 1950, № 2.
35. Евтеев С. А. Определение количества моренного материала, переносимого ледниками восточного побережья Антарктиды. Инф. бюлл. Сов. Антарктич. экспед., № 11, 1959.
36. Евтеев С. А. Геологическая деятельность ледникового покрова Восточной Антарктиды. М., изд-во «Наука», 1964.
37. Ефремов М. Г., Коновалов Л. А., Михеев В. В. К вопросу распределения послонных деформаций грунта в сжимаемой толще глинистых и песчаных оснований. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1963, № 6.
38. Зворыкин К. В., Лопатников М. И. Убытие покровного оледенения на северо-западе Европейской части СССР. Вестн. МГУ, 1950, № 5.
39. Зенков М. В., Мариупольский Г. М. Опыт применения глубинного вакуумирования для искусственного уплотнения грунтов. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1960, № 6.
40. Зиангиров Р. С. Определение коэффициента электроосмоса грунта в полевых условиях. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1960, № 6.
41. Зотиков И. А. Тепловой режим мощных ледников. Материалы гляциол. исслед. Хроника. Обсуждения, вып. 8. М., изд-во ин-та географии АН СССР, 1963.
42. Иванов Л. В. К вопросу об эффективности определения строительных свойств четвертичных отложений района Ленинграда. Докл. к XXI науч. конф. ЛИСИ. Л., 1967.
43. Игнатова О. И. Исследования корреляционных связей между модулем деформации и физическими характеристиками глинистых грунтов. Инф. бюлл. ЦТИСИЗ, № 1(3), 1966.

44. Каган А. А. Исследование сжимаемости моренных суглинков многократными нагрузками. В сб. «Вопросы методики лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов». Изд-во Лен. обл. НТО Горное, 1965.

45. Каган А. А. Об изменении физико-механических свойств лужской морены района Ленинграда. Тр. Ленгидропроекта, сб. 4. М.—Л., изд-во «Энергия», 1966.

46. Каган А. А. К определению объемного веса скелета песчано-гравийных грунтов. Тр. Ленгидропроекта, сб. 4. М.—Л., изд-во «Энергия», 1966.

47. Каган А. А. Инженерно-геологическая характеристика основной морены последнего оледенения Северо-Запада Европейской части СССР. В сб. «Формирование и изменение физ.-мех. свойств горных пород под влиянием естественных и искусственных факторов». Изд-во Лен. обл. НТО Горное, 1966.

48. Калесник С. В. Очерки гляциологии. М., Географгиз, 1963.

49. Карпышев Е. С. Каунасская плотина на р. Неман. В кн. «Геология и плотины», т. II. М., Госэнергоиздат, 1962.

50. Карпышев Е. С. Инженерно-геологические условия строительства плотин в области ледниковой аккумуляции. В кн. «Геология и плотины», т. III. М., Госэнергоиздат, 1963.

51. Коломенский Н. В. Общая методика инженерно-геологических исследований. М., изд-во «Недра», 1968.

52. Коломыц Э. Г. Некоторые наблюдения над формированием конечных морен в условиях современного покровного оледенения Новой Земли. Изв. Всес. геогр. об-ва, т. 95, № 2, 1963.

53. Комаров И. С. Некоторые общие вопросы методики ускоренного инженерно-геологического картирования в средних масштабах для целей планирования и проектирования массового строительства. В сб. «Скоростные методы инженерно-геологических исследований для целей массового строительства». М., изд-во «Недра», 1964.

54. Коновалов П. А., Рудницкий Н. Я. О коэффициенте изменчивости модуля деформации грунта. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1964, № 3.

55. Колтев А. И. Некоторые закономерности в распределении минералогического состава антропогенных отложений области древнего оледенения Европы. В сб. «Материалы по генезису и литологии четверт. отложений». Минск, Изд-во АН БССР, 1961.

56. Корякин В. С. Особенности движения льда и морфологии ледников в области покровного оледенения Новой Земли. В сб. «Исслед. ледников и ледниковых районов», вып. 2. М., Изд-во АН СССР, 1962.

57. Котлов Ф. В. Некоторые вопросы формирования инженерно-геологических свойств пород в связи с изучением глинистых пород Москвы и Подмоскovie. В сб. «Инж.-геол. свойства горных пород и методы их изучения». М., Изд-во АН СССР, 1962.

58. Кузнецов В. Д. Поверхностная энергия кристаллов. «Природа», 1952, № 9.

59. Лаврова М. А. Четвертичная геология Кольского полуострова. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1960.

60. Легкова В. Г. К стратиграфии четвертичных отложений бассейна нижнего течения р. Северной Двины. Материалы по четверт. геол. и геоморфол. СССР. Тр. ВСЕГЕИ, нов. серия, вып. 42. Л., Изд-во ОНТИ, 1961.

61. Лукашев К. И. Генетические типы и фации антропогенных отложений. Минск, Изд-во АН БССР, 1960.

62. Лукашев К. И., Сачок Г. И., Лукашев В. К. Влияние палеогеологических условий образования четвертичных глин БССР на их химический состав. Докл. АН БССР, т. IX, № 5, 1965.

63. Мазуров Г. П. Об образовании основной морены. Вестн. ЛГУ, серия геол. и геогр., вып. 8, № 18, 1963.

64. Мазуров Г. П. О формировании состава и свойств моренных грунтов. В сб. «Грунтоведение и инженерная геология». Изд. ЛГУ, Л., 1964.



65. Мазуров Г. П., Тихонова Е. С. Преобразование состава и свойств грунтов при многократном замораживании. Вестн. ЛГУ, № 189, 1964.
66. Максимов М. М. Некоторые результаты инженерно-геологических исследований основной морены. Изв. вузов, «Геология и разведка», 1966, № 4.
67. Маркин В. А., Суходровский В. Л. О строении краевых частей ледниковых куполов Земли Франца-Иосифа. Материалы гляциол. исслед. Хроника. Обсуждения, вып. 9. М., изд-во Ин-та географии АН СССР, 1964.
68. Марков К. К. Современные проблемы гляциологии и палеогляциологии. «Вопросы географии», сб. 1, 1946.
69. Марков К. К., Лазуков Г. И., Николаев В. А. Четвертичный период, т. II. М., Изд-во МГУ, 1965.
70. Мартин Л. Полевые опытные нагрузки на морене в Эстонии. В сб. «Прибалтийская геотехника». Каунас, изд-во Каунаск. политехн. ин-та, 1968.
71. Морозов С. С. Литологические особенности глинистой морены Русской платформы. Сб. статей по вопросам гидрогеологии и инж. геологии. М., Изд-во МГУ, 1962.
72. Москвитин А. И. Стратиграфическая схема четвертичного периода в СССР и ее принципиальное и краткое фактическое обоснование. Тр. Комисс. по изуч. четверт. периода, вып. XIII. М., Изд-во АН СССР, 1957.
73. Нагинский Н. А. Вещественный состав ледниковых и приледниковых отложений Западно-Сибирской области четвертичного материкового следования. Уч. зап. Туркменск. ун-та, вып. XV, 1953.
74. Николаев В. С. Определение прочностных и деформативных характеристик суглинчатых грунтов по результатам статического зондирования. Инф. бюлл. ЦТИСИЗ, 1968, № 4.
75. Николаев Н. И., Медянцева А. И. Интенсивность ледниковой деградации и материковые оледенения. Вестн. МГУ, 1966, № 2.
76. Никонов А. А. Развитие рельефа и палеогеографии антропогена на западе Кольского полуострова. М., изд-во «Наука», 1964.
77. Ниципорович А. А., Рассказов Л. Н. Сопроотивление крупнообломочных грунтов сдвигу. «Гидротехническое строительство», 1969, № 8.
78. Новожилов В. Н. Физико-механические свойства моренных отложений центральной части Тихвинского горнопромышленного района. Изв. вузов, «Геология и разведка», 1966, № 8.
79. Островский Л. М. Моренные грунты БССР как основания промышленных и гражданских сооружений. Техн. инф. Белгоспроекта, № 1. Минск, изд-во Белгоспроекта, 1958.
80. Перепускова Л. А. Иовская плотина на р. Иове. В кн. «Геология и плотины», т. IV. М., изд-во «Энергия», 1964.
81. Полянов Б. Б. Первые стадии почвообразования на массивно-кристаллических породах. «Почвоведение», 1945, № 7.
82. Поляков С. С. Состав и свойства моренных отложений Московской области. Уч. зап. МГУ, вып. 177. «Грунтоведение», кн. IV, 1956.
83. Попов А. М. Устройство зданий на неравномерно сжимаемых грунтах. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1963, № 6.
84. Попов И. В. Инженерная геология СССР, ч. I. М., Изд-во МГУ, 1961.
85. Попов И. В. Инженерная геология СССР, ч. II. М., Изд-во МГУ, 1965.
86. Последний европейский ледниковый покров. Под ред. И. П. Герасимова, М., изд-во «Наука», 1965.
87. Приклонский В. А. Грунтоведение, ч. 2. М., Госгеолиздат, 1952.
88. Прочухан Д. П. Инженерно-геологические условия строительства плотин на ледниковых отложениях в Карелии и на Кольском полуострове. В кн. «Геология и плотины», т. V. М., изд-во «Энергия», 1967.
89. Ребрик Б. М. Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях. М., изд-во «Недра», 1968.
90. Роза С. А. Особенности уплотнения одной разновидности моренного песчаного грунта. «Гидротехническое строительство», 1952, № 5.

91. Рухина Е. В. Литология моренных отложений. Л., Изд-во ЛГУ, 1960.
92. Рябченков А. С. Результаты сравнительного изучения минералогического состава четвертичных отложений западной части Русской равнины. Материалы Всес. совещ. по изуч. четверт. периода. М., Изд-во АН СССР, 1961.
93. Сергеев Е. М. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1959.
94. Серебряный Л. Р. Применение радиоуглеродного метода в четвертичной геологии. М., изд-во «Наука», 1965.
95. Сипягина И. К. Геологические процессы и явления на территории Ленинграда, вызванные деятельностью человека. В сб. «Инж.-геол. процессы и явления, их значение для строительства». М., Госстройиздат, 1963.
96. Скоростные методы инженерно-геологических исследований для целей массового строительства. Тр. ВСЕГИНГЕО, новая сер., № 3. М., изд-во «Недра», 1964.
97. Соболевский Ю. А., Голубев И. А. О прочностных и деформативных свойствах песчаных и песчано-моренных грунтовых оснований территории БССР. Минск, изд-во «Высшая школа», 1964.
98. Солодухин М. А. К вопросу об инженерно-геологическом районировании территории Белоруссии. В сб. «Вопросы инженерной геологии, основания и фундаменты». Тр. Белорусск. ин-та инженеров железнодорож. транспорта, вып. 51. Минск, изд-во «Высшая школа», 1967.
99. Солодухин М. А. Физические свойства моренных отложений Белоруссии. В сб. «Вопросы инженерной геологии, основания и фундаменты». Тр. Белорусск. ин-та инженеров железнодорож. транспорта, вып. 51. Минск, изд-во «Высшая школа», 1967.
100. Спиридонов А. И. Некоторые особенности древнеледниковой покровы на Русской равнине. Вестн. МГУ, «География», № 6, 1964.
101. Суходровский В. Л. Физическое выветривание горных пород в приледниковой зоне Земли Франца-Иосифа. В сб. «Исслед. ледников и ледниковых районов», вып. 2, 1962.
102. Технические условия и нормы на проектирование и возведение земляных намывных плотин (проект). М., Стройиздат, 1959.
103. Трофименков Ю. Г., Воробьев Л. Н., Смирницкий А. И., Бенедиктов А. А. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. М., Стройиздат, 1964.
104. Трунков Г. Т. Особенности уплотнения комковатых глинистых грунтов при отсыпке их в воду. Научн.-техн. инф. бюлл. Ленингр. политехн. ин-та, № 4, 1960.
105. Тильчевский К. И. Установка для определения сжимаемости грунтов в стенках буровых скважин. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1962, № 3.
106. Тютюнов И. А. Процессы изменения и преобразования почв и горных пород при отрицательных температурах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
107. Ферронский В. И. и др. Методика применения станции пенетрационного каротажа при инженерно-геологических съемках и изысканиях. В сб. «Полевые методы исследования грунтов». М., ПНИИИС, 1969.
108. Ферронский В. И. Пенетрационно-каротажные методы. М., изд-во «Недра», 1969.
109. Флинт Р. Ледники и палеогеография плейстоцена. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
110. Фриструп Б. Новейшие исследования гренландского ледникового покрова. Научные результаты. В сб. «Вопросы динамики и соврем. эволюции ледников». М., изд-во «Прогресс», 1964.
111. Холопов С. В. Статическое зондирование в Ярославском отделении ЦТИСИЗ. В сб. «Инженерные изыскания», № 1, Ярославль, изд-во ЦТИСИЗ, 1967.
112. Холопов С. В., Шиссель А. М. О некоторых результатах статического зондирования моренных суглинков. В сб. «Полевые методы исследования грунтов». М., изд-во ПНИИИС, 1969.

113. Хохлова М. Г. Исследование гранулометрического состава моренных и лёссовых суглинистых и глинистых пород. Вестн. МГУ, «Геология», № 2, 1969.
114. Цапенко М. М., Махнач Н. А. Антропогенные отложения Белоруссии. Минск, Изд-во АН БССР, 1959.
115. Цыкин Е. Н. Рекогносцировочное исследование температур ледника Института географии АН СССР на Полярном Урале. «Гляциологические исследования», 1960, № 5.
116. Чеботарева Н. С. Некоторые черты хронологии последнего оледенения на северо-западе Русской равнины. В сб. «Палеогеография и хронология верхнего плейстоцена и голоцена по данным радиоуглеродного метода». М., изд-во «Наука», 1965.
117. Шанцер Е. В. Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований. М., изд-во «Наука», 1965.
118. Шварцев С. П. О физико-химических процессах в толще многолетнемерзлых пород. В сб. «Криогенные процессы в лочвах и горных породах». М., Изд-во АН СССР, 1965.
119. Шимкус И. Ю. Механические свойства моренных суглинков. Тр. Каунасск. политехн. ин-та, вып. VII, 1957.
120. Шимкус И. Ю. Исследования сжимаемости моренных суглинков большими штампами. Науч. тр. вузов Лит. ССР, «Строительство и архитектура», 1968.
121. Шукевич М. М. Минералогический состав некоторых типов ледниковых отложений Европейской части СССР и его изменения в процессах переотложения и почвообразования. Тр. почвенного ин-та им. В. В. Докучаева, вып. 28. М., Изд-во АН СССР, 1948.
122. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. М., Изд-во АН СССР, 1955.
123. Яковлев С. А. Основы геологии четвертичных отложений Русской равнины. М., Госгеолтехиздат, 1956.
124. Carruthers R. G. Glacial drifts and the undermelt theory. Newcastle upon Tyne, Harold Hill, 1953.
125. Charlesworth J. K. The Quarternary era. With special reference to its glaciation, vol. 1. London, 1957.
126. Discussion on the origin of glacial drifts. J. Glaciology, vol. 1, No. 8, 1950.
127. Falkiewicz A. Własności fizyczno-mechaniczne ciał zwałowych śródkowego Mazowsza. Biul. Geologiczny, t. 2, 1962.
128. Flint R. F. Glacial geology and the pleistocene epoch. London, 1948.
129. Harrison P. W. A clay-till fabric: its character and origin. J. Geol. vol. 65, No. 3, 1957.
130. Jahns R. H. Sheet structure in granites: its origin and use as a measure of glacial erosion in New England. J. Geol., vol. 51, No. 2, 1943.
131. Lamparski Z. Udział materiału lokalnego w zespole glazowym form akumulacji czołowo-morenowej w końcowej strefie zlodowacenia środkowo-połskiego. Prace plejstocen. Polski Śródkow. Warszawa, 1961.
132. Lag I. Noen nyere underskelser over dannelse av morenejord i Norge. „Grundförbättring”, 1960, vol. 13, No. 2.
133. Okko V. Glacial drift in Iceland, its origin and morphology. Bull. Commiss géol. Finlande, No. 170, 1955.
134. Stankowska A. Z badań gliny morenowej klifu pod Rewalem w zakresie mineralów ciężkich oraz niektórych elementów chemicznych. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu im. Mickiewicza w Poznaniu, No. 52, 1964. Geografia, zeszyt piaty.
135. Swinow G. K. Investigation of shear zones in the ice sheet margin. Thule area, Greenland. J. Glaciology, vol. 4, No. 32, 1962.
136. Thwaites F. T. Outline of glacial geology. Michigan, 1937.
137. Ward W. H. The glaciological studies of the Baffin Island expedition, 1950. Pt II. J. Glaciology, vol. 2, No. 11, 1952.

95 коп.

5780

НЕДРА · 1971