

А К А Д Е М И Я Н А У К С О Ю З А С С Р

Т Р У Д Ы

ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

ВЫП. 12. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЕРИЯ (№ 1)

**Проф. А. А. Петровский. ПРИМЕНЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННЫ
К ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ КАРТИРОВАНИЮ. — Инж. В. В. Алексеев. ПОЛЕВАЯ
ОНДОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОКАРТИРОВАНИЯ. —
А. П. Баженова. НЕКОТОРОЕ РАЗВИТИЕ ОПЫТОВ ТЕБЕРА ПО ИЗУЧЕНИЮ
ГРУНТОВ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ СЛОИСТОСТЬЮ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Проф. А. А. ПЕТРОВСКИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННЫ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ КАРТИРОВАНИЮ

§ 1. Изучение верхней части земной коры ведется во многих направлениях, причем физические методы исследования применяются все более и более широко.¹ Так, например, магнитная съемка охватывает почти полностью территории многих стран; большое распространение получила за последнее время гравитационная съемка; начинается изучение теллурических токов. Если мы обратимся к электрическим свойствам пород, составляющих земную кору, то увидим, что постоянные (удельное сопротивление ρ и диэлектрическая постоянная ϵ), характеризующие эти свойства, изменяются в широких пределах. Это легко видеть из табл. 1.

Таблица 1

Удельные сопротивления ρ и диэлектрические постоянные ϵ горных пород

Порода	(Ω на см ² и см)	(ϵ относ. воздуха)
1. Сырой плотный чернозем на луку (слой от 0.5 до 2 м мощности, лежащий на юрском известняке)	4·10 ³	} от 5 до 15
2. Очень сырой чернозем на зерновом поле	18·10 ³	
3. Мергелистый известняк (плотный юрский известняк с глиной)	140·10 ³	от 8 до 10
4. Каменная соль очень чистая при 22° С (в разработке Deutsche Solvay Werke, Borth около Wesel, Niederrhein, Германия)	от 10 ⁶ до 10 ⁷	от 5 до 7

Цифры, приведенные в таблице, соответствуют величинам ρ и ϵ , имеющим место в обычных условиях европейского климата. Удельные сопротивления взяты из статьи проф. Кенигсбергера [Koenigsberger, 1928]; они получены в полевых условиях при помощи измерения мостиком переменного тока при частоте от 100 до 400 герц между двумя дисковыми электродами, приложенными к поверхности исследуемой породы. Диэлектрические постоянные взяты из различных источников, не содержащих точного указания условий, при которых они были получены, а потому являются лишь ориентировочными.

На большой глубине под дневной поверхностью удельные сопротивления глин и мергелей, содержащих соли, могут опускаться еще ниже²

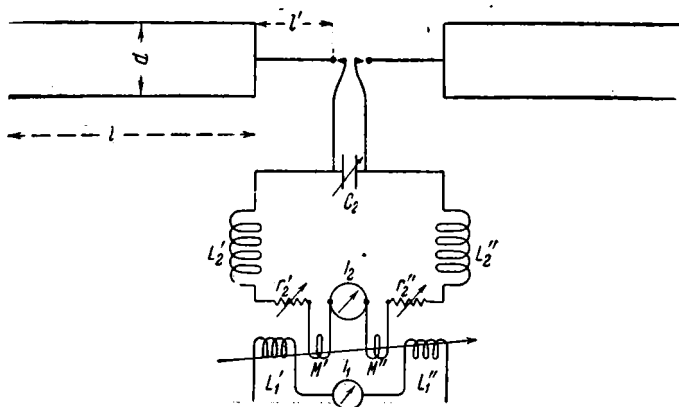
¹ В некоторых странах в настоящее время производится геофизическая съемка всего государства гравиметрическими, сейсмическими и магнитными приборами [Reich, 1935].

² Это хорошо установлено по данным электроразведочных партий, работавших на Северном Кавказе.

(примерно до $\rho = 50 \Omega \frac{\text{см}^2}{\text{см}}$), а на дневной поверхности в засушливое время значительно возрастает.

Что касается диэлектрических постоянных, то они возрастают при увеличении содержания в породе воды, достигая 80—81 CGSE, и делаются еще больше при растворении солей в воде.

Из изложенного ясно, что, произведя на данном участке измерения удельного сопротивления ρ , диэлектрической постоянной ϵ или и того и другого, мы можем составить особую „электрическую“ карту, на которой каждая точка будет характеризована числами, выражающими эти величины. А так как значения ρ и ϵ находятся в зависимости главным образом от состава породы, содержания влаги и солей, то указанная карта может быть интерпретирована так, что даст ответ на ряд вопросов, имеющих большое практическое значение для почвоведов, дорожников и других специалистов.¹



Фиг. 1. Схема наблюдений при электрокартировании с настройкой изменением емкости

Настоящая статья имеет задачей изложить теорию электрического картирования при помощи ондометрического передатчика и горизонтальной антенны, растягиваемой над поверхностью земли; так как такое картирование не требует непосредственного введения тока в землю, то оно применимо на всякой местности, поверхность которой достаточно ровна и доступна для наблюдателя.

§ 2. Наблюдение производится следующим образом (см. схему, представленную на фиг. 1):

1. Устанавливаем ондометрический передатчик в данной точке и растягиваем горизонтальную антенну определенной длины $2l$ и на определенной высоте h над землей;² предпочтительнее пользоваться однолучевой антенной, так как ее емкость может быть подсчитана значительно точнее, чем у многолучевой антенны.

При помощи специального выключателя включаем антенну параллельно вторичному конденсатору передатчика.

¹ Британская ассоциация электрических и связанных с ними промышленных исследований (The British Electrical and Allied Industries Research Association) издала карту Англии, Уэльса и Южной Шотландии, на которой нанесены средние удельные сопротивления земли на глубине 150 м [Fritsch, 1937].

² Фиг. 2 есть фотоснимок, сделанный с установки, применявшейся ондометрической экспедицией ИПП в 1928 г. для исследований Чирагидзорского месторождения пиритов. Каждое крыло антенны состоит из двух проволок, натягивавшихся грузами и поддерживавшихся штативами. С передатчиком они связывались при помощи бифилярного соединителя.

2. Ставим на передатчике такую длину волны, при которой предполагаем произвести измерение. Если ожидаемое удельное сопротивление равно ϱ , а ожидаемая диэлектрическая постоянная равна ε , то электромагнитный коэффициент породы n может быть предварительно вычислен по формуле¹

$$n = 6000 \frac{\lambda_0}{\varepsilon \varrho}, \quad (1)$$

где: ϱ — удельное сопротивление в омах на см² и см;

ε — диэлектрическая постоянная в электростатической системе;

λ_0 — длина волны (в метрах), излучаемая передатчиком в воздухе.

Теория говорит, что когда

$$n \geq 10, \quad (2)$$

то токи проводимости настолько преобладают над токами смещения, что влияние диэлектрической постоянной делается совершенно незаметным, следовательно, она не может быть измерена; наоборот, когда

$$n \leq 0.1, \quad (3)$$

то получается резкое преобладание влияния диэлектрической постоянной над удельной электропроводностью. Руководясь этими соображениями, можно выбрать наиболее подходящую длину волны.

Например, пусть работа происходит на черноземном зерновом поле, для которого ожидаем:

$$\varrho = 18 \cdot 10^3 \frac{\Omega \text{ см}^2}{\text{см}},$$

$$\varepsilon = 10CGSE.$$

Полагая $n=1$, находим по формуле (1):

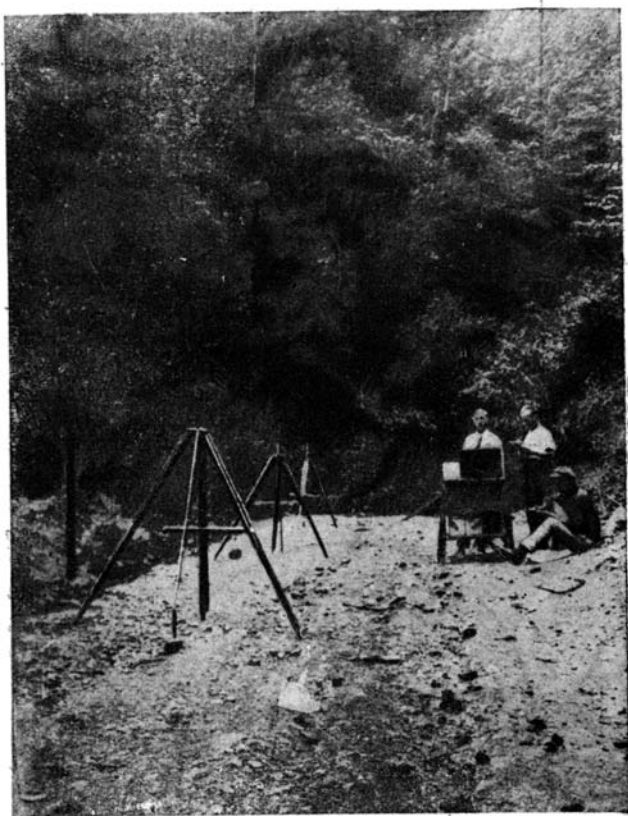
$$\lambda_0 = 30 \text{ м.}$$

Принимая во внимание неравенства (2) и (3), заключаем, что для возможности измерения обеих величин ϱ и ε длина волны не должна выходить за пределы, определяемые неравенствами

$$3 \text{ м} < \lambda_0 < 300 \text{ м.}$$

3. Возбуждаем передатчик и изменяем емкость (или самоиндукцию) вторичной цепи до получения максимума I_m отклонения на индикаторе.

Если получается два максимума (фиг. 3, М-кривая), то надо ослабить связь между первичным контуром и антенной и снова повторять опыт

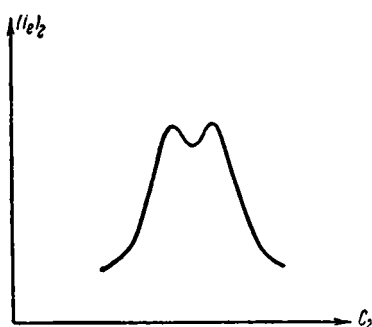


Фиг. 2. Опыты электрокартирования в 1928 г.

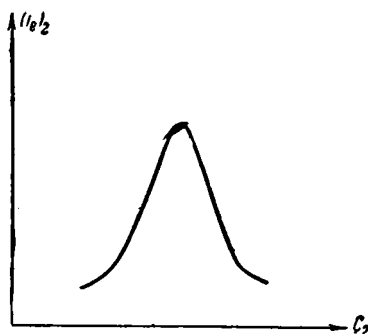
¹ Эта формула получается соответствующим переводом единиц из формулы (17) [Петровский, 1935].

до тех пор, пока не будет получаться только один максимум (фиг. 4, Δ -кривая). Если это не удастся ни при какой связи, то надо ввести добавочное сопротивление во вторую цепь и снова повторять опыт. (Введение добавочного сопротивления невыгодно, так как притупляет настройку и понижает точность наблюдения.)

Отмечаем значение вторичной емкости C_k' и значение вторичного добавочного сопротивления r_2' , при которых этот максимум получился.



Фиг. 3. Вид М-кривой

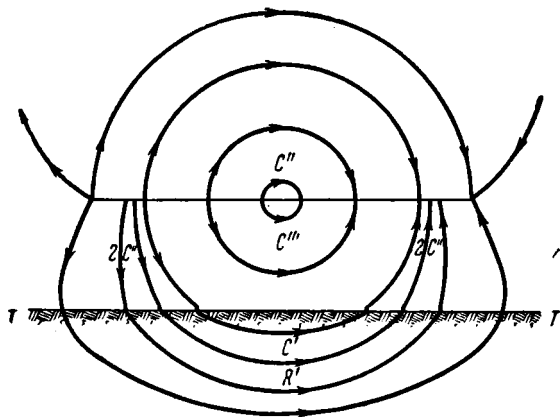


Фиг. 4. Вид Δ -кривой

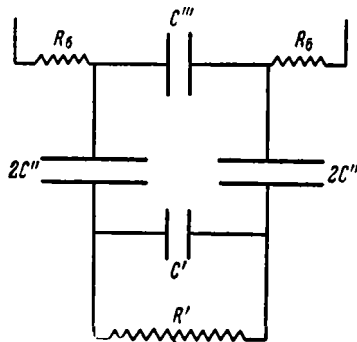
4. Отделив антенну, увеличиваем емкость вторичного конденсатора опять до получения максимума. Этот максимум будет больше предыдущего; тогда увеличиваем вторичное сопротивление до тех пор, пока он не понизится до прежней величины (иногда бывает необходимо после этого подправить настройку емкостью, а потом еще изменить сопротивление и т. д.). Отмечаем значения вторичной емкости C_k'' и вторичного сопротивления r_2'' , при которых это имеет место.

5. Опять присоединяем антенну и снова испытываем резонанс, поставив прежнее вторичное сопротивление r_2' и прежнюю вторичную емкость C_k' .

Если никаких изменений в обстановке работы не произошло, то точка резонанса



Фиг. 5. Поток электрического смещения около горизонтальной антенны



Фиг. 6. Эквивалентная схема горизонтальной антенны, расположенной над землей

должна остаться на месте, а отклонение на индикаторе должно иметь прежнюю величину I_m . Если этого не получается, то приходится повторять все вышеуказанные операции, пока не достигнем удовлетворительного результата.

6. По полученным отсчетам емкостей и сопротивлений находим приращение действующей емкости C_{2e} и действующего сопротивления R_{2e} вторичного контура в данной точке исследуемого участка поля:

$$C_{2e} = C_k'' - C_k', \quad (4)$$

$$R_{2e} = r_2'' - r_2'. \quad (5)$$

Приращение действующей емкости вторичного контура C_{2e} равно действующей емкости антенны C_{ae} , т. е. имеем:

$$C_{ae} = C_{2e}; \quad (6)$$

что же касается приращения действующего сопротивления вторичного контура R_{2e} , то оно будет меньше, чем действующее сопротивление антенны R_{ae} и должно быть увеличено умножением на отношение квадрата полной емкости вторичного контура к квадрату действующей емкости антенны,¹ т. е.

$$R_{ae} = R_{2e} \frac{C_2^2}{C_a^2}. \quad (7)$$

Емкость вторичного контура C_2 (в нее входит не только емкость вторичного конденсатора, но и емкости остальных проводников, входящих во вторичную цепь, например катушек, соединительных проводов и пр.) должна быть известна по предварительной калибровке.²

Действующая емкость антенны C_{ae} согласно формуле (6) равна приращению действующей емкости вторичного контура C_{2e} (формула 4). Поэтому формула (7) может быть представлена в виде

$$R_{ae} = R_{2e} \left(\frac{C_2}{C_{2e}} \right)^2. \quad (7')$$

Наблюдения и вычисления располагаются в таблице (см. § 8, табл. 5).

§ 3. Полученные значения C_{ae} и R_{ae} подвергают дальнейшей обработке.

Основания для такой обработки были даны мною в 1929 г. в журнале „Телеграфия и телефония без проводов“ [Петровский, 1929]. Так как этот журнал не распространен среди геофизиков и не везде имеется под руками, то я позволю себе вкратце изложить сущность дела.

¹ Это основано на следующих соображениях:

Действующим сопротивлением антенны называется величина R_{ae} , которая, будучи умножена на квадрат действующей силы тока i_{ae} измеренного в пучности антенны, дает мощность P_a , расходуемую этой антенной, следовательно.

$$P_a = R_{ae} i_{ae}^2. \quad (8)$$

Так как включение добавочного сопротивления технически неудобно производить в том месте, где антенна присоединена к прибору, и оно вводится в середине вторичного контура, то через это сопротивление проходит весь вторичный ток i_2 , а потому мощность, расходуемая в нем, будет:

$$P = R_{2e} i_2^2. \quad (9)$$

При измерении добавочное сопротивление изменяют до тех пор, пока действие установки при включении и выключении антенны не будет одинаковым; значит, расходуемые мощности будут при этом также равны:

$$P_a = P.$$

Так как силы токов i_2 , i_a пропорциональны соответствующим емкостям C_2 , C_{ae} , то отсюда и следует формула (7).

² Если известна полная самоиндукция вторичного контура L_2 , то эта емкость может быть вычислена по формуле

$$C_2 = 0.2816 \frac{\lambda_0^2}{L_2}. \quad (10)$$

где: λ_0 — длина волны в метрах; L_2 — вторичная самоиндукция в микрогенри; C_2 — вторичная емкость в микромикрофарадах.

При работе горизонтальной антенны, расположенной над поверхностью земли, она подвергается влиянию всей сложной совокупности пород, лежащих под нею и находящихся в некоторых определенных физических условиях (температура, влажность и т. д.), сопровождающих данную обстановку работы. Каждая часть этой совокупности пород обнаруживает свою долю воздействия на антенну, но наблюдатель замечает лишь суммарный эффект, сказывающийся в изменении емкости и сопротивления антенны. Совершенно такой же эффект он получил бы, если бы неоднородность пород не имела места, а вся однородная порода обладала некоторою диэлектрическою постоянною ϵ и некоторым удельным сопротивлением ρ .

Измеряя изменение емкости и сопротивления антенны, расположенной над землей, можно найти две постоянные ϵ и ρ , принадлежащие этой воображаемой однородной среде, которая может в вышеуказанном смысле заменить всю совокупность пород (ее можно условно назвать „эквивалентная среда“); полученные значения ϵ и ρ , удовлетворяющие вышеуказанным требованиям, мы можем условно принимать за диэлектрическую постоянную и удельное сопротивление, характеризующие в целом всю совокупность пород данного участка.

Указанное влияние земли на электрическое поле горизонтальной антенны наглядно иллюстрируется фиг. 5. На этой фигуре слева показано распределение потока электрического смещения вокруг антенны, помещенной параллельно поверхности земли. Из нее видно, что этот поток состоит из трех частей:

1) главный поток, линии смещения которого идут внутри почвы, т. е. ниже плоскости раздела TT ;

2) промежуточный поток, линии смещения которого идут в воздухе, между антенной и плоскостью раздела TT , и являются продолжением линий смещения, образующих главный поток;

3) рассеянный поток, линии смещения которого идут также в воздухе и притом сначала до конца, т. е. проходят выше плоскости раздела TT .

В соответствии с этим можно считать, что рассматриваемая нами система эквивалентна в электрическом смысле комбинации трех емкостей (фиг. 6):

C , главная емкость, — соответствует главному потоку, идущему в земле;

C' , промежуточная емкость, — состоит из двух емкостей, размером каждая $2C'$, включенных последовательно по обе стороны главной;

C'' , рассеянная емкость, — соответствует рассеянному потоку; включена параллельно совокупности остальных емкостей.

Так как земля обладает проводимостью, то часть линий электрического смещения, помещающаяся в ней, сопровождается токами проводимости, направление которых в первом приближении можно считать совпадающим с направлением линий смещения, а интенсивность — пропорциональной удельной электропроводности породы. В эквивалентной схеме это равносильно появлению утечки параллельно емкости C ; сопротивление этой утечки обозначено R' .

§ 4. Во время совершения колебательного процесса вокруг антенны происходит еще одно явление, а именно отшнуровывание токовых линий, причем связанная с ними энергия уносится в пространство — излучается. Теория показывает, что излученная мощность растет пропорционально квадрату действующей силы тока в пучности антенны, а потому может быть представлена в эквивалентной схеме некоторым добавочным сопротивлением R_0 , включаемым последовательно в эту схему. Это сопротивление называется „сопротивление излучения“.

На фиг. 6 оно изображено в виде двух сопротивлений, включенных симметрично по обе стороны емкости C'' и отмеченных каждое R_{σ} .

Пределы, в которых заключается сопротивление излучения, можно установить при помощи следующих соображений:

а) Предположим, что прямая антенна находится в беспредельном пространстве, заполненном воздухом. Тогда сопротивление излучения выразится формулой [Петровский, 1913]

$$R_{\sigma 0} = 320 \left(\frac{2l}{\lambda_0} \right)^2, \quad (11)$$

где: $R_{\sigma 0}$ — сопротивление излучения в воздухе в омах,

$2l$ — длина антенны,

λ_0 — длина излучаемой ею волны.

б) Предположим теперь, что та же антенна находится в беспредельном пространстве, заполненном средой, имеющей удельную проводимость γ , диэлектрическую постоянную ϵ и магнитную проницаемость μ . Тогда сопротивление излучения можно выразить формулой¹

$$R_{\sigma \gamma} = 320 \left(\frac{2l}{\lambda_0} \right)^2 \frac{\mu}{\mu_0} \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\frac{1}{2} [1 + \sqrt{1 + n^2}]}, \quad (12)$$

где: $R_{\sigma \gamma}$ — сопротивление излучения в среде в омах,

γ, ϵ, μ — физические постоянные данной среды,

ϵ_0, μ_0 — " " " воздуха,

n — электромагнитный коэффициент среды,

или

$$R_{\sigma \gamma} = R_{\sigma 0} w, \quad (12')$$

где w есть отвлеченный коэффициент, показывающий, во сколько раз возрастает сопротивление излучения при замене воздуха средой с постоянными γ, ϵ, μ .

$$\frac{R_{\sigma \gamma}}{R_{\sigma 0}} = w = \frac{\mu}{\mu_0} \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\frac{1}{2} [1 + \sqrt{1 + n^2}]}. \quad (13)$$

Чтобы дать ясное представление о величинах, с которыми имеем дело, приводим табл. 2, в которой даны значения множителя w для различных отношений $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ и n в предположении $\frac{\mu}{\mu_0} = 1$, что практически всегда имеет место.

Из таблицы 2 видно, что наибольшее значение w , с которым можно встретиться при ондометрической работе, не превышает 20, а величина w , имеющая ближайший практический интерес, составляет не более 5.

В действительности антенна расположена над землей, а потому излучение ее можно разделить на две части: „верхнее“ излучение, в которое входят токовые линии, целиком расположенные в воздухе, и „нижнее“ излучение, токовые линии которого частью идут в воздухе, частью в земле.

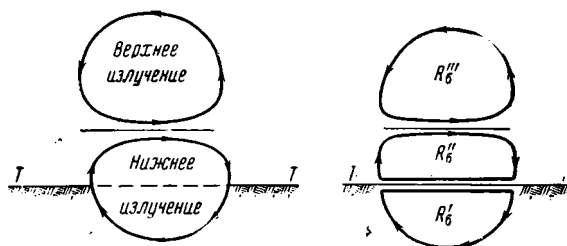
На фиг. 7 (левый чертёж) изображено по одной типичной линии для верхнего и для нижнего излучения. Так как токовые линии непрерывны, то мы ничего не изменим, разрезав мысленно каждую линию нижнего излучения у поверхности земли (вдоль TT) и замкнув отдельно часть R_{σ}' , находящуюся в земле, и часть R_{σ}'' , находящуюся в воздухе

¹ Эта формула может быть получена из выражения для количества энергии E_T , протекающей в течение каждого периода колебаний через сферу радиуса r , в центре которой находится излучающий диполь [Петровский, 1913].

Значения w в зависимости от $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ и l

$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$	l											
	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	4	6	8	10
1	1.00	1.00	1.01	1.02	1.04	1.07	1.10	1.27	1.60	1.88	2.13	2.35
2	1.41	1.41	1.42	1.44	1.47	1.51	1.55	1.79	2.26	2.65	3.00	3.31
4	2.00	2.00	2.01	2.04	2.08	2.14	2.19	2.54	3.20	3.76	4.26	4.70
6	2.45	2.45	2.46	2.50	2.55	2.62	2.69	3.11	3.92	4.91	5.22	5.76
8	2.83	2.83	2.84	2.89	2.94	3.03	3.11	3.59	4.53	5.32	6.03	6.65
10	3.16	3.16	3.18	3.22	3.29	3.38	3.48	4.01	5.06	5.94	6.73	7.43
15	3.87	3.87	3.89	3.95	4.02	4.14	4.25	4.91	6.19	7.28	8.24	9.09
20	4.47	4.48	4.50	4.46	4.65	4.78	4.92	5.68	7.15	8.40	9.52	10.5
25	5.00	5.01	5.03	5.10	5.20	5.35	5.50	6.35	8.00	9.40	10.7	11.7
30	5.48	5.49	5.51	5.59	5.70	5.86	6.02	6.96	8.77	10.3	11.7	12.9
35	5.92	5.93	5.95	6.04	6.16	6.33	6.51	7.52	9.47	11.1	12.6	13.9
40	6.32	6.33	6.35	6.45	6.67	6.76	6.95	8.03	10.1	11.9	13.5	14.9
60	7.75	7.76	7.79	7.90	8.06	8.29	8.53	9.84	12.4	14.6	16.5	18.2
80	8.94	8.95	8.98	9.12	9.30	9.57	9.84	11.4	14.3	16.8	19.0	21.0
100	10.0	10.0	10.1	10.2	10.4	10.7	11.0	12.7	16.0	18.8	21.3	23.5

(фиг. 7, правый чертёж). Энергия, связанная с частью R'_σ , образует проходящую волну и по мере распространения волны постепенно переходит в тепло: эта энергия и учитывается сопротивлением R , включенным параллельно емкости C' эквивалентной схемы. Энергия же, связанная с частью R''_σ , дает начало отраженной волне и вместе с верхним излучением R''_σ , составляет дополнительный расход (собственно излучение), который надо учесть отдельно.



Фиг. 7. Верхнее и нижнее излучение горизонтальной антенны, расположенной над землей

В первом приближении сопротивление верхнего излучения можно выразить формулой

$$R''_\sigma = \frac{R_{\sigma 0}}{2} = 160 \left(\frac{2l}{\lambda_0} \right)^2; \quad (14)$$

что касается нижнего излучения, т. е. суммы $R'_\sigma + R''_\sigma$, то для нее можно установить следующее неравенство:

$$\tilde{R}'''_\sigma \leq R'_\sigma + R''_\sigma \leq w R'''_\sigma. \quad (15)$$

Когда антенна расположена очень далеко от поверхности земли, то имеем:

$$h \approx \infty; \quad R'_\sigma \approx 0; \quad R''_\sigma \approx R'''_\sigma. \quad (16)$$

Когда же антенна лежит на земле, то

$$h \approx 0; \quad R'_\sigma \approx w R'''_\sigma; \quad R''_\sigma \approx 0. \quad (17)$$

При ондометрических наблюдениях антенна растягивается близко от поверхности земли, а потому мы будем считать приближенно $R_{\sigma}''=0$ и вычислять поправку на излучение по формуле

$$R_{\sigma}=R_{\sigma}''=160\left(\frac{2l}{\lambda_0}\right)^2. \quad (18)$$

Для горизонтальной антенны, каждое крыло которой имеет длину $l=5$ м и которая работает длиной волны $\lambda_0=100$ м, по формуле (18) получаем:

$$R_{\sigma}=1.6\Omega.$$

Отнимая величину R_{σ} от найденного из наблюдения действующего сопротивления антенны R_{ae} , мы и получим действующее сопротивление потерь в земле R_e :

$$R_e=R_{ae}-R_{\sigma}. \quad (19)$$

§ 5. Точных формул, соответствующих разбираемому нами случаю, не имеется, но можно воспользоваться приближенными выражениями для действующей емкости C_{ae} горизонтальной антенны, помещенной над землей,¹ и действующего сопротивления R_e потерь такой антенны, выведенными мною в цитированной уже статье² [Петровский, 1929].

$$C_{ae}=\frac{C_{a\infty}}{1+\frac{a(1+\varepsilon)}{(1+\varepsilon)^2+\varepsilon^2n^2}}, \quad (20)$$

$$R_e=\frac{\beta\varepsilon n}{(1+\varepsilon)_2+\varepsilon^2n^2}=\frac{a\varepsilon n}{\omega C_{a\infty}[(1+\varepsilon)^2+\varepsilon^2n^2]}, \quad (21)$$

где: ε — отношение диэлектрических постоянных сред:

$$\varepsilon=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (22)$$

(так как первая среда есть воздух, то ε равно величине диэлектрической постоянной воздуха, отнесенной к воздуху);

n — электромагнитный коэффициент второй (полупроводящей) среды;

$C_{a\infty}$ — конденсаторная емкость антенны в предположении, что вторая среда заменена идеальным проводником;

a — вспомогательный коэффициент, равный

$$a=2\left[\frac{C_{a\infty}}{C_{a0}}-1\right], \quad (23)$$

где: C_{a0} — емкость той же антенны в первой среде при отсутствии второй среды,

ω — угловая частота:

$$\omega=2\pi N, \quad (24)$$

сокращенное обозначение:

$$\beta=\frac{a}{\omega C_{a\infty}}. \quad (25)$$

Введя обозначения:

$$x=1+\varepsilon \quad (26)$$

$$y=\varepsilon n, \quad (27)$$

¹ Напоминаем, что действующая емкость антенны C_{ae} равна C_{2e} (формула б).

² Формулы (32') и (33') на стр. 214. Формулы эти переписаны без изменений (за исключением коэффициента в формуле (32'), который вместо A обозначен здесь β , и емкостей C_2 , C_1 и C_e , замененных через $C_{a\infty}$, C_{a0} и C_{ae}).

приводим формулы (20) и (21) к виду:

$$C_{ae} = \frac{C_2}{1 + \frac{\alpha x}{x^2 + y^2}}, \quad (20')$$

$$R_e = \frac{\beta y}{x^2 + y^2}. \quad (21')$$

Решая эти два уравнения относительно x и y , получаем:

$$x = \frac{\beta^2 C_{ae} \alpha (C_{a\infty} - C_{ae})}{(R_e C_{ae} \alpha)^2 + \beta^2 (C_{a\infty} - C_{ae})^2}, \quad (28)$$

$$y = \frac{R_e C_{ae}^2 \alpha^2 \beta}{(R_e C_{ae} \alpha)^2 + \beta^2 (C_{a\infty} - C_{ae})^2}. \quad (29)$$

Если же ввести сокращенные обозначения:

$$\frac{R_e \alpha}{\beta} = C_{a\infty} \omega R_e = Y, \quad (30)$$

$$\frac{C_{a\infty}}{C_{ae}} - 1 = X, \quad (31)$$

то решения этих уравнений примут вид:

$$x = \frac{\alpha X}{X^2 + Y^2}, \quad (28')$$

$$y = \frac{\alpha Y}{X^2 + Y^2}. \quad (29')$$

Величины $C_{a\infty}$, C_{a0} , а следовательно и α , могут быть вычислены для данной горизонтальной антенны по общеизвестным формулам, например, по формулам, данным Хоу;¹ для этого надо только знать длину лучей антенны l , число лучей m , радиус канатика r_0 , разнос лучей d и высоту над почвой h ; величины ω , R_e и C_{ae} находятся из наблюдения; по этим данным, пользуясь формулами (37), (38), находим X и Y , а затем, пользуясь формулами (28'), (29'), вычисляем x и y , а следовательно, и искомые величины ε_2 и ϱ , так как из формул (26), (27), (22) и (1) следует:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 (x - 1), \quad (26')$$

$$\varrho = \frac{6000 \lambda_0}{\varepsilon_1 y}. \quad (27')$$

(Величина ε_1 в электростатической системе принимается равной единице, так как антенна помещается в воздухе, λ_0 берется в метрах, ϱ получается в омах на см² и см.)

§ 6. Обработка наблюдений производится в следующем порядке:

1. Вычисляем конденсаторную емкость данной антенны в воздухе по формуле (для однолучевой² антенны)

$$C_{a0} = \frac{5}{9} \cdot \frac{l}{2 \lg \frac{l}{r_0} - 0.618}, \quad (32)$$

¹ Эти формулы приводятся ниже, см. § 6.

² Если антенна имеет m лучей, то можно рассчитать конденсаторную емкость ее в воздухе по формуле

$$C_{a0} = \frac{5}{9} \cdot \frac{l m k}{2 \lg \frac{l}{r_0} - 0.618} + \frac{(m-1) d}{2 \lg \frac{(m-1) d}{r_0} - 0.618} +$$

где: l — длина каждого крыла антенны, r_0 — радиус проволоки. Обе величины выражаются в сантиметрах; емкость получается в микро-микрофарадах.

Таблица 3

Значения коэффициента k формул (32') и (33') для двулучевой антенны

$\frac{d}{h} + \frac{2d}{l}$	k	$\frac{d}{h} + \frac{2d}{l}$	k
0.1	0.73	0.8	0.925
0.2	0.82	1.0	0.95
0.3	0.85	1.25	0.97
0.4	0.87	1.5	0.99
0.5	0.885	2.0	1.00
0.6	0.9		

2. Вычисляем конденсаторную емкость той же антенны для случая, когда вторая среда является идеальным проводником, по формуле (для однолучевой¹ антенны)

$$C_{a\infty} = \frac{5}{9} \cdot \frac{l}{2 \lg \frac{l}{r_0} - 0.618 - E}, \quad (33)$$

где E — число, зависящее от длины крыла l и высоты антенны над землею h . Обе величины берутся в сантиметрах; емкость получается в микромикрофарадах. Значения E берутся из табл. 4.

3. Вычисляем коэффициент:

$$a = 2 \left(\frac{C_{a\infty}}{C_{a0}} - 1 \right). \quad (34)$$

4. Вычисляем поправку на излучение:

$$R_{\sigma} = 160 \left(\frac{2l}{\lambda_0} \right)^2 \quad (35)$$

(R_{σ} получается в омах).

5. Вычисляем действующее сопротивление потерь антенны, происходящих в земле:

$$R_e = R_{ae} - R_{\sigma}. \quad (36)$$

$$+ \frac{l'}{2 \lg \frac{l'}{r_0} - 0.618}, \quad (32')$$

где: l — длина каждого крыла, r_0 — радиус, d — расстояние между соседними лучами l' — длина соединителя. Все эти величины выражаются в сантиметрах; емкость получается в микромикрофарадах. Число k зависит от l , d и h (высота антенны над землей) и берется из табл. 3.

¹ Если антенна имеет m лучей, то можно рассчитать конденсаторную емкость ее над идеальным проводником по формуле

$$C = \frac{5}{9} \left[\frac{lmk}{2 \lg \frac{l}{r_0} - 0.618 - E} + \frac{(m-1)d}{2 \lg \frac{(m-1)d}{r_0} - 0.618 - E_d} + \frac{l'}{2 \lg \frac{l'}{r_0} - 0.618 - E'} \right]. \quad (33')$$

(Относительно l , r_0 , d , l' , k см. предыдущее примечание. Числа E , E_d , E' зависят от отношений $\frac{l}{2h}$, $\frac{d}{2h}$, $\frac{l'}{2h}$.)

Таблица 4

Значения $E = 2 \left(\text{Ar} \sin \frac{l}{2h} + \frac{2h}{l} - \sqrt{1 + \frac{4h^2}{l^2}} \right)$
 формул (33) и (33')

$\frac{l}{2h}$	E	$\frac{l}{2h}$	E	$\frac{l}{2h}$	E
0	0	20	5.46	110	8.97
0.5	0.48	25	5.90	120	9.15
1.0	0.94	30	6.25	130	9.28
1.5	1.30	40	6.80	140	9.41
2.0	1.64	50	7.25	150	9.54
3.0	2.20	60	7.61	160	9.66
4.0	2.62	70	7.91	170	9.78
5.0	2.98	80	8.18	180	9.88
7.5	3.68	90	8.41	190	9.99
10	4.20	100	8.62	200	10.1
15	4.92				

6 и 7. Вычисляем вспомогательные величины:

$$X = \frac{C_{\infty}}{C_{2e}} - 1, \quad (37)$$

$$Y = 1885 \cdot 10^{-6} \frac{C_{\infty} R_e}{\lambda_0}. \quad (38)$$

(C_{∞} выражается в микромикрофарадах, R_e — в омах, λ_0 — в метрах; Y имеет нулевую размерность.)

8 и 9. Вычисляем вспомогательные функции u и v :

$$u = \frac{X}{X^2 + Y^2}, \quad (39)$$

$$v = \frac{Y}{X^2 + Y^2}. \quad (40)$$

10 и 11. Вычисляем величины:

$$x = au, \quad (41)$$

$$y = av. \quad (42)$$

12 и 13. Вычисляем значение средней диэлектрической постоянной породы ϵ_2 и среднего удельного сопротивления породы ρ :

$$\epsilon_2 = x - 1, \quad (43)$$

$$\rho = 6000 \frac{\lambda_0}{y}. \quad (44)$$

(Диэлектрическая постоянная получается в электростатических единицах, а удельное сопротивление в омах на см² и см.)

14. Для проверки вычисляем электромагнитный коэффициент почвы:

$$n = \frac{y}{\epsilon_2}. \quad (45)$$

Если он оказывается меньше 0.3, то расчет можно считать достаточно обоснованным. В противном случае необходимо сделать новую группу измерений при более короткой волне.

Результаты обработки наблюдений располагаются в двух таблицах — см. § 8, табл. 6 и 7.

§ 7. Для того чтобы оценить степень надежности, которую можно приписать результатам картирования, рассмотрим, какую наибольшую величину погрешности можно ожидать в окончательных числах, получае-
мых для диэлектрической постоянной ϵ_2 и удельного сопротивления ρ .

Эти погрешности слагаются из погрешностей, имеющих место при нахождении следующих величин: λ_0 , C_2 , C_{2e} , R_{2e} , C_{a0} , $C_{a\infty}$, R_σ .

Погрешности λ_0 и C_2 должны быть известны из предварительной калибровки прибора; погрешности C_{2e} и R_{2e} зависят от конструкции аппарата и тщательности наблюдения величин C_k' и C_k'' , r_2' и r_2'' , так как определяются формулами:

$$\frac{\Delta C_{2e}}{C_{2e}} = \frac{\Delta C_k'' + \Delta C_k'}{C_k'' - C_k'}, \quad (46)$$

$$\frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} = \frac{\Delta r_2'' + \Delta r_2'}{r_2'' - r_2'}, \quad (47)$$

Погрешности C_{a0} и $C_{a\infty}$ зависят от точности измерения размеров антенны и высоты ее расположения над землей (эта точность в значи-
тельной мере определяется правильностью формы антенны и ровностью поверхности участка, над которым она растянута) и для однолучевой антенны высчитаются по формулам:

$$\frac{\Delta C_{a0}}{C_{a0}} = \left(1 - \frac{1}{\lg \frac{l}{r_0} - 0.309}\right) \cdot \frac{\Delta l}{l} + \frac{1}{\lg \frac{l}{r_0} - 0.309} \cdot \frac{\Delta r_0}{r_0}; \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C_{a\infty}}{C_{a\infty}} = & \left(1 - \frac{1}{\lg \frac{l}{r_0} - 0.309 - \frac{E}{2}}\right) \frac{\Delta l}{l} + \\ & + \frac{1}{\lg \frac{l}{r_0} - 0.309 - \frac{E}{2}} \left(\frac{\Delta r_0}{r_0} + \frac{\Delta E}{E}\right). \end{aligned} \quad (49)$$

Погрешность R_σ зависит от точности измерения длины антенны и длины волны и может быть выражена формулой

$$\frac{\Delta R_\sigma}{R_\sigma} = 2 \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0}. \quad (50)$$

(При всех вышеуказанных расчетах для получения наибольших значе-
ний погрешностей нужно принимать все дельты положительными.)

Рассчитав вышеуказанные частные погрешности, можно найти общую наибольшую погрешность, которая может иметь место в результате измерений диэлектрической постоянной породы ϵ_2 и удельного сопроти-
вления породы ρ по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \pm \frac{\Delta \epsilon_2}{\epsilon_2} = & \mp \frac{x}{x-1} \left[\left(\frac{2X^2}{X^2 + Y^2} - 1 \right) \frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{2e}} - \frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{a0}} + \right. \\ & \left. + \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \right] \frac{\Delta C_{a\infty}}{C_{a\infty}} \mp \frac{x}{x-1} \cdot \frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{a0}} \cdot \frac{\Delta C_{a0}}{C_{a0}} \mp \\ & \mp \frac{x}{x-1} \left[\left(\frac{2X^2}{X^2 + Y^2} - 1 \right) \frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{2e}} - \right. \\ & \left. - \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \cdot \frac{2R_{ae}}{R_{ae} - R_\sigma} \right] \frac{\Delta C_{2e}}{C_{2e}} \mp \\ & \mp \frac{x}{x-1} \cdot \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \cdot \frac{R_{ae}}{R_{ae} - R_\sigma} \cdot \frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} \mp \\ & \mp \frac{x}{x-1} \cdot \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \cdot \frac{2R_{ae}}{R_{ae} - R_\sigma} \cdot \frac{\Delta C_2}{C_2} \pm \frac{x}{x-1} \cdot \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \cdot \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} \pm \\ & \pm \frac{x}{x-1} \cdot \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \cdot \frac{R_\sigma}{R_{ae} - R_\sigma} \cdot \frac{\Delta R_\sigma}{R_\sigma}; \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned}
\pm \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = & \pm \left[\frac{2X^2}{X^2 + Y^2} \cdot \frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{2e}} - \frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{a0}} - \right. \\
& \left. - \left(1 - \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \right) \right] \frac{\Delta C_{a\infty}}{C_{a\infty}} \pm \frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{a0}} \cdot \frac{\Delta C_{a0}}{C_{a0}} \mp \\
& \mp \left[\frac{2X^2}{X^2 + Y^2} \cdot \frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{2e}} - \left(1 - \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \right) \frac{2R_{ae}}{R_{ae} - R_{\sigma}} \right] \frac{\Delta C_{2e}}{C_{2e}} \mp \\
& \mp \left(1 - \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \right) \frac{R_{ae}}{R_{ae} - R_{\sigma}} \cdot \frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} \mp \\
& \mp \left(1 - \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \right) \frac{2R_{ae}}{R_{ae} - R_{\sigma}} \cdot \frac{\Delta C_2}{C_2} \pm \left(1 - \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \right) \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} \pm \\
& \pm \left(1 - \frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} \right) \frac{R_{\sigma}}{R_{ae} - R_{\sigma}} \cdot \frac{\Delta R_{\sigma}}{R_{\sigma}}.
\end{aligned} \tag{52}$$

(Так как частные погрешности могут быть как положительны, так и отрицательны, то при подсчете полных наибольших возможных погрешностей надо из знаков $\pm$ выбирать такие, чтобы все семь слагаемых, входящих в каждую из формул (51), (52), имели одинаковые знаки.)

§ 8. В качестве примера, иллюстрирующего вышеизложенное, приведем наблюдения, произведенные Верх-Нейвинской экспедицией ИПГ 13 июля 1929 г. в дворе дома Скороходова¹ (база экспедиции) при помощи ондометрического передатчика типа ПЛ-3 1927 и однолучевой горизонтальной антенны длиной $2l = 2 \cdot 10 = 20$ м, сделанной из канатика радиусом $r_0 = 1.70$ мм.

Канатик каждого крыла натягивался грузами по 3.4 кг, что давало стрелу провеса $\chi \approx 6$ см.

Средняя высота антенны над поверхностью земли была $h = 56$ см.

Схема передатчика соответствовала фиг. 1.

Место наблюдения было совершенно ровное, почва — суглинок, покрытый редкой низкой травой.

Наблюдения производились при ясной тихой погоде и дали результаты, которые систематизированы в табл. 5, 6 и 7.

Таблица 5

Измерения ε и φ при помощи горизонтальной антенны. Наблюдения

$$\begin{aligned}
L_2 = 146 \text{ мН}, \quad \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} = \pm 0.005, \quad \frac{\Delta C_2}{C_2} = \pm 0.01, \quad \Delta C_k' = \pm 0.2 \text{ мкФ}, \\
\Delta C_k'' = \pm 0.5 \text{ мкФ}, \quad \Delta r_2' = \pm 0.05 \text{ }\Omega, \quad \Delta r_2'' = \pm 0.05 \text{ }\Omega
\end{aligned}$$

λ_0 м	C_2 мкФ	C_k' мкФ	r_2' Ω	I_m мА	C_k'' мкФ	r_2'' Ω	C_{2e} мкФ	R_{2e} Ω	R_{ge} Ω	$\frac{\Delta C_{2e}}{C_{2e}}$	$\frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}}$
216	90.0	18.0	0	98.5	58.3	3.35	40.3	3.35	16.7	± 0.0169	± 0.0299

Таблица 6

Измерения ε и φ при помощи горизонтальной антенны. Вспомогательные расчеты

$$l = 1000 \text{ см}, \quad r_0 = 0.170 \text{ см}, \quad m = 1, \quad d = 0, \quad l' = 0, \quad \Delta l = 1 \text{ см}, \quad \Delta r_0 = 0.001 \text{ см}, \quad \Delta h = 1 \text{ см}$$

h см	$\frac{l}{2h}$	C_{a0} мкФ	E	$C_{a\infty}$ мкФ	α	$\frac{2l}{\lambda_0}$	R_{σ} Ω	R_e Ω	$\frac{\Delta C_{a0}}{C_{a0}}$	$\frac{\Delta E}{E}$	$\frac{\Delta C_{a\infty}}{C_{a\infty}}$	$\frac{\Delta R_{\sigma}}{R_{\sigma}}$
56.0	9.0	33.1	4.0	43.5	0.628	0.0926	1.37	15.3	± 0.0015	± 0.01	± 0.0029	± 0.012

¹ Наблюдения производил сотрудник ИПГ Б. Н. Достовалов.

Измерения ε и ρ при помощи горизонтальной антенны. Результаты

X	Y	u	v	x	y	ε_2 относ. воздуха	ρ $\frac{\text{МО см}^2}{\text{см}}$	n	$\frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2}$	$\frac{\Delta \rho}{\rho}$
0.079	0.0058	12.6	0.925	7.91	0.581	6.91	2.2	0.084	$\pm 30\%$	$\pm 8\%$

Остановимся более подробно на анализе наибольших возможных погрешностей, которые могут иметь место в числах, полученных для диэлектрической постоянной породы ε_2 и для удельного сопротивления породы ρ .

Подсчитывая коэффициенты, входящие в формулы (51), (52) по данным наблюдений и обработки (см. табл. 5, 6 и 7), получаем:

$$\frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{2e}} = 13.6,$$

$$\frac{C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{a0}} = 4.18,$$

$$\frac{2X^2}{X^2 + Y^2} = 1.99.$$

$$\frac{2Y^2}{X^2 + Y^2} = 0.0107,$$

$$\frac{x}{x-1} = 1.14,$$

$$\frac{R_{ae}}{R_{ae} - R_{\sigma}} = 1.09,$$

$$\frac{R_{\sigma}}{R_{ae} - R_{\sigma}} = 0.0895$$

и далее:

$$\begin{aligned} \pm \frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2} &= \mp 10.6 \frac{\Delta C_{a\infty}}{C_{a\infty}} \mp 4.77 \frac{\Delta C_{a0}}{C_{a0}} \pm 15.3 \frac{\Delta C_{2e}}{C_{2e}} \mp \\ &\mp 0.01 \frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} \mp 0.03 \frac{\Delta C_2}{C_2} \pm 0.01 \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} \pm 0.001 \frac{\Delta R_{\sigma}}{R_{\sigma}} = \\ &= \mp 0.0307 \mp 0.0072 \mp 0.258 \mp 0.0003 \mp 0.0003 \pm 0.00005 \pm \\ &\pm 0.00001 \approx \pm 0.30; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pm \frac{\Delta \rho}{\rho} &= \pm 2.47 \frac{\Delta C_{a\infty}}{C_{a\infty}} \pm 4.18 \frac{\Delta C_{a0}}{C_{a0}} \mp 0.54 \frac{\Delta C_{2e}}{C_{2e}} \mp 1.08 \frac{\Delta R_{2e}}{R_{2e}} \mp \\ &\mp 2.16 \frac{\Delta C_2}{C_2} \pm 0.99 \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} \pm 0.089 \frac{\Delta R_{\sigma}}{R_{\sigma}} = \pm 0.00716 \pm 0.00627 \mp \\ &\mp 0.0091 \mp 0.030 \mp 0.0216 \pm 0.005 \pm 0.001 \approx \pm 0.08. \end{aligned}$$

Рассматривая эти цифры, мы приходим к следующим выводам:

1. При измерении диэлектрической постоянной наибольший вес имеет точность определения емкости антенны C_{2e} ; менее значительную роль играет точное знание величин $C_{a\infty}$ и C_{a0} ; неточность в измерении R_{2e} , а также в C_2 , λ_0 и R_{σ} практически не влияют на результат.

2. При измерении удельного сопротивления ρ наибольший вес имеют точность определения действующего сопротивления R_{2e} и точность калибровки C_2 ; существенную роль играет также точное знание емкостей C_{2e} .

$C_{a\infty}$, C_{a0} и длины волны λ_0 ; неточная оценка R_g практического значения не имеет.

Эти выводы и следует учитывать при конструкции полевой установки и при подготовке ее к работе, а также и во время самой работы.

Примечание. Если электромагнитный коэффициент и оказывается очень мал (практически, если $n \leq 0.03$), что можно пренебречь в формулах (20), (21) слагаемым $\varepsilon^2 n^2$ по сравнению с $(1 + \varepsilon)^2$ и получить более простые выражения:

$$C_{ae} = \frac{C_{a\infty}}{1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1}}, \quad (20')$$

$$R_e = \frac{\alpha \varepsilon n}{\omega C_{a\infty} (\varepsilon + 1)^2}, \quad (21')$$

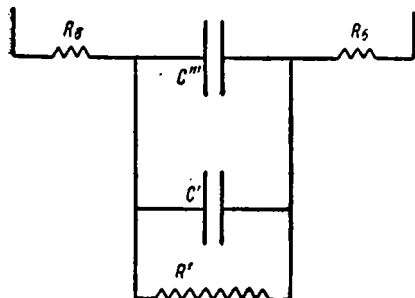
из которых следует:

$$\varepsilon + 1 = \frac{2C_{ae}(C_{a\infty} - C_{a0})}{C_{a0}(C_{a\infty} - C_{ae})}; \quad (43')$$

$$n = 9.425 \cdot 10^{-4} \frac{(\varepsilon + 1)^2}{\varepsilon} \cdot \frac{C_{a0} C_{a\infty}}{C_{a\infty} - C_{a0}} \cdot \frac{R_e}{\lambda_0}; \quad (45')$$

$$\rho = 6000 \frac{\lambda_0}{n\varepsilon}. \quad (44')$$

Во всех этих формулах емкости выражаются в микромикрофарадах, сопротивление — в омах, длина волны — в метрах; удельное сопротивление ρ получается в омах на см² и см; ε дает диэлектрическую постоянную породы относительно воздуха.)



Фиг. 8. Эквивалентная схема горизонтальной антенны, лежащей на земле

§ 9. Все, что выше говорилось, имело в виду антенну, растянутую над поверхностью земли, причем предполагалось, что радиус r_0 антенны мал по сравнению с ее длиной l и высотой подъема над землей h .

На практике иногда бывает можно спустить антенну до самой поверхности земли [Кренке, 1927]; это имеет то преимущество, что емкость ее и потери получают максимальные значения, но зато значительно усиливается и

влияние, которое оказывают все неровности верхней поверхности земли. В этом частном случае эквивалентная схема, изображенная на фиг. 6, упрощается, так как промежуточный слой воздуха отсутствует и антенна одной половиной соприкасается с воздухом, а другой — с землей. Эта



Фиг. 9. Горизонтальная антенна, полупогруженная в землю

упрощенная схема представлена на фиг. 8. Если раздел между воздухом и землей происходит как раз по плоскости симметрии антенны (фиг. 9), то можно принять, что емкость рассеяния C'' делается равной половине емкости антенны в воздухе:

$$C'' = \frac{C_{a0}}{2}, \quad (53)$$

главная емкость C' делается равной половине емкости антенны в земле:

$$C' = \frac{\varepsilon C_{a0}}{2}, \quad (54)$$

а промежуточная емкость равна бесконечности:

$$C'' = \infty. \quad (55)$$

Подставляя эти значения в формулы (32), (33) статьи „Парциальные емкости...“, получим:

$$R_e = \frac{R'}{1 + C_a^2 \omega^2 R'^2}, \quad (56)$$

$$C_{ae} = C_a \left[1 + \frac{1}{C_a^2 \omega^2 R'^2} \right], \quad (57)$$

откуда следует:

$$C_a = \frac{C_{ae}}{1 + R_e^2 C_{ae}^2 \omega^2}, \quad (58)$$

$$R' = R_e \left[1 + \frac{1}{R_e^2 C_{ae}^2 \omega^2} \right], \quad (59)$$

где для краткости введено обозначение

$$C_a = \frac{C_{a0}}{2} (1 + \varepsilon). \quad (60)$$

представляющее по физическому смыслу истинную емкость антенны при данных условиях.

Эти формулы дают возможность найти C_a и R' по измеренным значениям действующей емкости антенны C_{ae} и действующего сопротивления потерь в земле R_e (при заданной длине волны λ_0 или электрической угловой частоте ω).

По нахождению же C_a и R' диэлектрическая постоянная ε_2 и удельное сопротивление ρ определяются на основании соотношения (60) и соотношения

$$R' C' = \frac{\rho \varepsilon_2}{4\pi}, \quad (61)$$

что совместно с (54) дает

$$\rho = 2\pi C_{a0} R'. \quad (62)$$

Расчет производится в следующем порядке:

1. Вычисляем конденсаторную емкость антенны в воздухе по формулам (32) или (32').

2. Вычисляем поправку на излучение по формуле (35).

3. Вычисляем действующее сопротивление потерь антенны, происходящих в земле, по формуле (36).

4, 5 и 6. Вычисляем поправочную величину:

$$Y_e = 1885 \cdot 10^{-6} \frac{C_{2e} R_e}{\lambda_0}, \quad (63)$$

находим ее квадрат Y_e^2 и обратный квадрат $\frac{1}{Y_e^2}$

(C_{2e} выражается в микромикрофарадах, R_e — в омах, λ_0 — в метрах; Y_e имеет нулевую размерность.)

7. Вычисляем истинную емкость антенны по формуле

$$C_a = \frac{C_{2e}}{1 + C_{2e}^2 R_e^2 \omega^2} = \frac{C_{2e}}{1 + Y_e^2}. \quad (64)$$

8. Вычисляем эквивалентное (параллельное) сопротивление потерь антенны по формуле

$$R' = R_e \left[1 + \frac{1}{C_{2e}^2 R_e^2 \omega^2} \right] = R_e \left[1 + \frac{1}{Y_e^2} \right]. \quad (65)$$

- Петровский А. А. Специальный курс электричества для разведчиков-геофизиков. Ч. IV. Электромагнитное поле, 244, ОНТИ, Л. 1935.
- Koenigsberger J. C. Field Observations of Electrical Resistivity and their Practical Application. A. I. M. E. Techn. Publ., № 129, Class L. Geophys. Prosp., № 5. New York 1928.
- Reich H. Ueber d. deutsche geophysikalische Reichsaufnahme. Beitr. z. angew. Geophys., 2, H. 2, 143—151, 1935.
- Fritsch V. Beiträge z. Funkgeologie. Beitr. z. angew. Geophys., 6, H. 3, 298, 1937.
-

Prof. A. A. PETROWSKY

THE APPLICATION OF A HORIZONTAL ANTENNA TO THE ELECTRICAL MAPPING

Summary

The author describes a new method of electrical mapping by means of electric current of high frequency. This method consists essentially in measurements of the effective capacity and effective resistance of a horizontal antenna spread above the ground. On the basis of his previous works and particularly of the conclusions drawn in the paper "The partial capacities and the calculation of losses of a horizontal antenna", the author gives the formulas (20), (21), which enable to calculate the dielectric constant (ϵ) and the specific resistance (ρ) for the area investigated. This paper contains the detailed instructions concerning the method of observations at electrical mapping and their further calculations. The author considers also the influence of the radiation of the antenna upon the obtained results. Besides the general case, when the horizontal antenna is spread above the ground, the author investigates also a partial case of an antenna lying on the very surface of the earth, which is frequently met in practice. As an illustration the author describes the observations, made by the author and his collaborators in Iletskaja Zashita (in 1927) and Verkh-Neivinsk (1929). The obtained values of ϵ and ρ agree in general with the values obtained at the laboratory measurements.

Инж. В. В. АЛЕКСЕЕВ

**ПОЛЕВАЯ ОНДОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ
ЭЛЕКТРОКАРТИРОВАНИЯ****ВВЕДЕНИЕ**

§ 1. Предыдущие конструктивные работы по ондометрии, производившиеся в Мерзлотной лаборатории ГИН Академии Наук СССР в 1936 г., в основном были направлены на рациональный выбор конструкции и тщательное всестороннее исследование ондометрических передатчиков, предназначенных для лабораторных измерений диэлектрических постоянных ϵ и удельных сопротивлений ρ горных пород и других материалов. Результаты этих работ изложены в моей статье "Экспериментальное исследование ондометрических передатчиков",¹ в которую, кроме материалов, относящихся непосредственно к исследованию ондометрических передатчиков, включена и краткая история ондометрического передатчика.

Считая, что основные вопросы освещены в предыдущей статье, мы их не будем повторять и отметим лишь следующее: окончательно сконструированный для ГИН ондометрический передатчик с маркой ПА-3 при испытании оказался вполне пригодным для лабораторных измерений диэлектрических постоянных ϵ и удельных сопротивлений ρ горных пород: он имеет острую настройку, работает надежно и устойчиво, не изменяет показаний от передвижения самого наблюдателя и дает возможность отмечать изменения емкости до десятых долей $CGSE$ единицы.

Возможность фиксировать такие изменения емкости позволила предположить, что передатчик типа ПА-3 может быть использован и для работ в поле волномерным методом, прежде всего для электропрофилирования. Для этого необходимо было: 1) приспособить к этому передатчику антенну, 2) сделать его конструктивно удобным для работы в поле, 3) увеличить механическую прочность деталей и их герметичность в смысле предохранения от влаги и пыли и 4) приспособить источники электропитания.

В этом разрезе и проводились работы в 1937 г. В итоге был выработан полевой образец ондометрического передатчика, предназначенного для полевых измерений ϵ и ρ с помощью горизонтальной антенны для работы „волномерным методом“.

Этот прибор условимся обозначать символами ПА-5 и перейдем непосредственно к его описанию.

ОПИСАНИЕ ПОЛЕВОГО ОНДОМЕТРИЧЕСКОГО ПЕРЕДАТЧИКА ТИПА ПА-5

§ 2. Передатчик ПА-5 представляет маломощный ламповый генератор сложной схемы с индуктивной связью и параллельным питанием.

¹ Труды ГИН АН СССР Т. IX, 349—363, 1939.

Вторичный контур приспособлен для работы на симметричную антенну, лучи которой соединяются непосредственно с обкладками емкости этого контура. Он же является и измерительным. Принципиальная схема и детали ПА-5 в основном аналогичны таковым передатчика ПА-3, описание которого приведено в предыдущей статье.

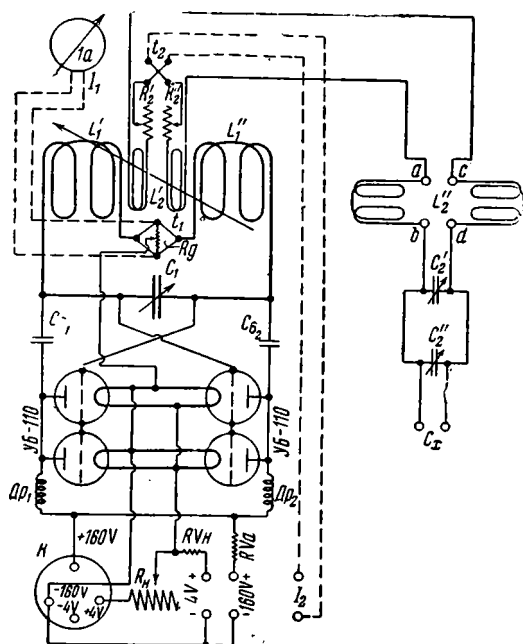
1. Генератор ПА-5 собран по симметричной двухтактной схеме (фиг. 1) с параллельным питанием колебательного контура и гальванической обратной связью.

2. Колебательный контур генератора составлен: из самоиндукции $L_1 \approx 18 \mu\text{H}$, образованной из двух одинаковых, последовательно и согласно включенных секций L_1' и L_1'' по 8 витков провода ПБД-1.8 в каждой.

Секции намотаны без каркаса и для прочности проклеены раствором целлулоида в грушевой эссенции. Диаметр обмотки $2a = 8 \text{ см}$, расстояние между средними витками секций по оси катушек равно тоже 8 см.

3. Емкость C_1 колебательного контура составлена из двух, параллельно включенных и насаженных на общую ось переменных конденсаторов, выпускаемых заводом им. Казицкого для радиоприемников. Эти конденсаторы прямоволнового типа и имеют максимальную емкость около $550 \mu\text{F}$. Следовательно, максимальная емкость агрегата составляет около $1100 \mu\text{F}$.

Составленный из таких деталей колебательный контур $L_1 C_1$ практически перекрывает диапазон от $\lambda = 59 \text{ м}$ до $\lambda = 252 \text{ м}$, т. е. длина волны изменяется больше чем в четыре раза, что вполне достаточно для производства измерений.



Фиг. 1. Схема соединений полевого ондометрического передатчика ПА-5

Настройка генератора на нужную длину волны производится вращением ручки C_1 (фиг. 2).

4. Для измерений действующего значения силы первичного колебательного тока $(i_1)_e$ служит термоэлемент t_1 завода „Электроприбор“, включенный в цепь милливольтметра I_1 , помещенного на передней панели передатчика (см. фиг. 1 и 2) и показывающего непосредственно силу первичного тока в амперах. Термоэлемент состоит из нескольких термпар, образующих мостик, в диагональ которого и включен измерительный прибор I_1 , шунтированный сопротивлением $R_g = 40\,000 \Omega$, являющимся утечкой сетки; от середины этого сопротивления R_g взят отвод к нулевой точке схемы.

5. Колебательный контур $L_1 C_1$ возбуждается при помощи электронных ламп типа УБ-110, помещенных по две параллельно в каждом плече схемы.

Места соединения сеток с обкладками конденсатора C_1 идут на крест; они подобраны экспериментально и обеспечивают правильную работу генератора.

Характер изменения силы первичного тока $(i_1)_e$ в колебательном контуре имеет существенное значение при ондометрических измерениях:

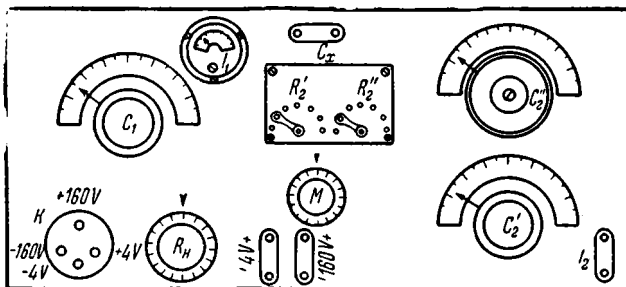
вся теория их выведена из расчета косинусоидального закона изменения силы тока.

Испытание передатчика ПА-3, являющегося прообразом передатчика ПА-5, показало, что генератор, обладающий вышеописанными данными, работает в режиме колебаний первого рода и произведенные с его помощью измерения в пределах точности наблюдений сходятся с рассчитанными теоретически.

6. Из остальных деталей блокировочные конденсаторы C_1 и C_2 имеют емкости по 1000 μF , дроссели Dp_1 и Dp_2 имеют по 60 витков провода ПЭШО-0.25, намотанных прогрессивно на картонных каркасах диаметром в 2 см. Реостат накала $R_n = 15 \Omega$; его ручка находится в левой нижней части панели (см. фиг. 2).

7. Источники питания генератора — батарея анода и батарея накала соединяются с ним при помощи специального тройного шнура, конец которого для удобства включения оправлен нормальным четырехштырьковым ламповым цоколем.

Ламповый цоколь включается в соответствующее ламповое гнездо K (см. фиг. 1 и 2); включение батарей на свободные концы шнура ясно из тех же рисунков.



Фиг. 2. Панель ондометрического передатчика ПА-5

Для контроля напряжения накала V_n служат штепсельные гнезда, ближние к ручке реостата накала R_n (см. фиг. 2) и помеченные "4в". Контроль напряжения анода V_a осуществляется при помощи пары гнезд, помеченных на фиг. 1 и 2 "160в". В цепь этих контрольных гнезд включены сопротивления RV_n и RV_a (см. фиг. 1), служащие добавочными сопротивлениями для включения контрольного вольтметра (их величина зависит от данных прибора, который приспособляется для этих измерений).

8. Нормальный режим работы генератора следующий: батарея накала V_n берется напряжением в 4.5—5 V, и по вольтметру, включенному в соответствующие гнезда, устанавливается реостатом накала R_n напряжение в пределах от 3.6 до 4 V, которое во время измерения поддерживается постоянным.

Нормальное напряжение батареи анода $V_a = 160 \text{ V}$, но прибор будет удовлетворительно работать как при 150 V, так и при 180 V.

Регулировать напряжение на анодах ламп по техническим причинам неудобно; поэтому ограничиваемся фиксацией его по вольтметру до и после измерения.

При нормальном режиме генератора сила тока $(i_1)_e$ в его колебательном контуре изменяется в зависимости от установленной длины волны λ и колеблется от 0.2 A до 0.9 A.

§ 3. Следующей необходимой и не менее ответственной частью ондометрического передатчика, как передатчика сложной схемы, является вторичный контур, служащий в нашем приборе для точных измерений методом резонанса.

Для этой цели вторичный контур должен обладать следующими свойствами:

1) малым декрементом затухания, 2) постоянством своих параметров, 3) иметь переменную связь с контуром генератора, 4) иметь воз-

возможность увеличивать активное сопротивление R_2 , не нарушая настройки контура.

Вторичный контур L_2C_2 передатчика ПА-5 удовлетворяет в достаточной степени изложенным требованиям и устроен следующим образом:

1. Самоиндукция его L_2 составлена из двух частей: L_2' и L_2'' (см. фиг. 1).

Самоиндукция L_2' является катушкой связи и укреплена на оси, поворотом которой за ручку M (см. фиг. 2) она может вводиться в промежуток между секциями катушки L_1 первичного контура и тем самым увеличивать или уменьшать коэффициент взаимной индукции M между первичным и вторичным контурами.

Катушка L_2' состоит из двух секций, намотанных в выточках бакелитового каркаса диаметром $2a=5.8$ см. В каждой из них уложено по 6 витков провода ПШД-0.6. В середину катушки L_2' включены сопротивления R_2' и R_2'' и термоэлемент t_2 , о назначении которых будет сказано ниже.

Самоиндукция L_2'' служит дополнительной при настройке на волны, длина которых больше $\lambda=100$ м. Она состоит тоже из двух секций, намотанных каждая на своем эбонитовом каркасе диаметром $2a=4$ см и имеющих по 17 витков провода ПЭШО-0.25. Обе секции симметрично укреплены на ламповом четырехштырьковом цоколе, к штырькам которого припаяны концы обмоток. Ламповый цоколь с катушками может быть включен в гнезда a, b, c, d (см. фиг. 1), представляющие собой ламповую панель; в случае работы на волнах короче 100 м дополнительную самоиндукцию L_2'' вынимают и заменяют ее другим ламповым цоколем с замкнутыми накоротко соответствующими штырьками.

Величина самоиндукции вторичного контура при одной катушке связи L_2' равна $L_{20}=16.6 \mu\text{H}$ (гнезда ab и cd закорочены). При включении добавочной самоиндукции L_2'' она равна $L_2=70.0 \mu\text{H}$.

Обе величины L_{20} и L_2 получены экспериментальным путем.

2. Емкость C_2 вторичного колебательного контура L_2C_2 представлена двумя переменными конденсаторами C_2' и C_2'' (см. фиг. 1).

Конденсатор C_2' взят обычного прямоугольного типа, выпускаемого заводом им. Казицкого, с максимальной емкостью в $271.2 \mu\text{F}$.

Конденсатор C_2'' управляется ручкой C_2' (см. фиг. 2) и служит для грубой настройки вторичного контура в резонанс, почему его назовем „установочным“.

Для точной настройки и отсчетов при измерениях служит „отсчетный“ прямоемкостный переменный конденсатор C_2'' , управляемый при помощи верньерной ручки, помеченной на фиг. 2 C_2'' (верхняя прагая ручка). Диапазон изменения его емкости составляет $45.1 \mu\text{F}$. Шкала разделена на 180° ; очевидно, что на одно деление будет приходиться около $0.25 \mu\text{F}$, отсчет же можно производить с точностью до 0.2 деления. Поэтому точность одного отсчета можно принимать равной $0.05 \mu\text{F}$.

При положении стрелок обоих конденсаторов C_2' и C_2'' на нуле начальная емкость вторичного контура L_2C_2 при одной катушке связи L_2' и закороченных гнездах ab и cd равна $(C_2)_0=20.4 \mu\text{F}$. При включенной дополнительной самоиндукции L_2'' она равна $(C_2)_0''=30.1 \mu\text{F}$.

Все данные емкости получены экспериментально.

Параллельно обкладкам емкости C_2 у верхней кромки панели выведены гнезда C_x (см. фиг. 1 и 2), предназначенные для включения антенны или другого приспособления для измерений.

3. Для увеличения активного сопротивления вторичного контура, необходимого при измерениях удельных сопротивлений ρ ,¹ служат безин-

¹ Проф. А. А. Петровский. Альтернатор, эквивалентный ламповому генератору. ТГТбп, № 44, 555—569, 1927.

дукционные сопротивления R_2' и R_2'' , включенные, как упоминалось выше, симметрично в середине катушки самоиндукции L_2' (см. фиг. 1).

Эти сопротивления выполнены из тонкой манганиновой проволоки в виде небольших петель — бифиляров, натянутых на эбонитовом основании. Концы этих петель соединены с контактами коммутаторов R_2' и R_2'' , видимых на лицевой стороне панели (см. фиг. 2). Оба сопротивления R_2' и R_2'' выполнены одинаково, изменяются скачкообразно перестановкой ползунков коммутаторов и могут увеличивать активное сопротивление вторичного контура примерно на 120 Ω .

4. Между сопротивлениями R_2' и R_2'' включен термoelement t_2 (см. фиг. 1), служащий для измерения действующего значения вторичного тока $(i_2)_e$ и для настройки.

Милливольтметр, служащий индикатором, включается в гнезда I_2 (см. фиг. 1 и 2) и градуируется на силу тока с тем, чтобы определять не только экстремумы кривой настройки, но и их абсолютные значения в амперах.

ПОЛЕВАЯ ОНДОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ПЕРЕДАТЧИКОМ ТИПА ПА-5

§ 4. 1. Полевой ондометрический передатчик типа ПА-5 смонтирован в прочном березовом ящике, в крышке которого помещены необходимые измерительные приборы: вольтметр для контроля напряжений накала и анода и милливольтметр, регистрирующий при помощи термoelementa t_2 (см. фиг. 1) силу тока $(i_2)_e$ во вторичном контуре. В крышке же предусмотрено место для помещения антенной головки, о которой говорится ниже, и шнура, подводящего к генератору напряжение питания.

В небольшом свободном пространстве между крышкой ящика и панелью управления помещается антенный фидер, устроенный из двух параллельных голых проводов диаметром около 2 мм, скрепленных на одинаковом расстоянии эбонитовыми колодочками. Для удобства включения длина его может быть изменена специальной наставкой. Концы фидера оправлены обычными штепсельными вилками.

2. В качестве источника анодного напряжения применена батарея, состоящая из четырех последовательно соединенных 45-V батарей типа ВД-12, производства завода „Мосэлемент“, емкостью в 12 Ah; Средний разрядный ток такой батареи около 25 mA.

Эти батареи помещены по две в прочном деревянном ящике, пропитанном масляным лаком. Таким образом, для нормальной работы генератора необходимо два таких ящика.

Батарею накала, к сожалению, не удалось составить из определенного типа элементов: во время постройки станции на рынке было очень трудно достать элементы. Поэтому при испытаниях станции мы пользовались для накала лампы батарей щелочных аккумуляторов. В дальнейшем все-таки имеется в виду достать подходящие элементы и приспособить их для питания передатчика.

3. Во время работы ящик с передатчиком устанавливается на прочной массивной треноге, построенной с расчетом, чтобы, открыв крышку ящика и сидя на обычном табурете (практически в поле табурет заменяют вышеуказанные батарейные ящики), было удобно наблюдать измерительные приборы и манипулировать с передатчиком.

К наружной стороне задней стенки ящика, по середине ее, при помощи двух медных винтов крепится вертикальная рейка с прорезью, один конец которой (рейки) упирается в землю. По этой рейке может перемещаться „антенная головка“.

Ящики с батареями ставятся на землю перед прибором, а батареи включаются в передатчик при помощи тройного шнура и лампового цоколя.

§ 5. 1. Антенна представляет симметричный десятиметровый диполь из бронзового канатика диаметром около 2 мм.

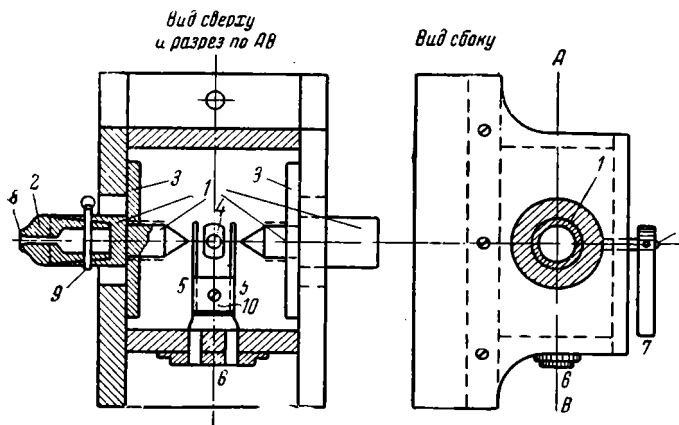
Диполь натягивается между двумя фотографическими штативами, снабженными блоками и противовесами для натяжки. Все натяжное устройство позволяет менять высоту h антенны над землей в пределах от $h=10$ см до $h=90$ см.

2. Диполь включается во вторичный контур передатчика, как уже упоминалось, при помощи специальной „антенной головки“.

Устройство антенной головки показано на фиг. 3:

В небольшой дубовой коробочке на эбонитовых пластинках 3 укреплены латунные муфты 1, в углубления которых вставляются вкладыши 2. В отверстие 8 каждого вкладыша пропускается конец антенного канатика и закрепляется там узелком; при сборке установки вкладыш вставляется в гнездо муфты и там крепится чекой 9.

На фиг. 3 вкладыш 2 показан только на одной муфте.



Фиг. 3. Антенная головка полевого ондометрического передатчика ПА-5

Внутренние концы муфт оканчиваются конусами, около концов которых на расстоянии около 0.2 мм помещены упругие контактные пластинки 5, изолированные друг от друга эбонитовым основанием 10. Расстояние между вершинами конусов $2r$ равно 3.16 см. В промежутке между контактными пластинками на оси вращается эбонитовый овал 4, ось которого выведена через крышку и снабжена ручкой 7. Контактные пластинки соединены с штепсельными гнездами 6, которые при помощи фидера соединяются с обкладками емкости вторичного контура. Толщина каждой пластинки 0.6 мм.

Поворотом овала 4 на 90° от положения, указанного на фиг. 3, можно прижать контактные пластинки к остриям конусов муфт и тем самым подключить диполь к передатчику. Обратное вращение овала отключает диполь от передатчика.

3. Такое устройство для включения антенны необходимо по следующим соображениям:

Измерение ϵ при помощи антенны производится по наблюдениям изменения емкости антенны над исследуемой средой. Эти изменения иногда не превосходят нескольких десятых долей микромикрофарды и должны сравниваться с теоретической расчетной емкостью нашего диполя в пустоте и над идеальным проводником.

Поэтому совершенно необходимо, чтобы измеряемая емкость диполя не искажалась добавками, происходящими от емкости фидера и других деталей; это и достигается вполне применением вышеописанного выключателя.

Изменение емкости при включении и выключении, вносимое самим выключателем такой конструкции, ничтожно и во всяком случае много меньше погрешности наблюдений; емкость же муфт и вкладышей тщательно измеряется и учитывается при обработке наблюдений.

§ 6. Установка передатчика ПА-5 производится следующим образом:

1) Прибыв на место, устанавливаем передатчик на треноге и перед ним ящики с батареями.

2) Привинчиваем к ящику вертикальную рейку, уперев ее свободным концом в землю, и укрепляем при помощи стопорного винта на нужной высоте h антенную головку; при помощи фидера соединяем ее с гнездами C_x , находящимися на панели управления передатчика (см. фиг. 2).

3) Устанавливаем концевые треноги с таким расчетом, чтобы натянутый диполь представлял прямую линию, параллельную длинной стороне ящика передатчика.

4) Регулируем на треногах блоки так, чтобы выдержать высоту h диполя над землей по возможности одинаковой на всем его протяжении.

5) Вставляем концы диполя, снабженные вкладышами, в муфты антенной головки. Другие концы через изоляторы привязываем к шпагатам противовесов, пропущенным через блоки треног; осторожно опускаем противовесы и окончательно регулируем высоту h диполя над землей.

6) Включаем источники питания и задаем на генераторе требуемую длину волны λ , после чего тщательно контролируем напряжение анода и устанавливаем напряжение накала на определенной величине. После этого приступаем к измерениям.

§ 7. Измерение производим в следующем порядке:

1) Убедившись, что антенна выключена, ставим желаемую длину волны на первичном конденсаторе C_1 , устанавливаем ручку связи M (см. фиг. 2) так, чтобы получалась Λ -кривая, и настраиваем вторичный контур в резонанс. При настройке отсчетный конденсатор полезно включить почти полностью, подогнать резонанс сначала при помощи установочного, а затем начисто уже при помощи отсчетного конденсатора.

2) Получив отсчеты по установочному C_2' и отсчетному конденсатору C_2'' и отметив показание $(i_2)_e$ милливольтметра-индикатора, включаем антенну, снова подстраиваем резонанс, но уже только при помощи отсчетного конденсатора, и опять производим отсчеты в прежнем порядке. Обычно оказывается, что сила тока $(i_2)_e$ при включенной антенне меньше, чем без нее. Это указывает на наличие потерь, но на положение резонанса почти не влияет.

3) Разность отсчетов отсчетного конденсатора с антенной и без нее дает нам емкость антенны C_a в данной точке, при взятой нами высоте подвеса h . Для надежности производим несколько повторных измерений и, убедившись в их правильности, переносим станцию на другое место.

Для наглядности приводим таблицу емкостей антенны C_a , полученных при испытании установки летом 1937 г. над различными средами при высоте подвеса ее $h=20$ см и длине волны $\lambda=209$ м.

Увеличение емкости антенны с повышением проводимости среды вполне соответствует теоретическим предположениям, а приведенные в таблице цифры говорят за то, что при помощи станции ПА-5 можно отмечать некоторые особенности среды, находящейся под антенной.

Место измерения	C_a мкФ
Двор ЛГИ; песчаная площадка . . .	24.75
Пулковская гора; на песке, слегка увлажненном дождем	25.10
Недалеко от Пулковской горы, у пруда около воды; вода легко выжималась из почвы ногой	25.72

Само собой понятно, что для успешного дальнейшего практического использования установка ПА-5 должна быть предварительно тщательно изучена и исследована как в лаборатории, так и в небольших экскурсиях в поле, близ лаборатории.

В заключение приношу глубокую благодарность за внимание к этой работе и просмотр рукописи руководившему работой моему учителю профессору А. А. Петровскому.

V. V. ALEKSEIEV

THE FIELD ONDOMETRIC (WAVE MEASURING) APPARATUS FOR THE ELECTRICAL MAPPING

Summary

The paper contains a detailed description of the field ondometric transmitter PA-5 and of the apparatus for the electrical mapping by means of a horizontal antenna, designed by the author under prof. A. A. Petrowsky's direction. The author also gives a detailed instruction concerning the operation of the apparatus and reports the results of preliminary measurements. The characteristic peculiarity of the apparatus is a special device allowing either to switch the horizontal antenna in or to separate the latter from the transmitter, the capacity of the antenna remaining constant. The antenna consists of two symmetrical wings, each of them being made of a single uniform conductor. The length of each wing is 5 m. The wave length of the transmitter can be changed from $\lambda=59$ m. to $\lambda=252$ m. The voltage on the valve plates is 160 V. The transmitter is designed according to the „push-pull“ system and develops the current from 0.2 A to 0.9 A in the primary circuit. The measurements of the effective capacity are made with the accuracy up to $0.1 \mu\mu F$, the change of the capacity being quite distinct when the antenna is stretched 60 cm. high above the dry and wet ground.

А. П. БАЖЕНОВА

**НЕКОТОРОЕ РАЗВИТИЕ ОПЫТОВ ТЕБЕРА ПО ПУЧЕНИЮ ГРУНТОВ
С ВЕРТИКАЛЬНОЙ СЛОИСТОСТЬЮ**

Замерзание грунтов и пучение их при этом обычно связано с миграцией воды в них, — это в настоящее время является общепризнанным фактом. На эту тему в советской литературе имеются работы А. Е. Федосова, В. И. Морошкина, М. И. Сумгина и других.

Из зарубежных ученых укажем на труды Буюкоса, Бескова и Тебера. Но по существу дела всеми этими работами — и советскими и зарубежными — пока что доказан только факт миграции воды при замерзании грунтов; если мы коснемся деталей, то многое все еще остается неясным. В самом деле, если мы наблюдаем в замерзшем грунте довольно мощные — измеряемые миллиметрами и даже сантиметрами — прослойки льда, то вполне определенно ответить на вопрос, каким образом получились эти прослойки, мы не сможем. Получились ли эти прослойки при миграции воды в жидком виде или в виде пара или же при миграции одновременно и в том и в другом виде и в какой пропорции — мы с совершенной ясностью ответить не можем. Точно так же и о механизме образования прослоек льда существуют разные мнения — одни говорят о напряжениях в замерзающих грунтах, в результате чего вода в них передвигается и замерзает, скапливаясь в одном месте, — другие о молекулярных силах, проявляющихся при кристаллизации воды, о силах кристаллизации. Как видим, и этот вопрос находится в состоянии дискуссии.

А между тем, если перейти от теории к практике, то здесь часто понадобится знание не только решения вопроса в целом, но решения именно в частностях, в деталях, с тем, чтобы, опираясь на знание этих деталей процесса, принимать те или иные практические решения, осуществлять те или иные конкретные мероприятия.

Из зарубежных работ по изучению процессов замерзания (а отчасти и таяния) грунтов выделяются работы, осуществленные за последние 10—20 лет американским ученым С. Тебером.

Опыты Тебера были весьма разнообразны. Он исследовал влияние целого ряда факторов на пучение грунта при замерзании, как то: величины пор, размера частиц, содержания воды в замерзающих грунтах, скорости замерзания, влияния глубины промерзания на рост пучин и других факторов.

Тебер ввел понятие о замерзании грунтов в замкнутых и незамкнутых системах.¹ Он установил, что при замерзании грунта в незамкнутых системах давление развивается в направлении роста кристаллов, которое в свою очередь определяется главным образом направлением охлаждения. Много и других интересных положений можно найти в работах Тебера;

¹ Если при замерзании грунта вода может поступать в замерзающий объем или выходить из него, то такая система называется незамкнутой.

построения его опытов оригинальны, а описательная часть изложения увлекательна, хотя самые опыты часто далеко не исчерпывают затронутых автором вопросов.

Что же касается объяснения явлений, то здесь остается желать многого. Цифрами Тебер тоже оперирует скупно.

Приведем несколько рассуждений Тебера. Анализируя механизм роста кристаллов льда, он говорит:

„Растущий кристалл льда находится в соприкосновении с тонкой пленкой воды, подобной адсорбированному слою, который образуется на многих других твердых телах, приходящих в соприкосновение с водою. Когда одна молекула в пленке ориентируется и притягивается к кристаллу, на ее место становится другая из прилежащего участка жидкости. Так поддерживается цельность пленки“.

И далее:

„Сцепление между молекулами в пленке и между этими же молекулами и льдом бывает сильнее, чем между молекулами воды, которые расположены не так близко к кристаллам льда“ [Тебер, 1930].

Эти и подобные рассуждения нельзя назвать точными и в полной мере убедительными. Впрочем, и сам Тебер называл свои объяснения гипотезами. Да и слабая разработанность вопроса о процессах миграции воды при замерзании грунтов не давала возможности Теберу дать более точные объяснения происходящих процессов.

Приведем перевод целой главы описания одного из опытов Тебера с вертикально-слоистыми грунтами из его работы „Морозное пучение“ [Тебер, 1929].

„Неравномерное вспучивание. Простое, равномерное пучение поверхности создает небольшие трещины в дорожной одежде и слегка расстраивает строение полотна дороги; но неравномерное вспучивание является очень разрушительным. Местная неоднородность в строении почвы, и различная ее влажность служат двумя главными причинами неравномерного вспучивания. Различие в характере покрывающего слоя, например снега, мостовой, материала основания, растительности и т. д. вероятно имеет большое значение. Местные явления инсоляции, просушивание воздухом в возвышенных местах и различие давления от статической нагрузки являются второстепенными факторами.“

Эффект от различия в строении почвы легко иллюстрируется опытом. Картонный цилиндр (carton) с дырчатым дном и вертикальной перегородкой набивается тонким песком с одной стороны и глиной с другой; после того как материал уложен на место, перегородка постепенно удаляется. Цилиндр ставят на песок, насыщенный водой, и вода постепенно поднимается до верха, вытесняя воздух. Проникновение воды идет более быстро в тонком проницаемом песке, а затем часть воды распространяется в глину. Цилиндр закапывался до верха в сухой песок, так что замораживание распространялось сверху вниз, причем дно цилиндра находилось все время в насыщенном водой песке. Сперва заметно пучится только глина, но потом также начинает подниматься песок, потому что талая глина к концу опыта вдавливаясь под него вниз и песок выпирается наружу и в одну сторону движением глины.

Другой опыт был сделан так же, но с той разницей, что после насыщения песка и глины водой, цилиндр был запечатан с дна путем погружения его в расплавленный парафин. При замораживании в глине образовались слои льда 3—4 мм толщиной, причем необходимая для этого вода поступала из нижней части глины и из песка.

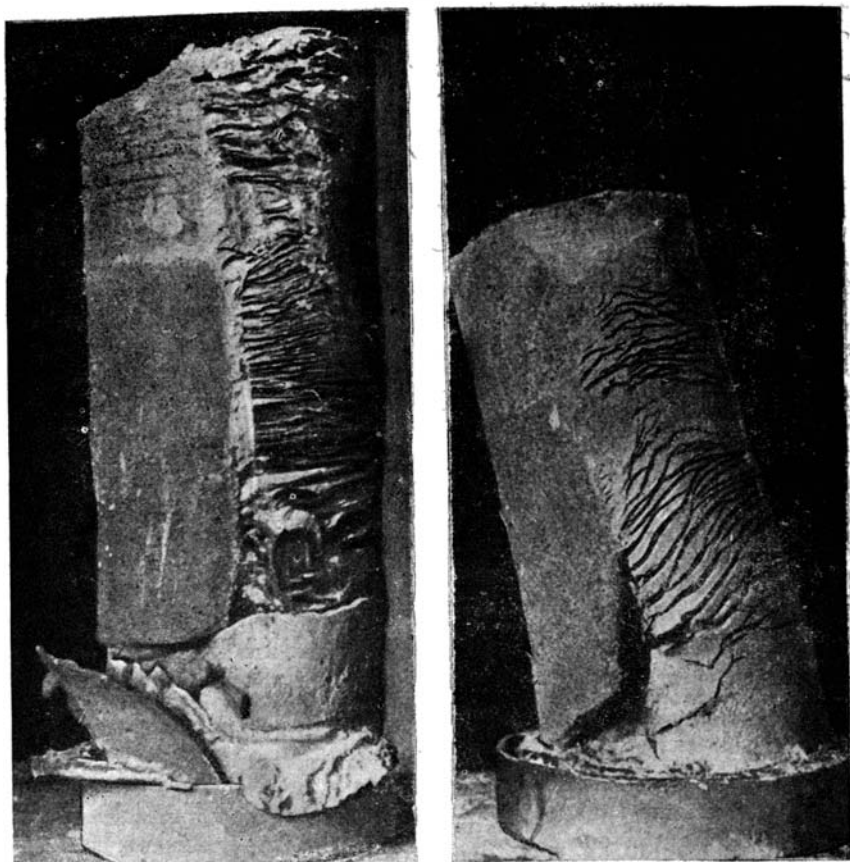
В конце опыта, когда цилиндр был вскрыт, нижняя половина песка была настолько суха, что песок свободно высыпался и необходимо было действовать с осторожностью, чтобы предотвратить разрушение грунта для его фотографирования. Верхняя часть песка была полностью сцементирована льдом. Вследствие неравномерного пучения цилиндр с грунтом начинает наклоняться в сторону от глины, которая отрывает стенку картонного цилиндра. Тем не менее и при грунтах однородного строения может случиться неравномерное пучение при благоприятных условиях, когда имеется разница в степени влажности и особенно разница в положении уровня воды относительно дневной поверхности (глубина залегания грунтовых вод). Отношение поднятия грунта к глубине промораживания убывает по мере того, как высота колонки грунта растет над искусственным горизонтом грунтовых вод“ (фиг. 1).

Как видим, описание этого опыта дано в самых общих выражениях. Отметим, что свои опыты с грунтами вертикальной слоистости Тебер проводил не как самостоятельную работу, а как один из эпизодов всей

серии своих испытаний, а выводы по ним он делал по совокупности и в тесной увязке с другими своими работами.

В общем опыты Тебера представляют все же исключительный интерес, и, по нашему мнению, мерзлотоведам придется часто обращаться к его работам, развивая и дополняя их.

Нашу работу мы начали еще в 1936 г. с повторения опытов Тебера с вертикальной слоистостью грунта, причем мы держались возможно близко к прототипу. И тогда мы получили результаты морфологически



Фиг. 1. Слева. Мерзлый цилиндр, половина песка и половина глины. Много выделившегося льда в глине, но не в песке

Справа. Дифференциальное смещение цилиндра, вызванное выделением льда в глине, но не в песке. Впадина образовалась от высыпания сухого песка

и по общему характеру миграции воды тождественные с результатами Тебера.

Сравним описанные выше опыты Тебера с вертикально-слоистыми грунтами (фиг. 1) с нашими опытами.

В опытах Тебера было отмечено:

- 1) образование прослоек льда в замерзшем глинистом грунте и отсутствие таковых в замерзшем песчаном грунте;
- 2) пучение глинистого грунта и отсутствие самостоятельного пучения песчаного грунта;
- 3) высушивание песчаного грунта в его нижних частях;
- 4) два типа миграции воды в грунтах при их замерзании: первый тип — миграция воды в глинистых грунтах — это передвижение воды

по направлению к источнику холода и образование ледяных слоев; второй тип — это передвижение воды в песчаных грунтах по направлению от источника холода и отсутствие ледяных прослоек.

Приведем из нашей работы 1936 г. результаты одного из опытов, в котором одна половина цилиндра (по вертикали) занята глиной (№ 4), а другая — песчаной фракцией диаметром частиц 0.5—1.0 мм. Опыт производился с возможностью подтока воды в грунт в процессе его промерзания (фиг. 2).

На помещенной фотографии мы видим:

- 1) наличие прослоек льда в глине,
- 2) отсутствие таких прослоек в песке,
- 3) пучение глинистого грунта над песчаным.

Высушивания нижних слоев песка не могло быть, так как опыт велся с подтоком воды.

Мы в наших опытах воспроизвели опыты Тебера с достаточной полнотой. Следовательно, и механика процесса передвижения воды в замерзающих грунтах должна быть та же самая, какая была и в опытах



Фиг. 2. Цилиндр с мерзлым грунтом, половина песка и половина глины № 4. Много выделившегося льда в глине, но не в песке.

Наблюдается пучение глины

Тебера, давшего в своих работах и некоторые разъяснения этой механики. Они сводятся в основном к указанной выше силе растущего кристалла, ориентирующей молекулы воды и притягивающей их к себе для дальнейшего увеличения кристалла.

Для глины это объяснение на первый взгляд как будто можно принять безоговорочно, так как налицо имеются прослойки льда, кристаллы которого и образовались, по Теберу, указанным выше способом.

Но является вопрос, почему же таких прослоек льда нет в песке. Ведь и в нем одновременно с глиной (а может быть и раньше, скажем мы) образуются кристаллы льда; почему же эти кристаллы не притягивают к себе молекул воды из прилегающих к ним пленок воды, другими словами, не проявляют организующей силы растущего кристалла.

Тебер [1930] для объяснения этого говорит, что наличие крупных частиц в грунте мешает образованию ледяных прослоек. Так, он отмечает, что уже выделение льда (прослойками) в грунтах с частицами размером около 0.07 мм незначительно и, наоборот, в материалах с величиной частиц в один микрон или меньше лед легко образуется.

Если добавить к песку глины даже до 50%, то при замерзании такой смеси прослоек льда выделяется мало, а следовательно в таких случаях сила кристаллизации уже не действует организующим образом на молекулы льда для образования ледяных слоев, как это получается в глинах.

Тебер [1929] пытается дать этому явлению следующее объяснение:

„Действие крупных частиц, мешающих выделению воды во время замораживания, объясняется, вероятно, следующим образом. Во время роста толстого слоя льда в почве, снижения изотермы замерзания (в грунте) не наблюдается, в то время как вода, притянутая вверх через капилляры, пересекает изотермическую поверхность, обращается в лед, а грунты, лежащие над ней, поднимаются на расстояние, равное толщине образовавшегося при этом льда.

Для того чтобы удержать в стабильном положении изотерму замерзания по отношению к незамерзшей почве, надо тепло, которое уходит через замерзшие слои, уравновешивать с теплом, приносимым через незамерзшие слои поднимающейся водой, и с теплом, которое освобождается при обращении воды в лед. Изотерма замерзания не может продвигаться в воде с той же скоростью, что и в минеральных слоях почвы, так как вода является худшим проводником тепла, удельная теплота в ней выше

и, кроме того, много тепла выделяется при образовании льда. Следовательно, если кристалл льда при нарастании вниз соприкасается с верхней частью большой частицы почвы и начнет ее окружать так, что температура верхней части частицы упадет ниже точки замерзания, то температура нижней части этой частицы достигнет точки замерзания раньше, чем вода, с которой она соприкасалась. Поэтому замерзание воды происходит частью от наружной поверхности больших минеральных частиц, соприкасающихся с водой, а не только вследствие нарастания кристаллов к низу, как это наблюдается при замерзании чистой воды“.

И продолжает в другом месте той же статьи:

„Для образования слоя льда, состоящего в большинстве случаев из призматических кристаллов, капилляры, снабжающие его водой, должны быть близко расположены“.

Эти рассуждения вполне определенно можно отнести к тем же гипотетическим рассуждениям, к которым сам Тебер относил свои рассуждения, приведенные нами выше.

В опытах, проведенных в 1930 г. М. И. Сумгиным, получены линзы льда в таких грунтах, в каких у Тебера прослоек льда, или, как он говорит, „выделенного“ льда, не получилось, например в песке следующего механического состава:

Фракции (в мм)	0.5	0.5—0.25	0.25—0.05	0.05—0.01	0.01
Проценты фракций по весу	0.0	84.17	14.58	0.57	0.68

При опытах с этим грунтом в цилиндрах на глубине 6—7 мм образовывалась ледяная линза общим весом немного более полуграмма, что составляло 1% от всей воды, находившейся в испытуемом образце грунта.

В этих опытах вода собиралась в одно место и замерзала в виде линзы чистого льда несомненно под влиянием гидростатических сил, возникающих в грунте в процессе его замерзания.

Отличие только что упомянутых опытов от опытов Тебера заключается в том, что опыты замораживания грунтов, производившиеся М. И. Сумгиным, можно безусловно считать опытами в замкнутой системе, тогда как Тебер считал, что в его опытах происходит замерзание грунтов в незамкнутой системе. А в таких системах, по Теберу, если при замерзании насыщенной влагой почвы вспучивание будет незначительным или его совсем не будет, то часть воды под давлением (от увеличения объема воды при замерзании) проникает через поры в почве ниже зоны замерзания, сжимая или вытесняя при этом воздух.

То же происходит и в лаборатории: при отсутствии вспучивания вода образующимися кристаллами льда проталкивается вниз и выходит из цилиндрического сосуда [Тебер, 1930—2].

На основании работ Тебера можно прийти к заключению, что в области изучения пучения вертикально-слоистых грунтов сделано было очень мало. Практическое значение этих работ могло бы быть значительным, если бы явления промерзания таких грунтов были освещены и проработаны более детально и при этом учтены комбинации различных грунтов. Опыты Тебера были проведены без учета условий залегания разных грунтов в природе и в основном не решают поставленных перед нами задач для районов распространения вечной мерзлоты. Кроме того, Тебер при постановке своих опытов не учитывал ряда условий, влияющих на процессы пучения.

Сущность явлений пучения вертикально-слоистых грунтов Тебером не была полностью вскрыта, так как в результате постановки его опытов очень многое остается еще неясным. Неясности эти можно сформулировать следующим образом:

1. В отношении твердой фазы грунтов

1) О какой глине идет речь в опытах Тебера — тяжелой, средней или легкой? Следовало бы иметь хотя бы гранулометрический состав этой глины.

2) То же в отношении песка — нет его механического состава.

3) Как вывод из предыдущих двух пунктов — неясно, где же проходит граница, по одну сторону которой проявляются при замерзании грунтов свойства глины, а по другую свойства песка.

2. В отношении воды (жидкая фаза грунтов)

1) Не указано, при каких процентах влажности в глине и песке происходят в вертикально-слоистых грунтах при их замораживании явления, описанные Тебером.

2) Где граница влажности, по одну сторону которой описанные Тебером явления происходят, а по другую — нет?

3) Оба отмеченные выше пункта должны быть выяснены для целого ряда комбинаций грунтовых разностей (пески и глины; пески и пылевато-иловатые грунты; пески и супеси; пески и суглинки).

3. В отношении температур, при которых производились опыты

1) Не указаны температуры охладителя (воздуха).

2) Не указана температура грунта — а) глины, б) песка.

4. В отношении процессов, происходивших в грунтах при их промораживании

1) Нет измерений увеличения объема а) глины, б) песка.

2) Нет определения температурного градиента и в связи с ним — скорости проникновения вглубь нулевой изогеотермы а) в глине, б) в песке.

3) В связи с температурным градиентом нет определения скорости проникновения вглубь грунта нижней поверхности кристаллообразования.

4) Не выяснено, действительно ли в глине влага, служившая для образования прослоек льда, передвигалась в фазе жидкой воды, а не в фазе пара, или же одновременно и в фазе воды и в фазе пара.

5) Нет подтверждения указания Тебера о том, что глина между прослойками льда сохранила исходную влажность, тогда как в опытах Федосова [1935] в слоях между ледяными прослойками глина имела резко уменьшенную влажность.

6) Действительно ли вода в жидкой фазе в глине передвигается под воздействием сил кристаллизации или же под воздействием других сил (например, напряжений в грунтах в процессе их замерзания)?

7) Каков процесс передвижения воды в песке во время кристаллизации воды?

8) Как и под действием каких сил происходит переход воды из песка в глину?

9) При промораживании грунтов сверху — давление происходит только ли в этом направлении или распространяется и в других направлениях?

10) В процессе пучения глины у Тебера наблюдалось воздействие глины на прилегающий к ней песок (т. е. распространение давления в стороны); спрашивается — как согласовать это с замерзанием грунтов в открытых системах (в данных опытах)?

5. В отношении общих условий производства опытов Тебера

Можно ли опыты Тебера действительно отнести к опытам замерзания грунтов в открытых системах?

Вот какое количество вопросов, требующих разрешения, возникает при подробном ознакомлении с опытами Тебера с вертикально-слоистыми грунтами. Перечень наш не является исчерпывающим: мы не затронули ни петрографического состава грунтов, ни молекулярных сил, играющих несомненно огромную роль во всех этих явлениях.

Поднятые нами вопросы в значительной части относятся к опытам Тебера как к частному случаю, но это не меняет дела. Чтобы полностью понять явления, происходящие при замерзании грунтов, необходимо проделать огромную работу, которая займет несколько лет в течение нескольких лет.

Мы в 1937 г. в нашей работе выполнили только небольшую часть поставленных задач, поскольку позволяли нам это сделать наличные

Таблица 1

Грунты и фракции, использованные для опытов

№ грунтов и фракций	Наименование грунтов и фракций	Откуда получен грунт
1	Песок	С московского строительства, без указания точного места взятия
2	Пылеватый песок	Со строительства метро 2-й очереди, из шахты № 55
3	Пылеватый средний суглинок	С Волоколамского шоссе, 90-го километра
4	Белая пылеватая глина	Без указания точного места взятия
5	Майкопская пылеватая глина	Со строительства Волга — Дон, из шахты № 543
6	Фракция диаметром 2—1 мм	Получена из песка № 1 просеиванием через сита соответствующего диаметра
7	Фракц. диам. 1—0.5 "	То же
8	" 0.5—0.15 "	То же
9	" 0.25—0.05 "	Получена из песка отмучиванием на приборе Сабанина
10	" 0.05—0.01 "	Получена измельчением в агатовой ступке химически очищенного песка и последующим отмучиванием на приборе Сабанина
11	" 0.01—0.005 "	То же
12	Фракция кембрийской глины, диаметром меньше 0.005 мм	Получена отмучиванием на приборе Сабанина из кембрийской глины из-под Ленинграда

Таблица 2

Механический состав испытывавшихся грунтов

№ грунта	Наименование грунта	Фракции в % на абсолютно сухую навеску							
		2—1.15 мм	1.5—1 мм	1—0.25 мм	0.25—0.05 мм	0.05—0.01 мм	0.01—0.005 мм	0.005—0.001 мм	< 0.001 мм
1	Песок	3.30	12.64	75.31	7.98	0.12	0.65	—	—
2	Пылеватый песок	—	—	0.14	77.10	19.22	1.52	0.25	1.77
3	Пылеватый средний суглинок	0.25	1.15	1.22	3.99	38.23	37.37	4.83	13.96
4	Белая пылеватая глина	—	—	0.92	2.22	21.50	30.85	9.11	35.40
5	Майкопская пылеватая глина	—	—	0.26	9.36	14.71	32.91	15.91	26.85

силы и то простейшее оборудование, которое было в нашем распоряжении. К изложению сделанного нами мы и переходим.

Для постановки опытов с вертикально-слоистыми грунтами нами были использованы следующие грунты и фракции грунтов (табл. 1).

Механический состав взятых грунтов приводится в табл. 2.

Пористость, удельный и объемный веса определялись в физико-механической лаборатории Института геологических наук и приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Пористость, удельный и объемные веса испытывавшихся грунтов

№ грунтов и фракций	Наименование грунтов и фракций	Удельный вес твердой фазы грунта	Объемный вес грунта	Вычисленная пористость (в %)
1	Песок	2.65	1.71	36
2	Пылеватый песок	2.68	1.48	45
3	Пылеватый средний суглинок	2.70	1.33	51
4	Белая пылеватая глина	2.65	0.90	66
5	Майкопская пылеватая глина	2.80	1.23	56
7	Фракция диаметром 1—0.5 мм	2.66	1.66	38
8	" " 0.5—0.15 мм	2.66	1.69	37
9	" " 0.25—0.05 "	2.69	1.61	40
10	" " 0.05—0.01 "	2.66	—	—
11	" " 0.0—0.005 "	2.66	—	—
12	Фракция кембрийской глины, диаметром меньше 0.005 мм	2.85	1.06	63

Примечание. Объемный вес грунта определялся методом набивки.

МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ОПЫТОВ

Промораживание грунтов производилось в морозном ящике проф. Белелюбского с внутренним рабочим пространством, равным $47 \times 47 \times 47$ см (фиг. 3). В качестве охладителя использовалась смесь снега с поваренной солью. Варьируя количества снега и соли, мы имели возможность оперировать температурами в ящике от 0 до -20° . Охлаждение цилиндров с грунтами осуществлялось или сверху или же со дна цилиндров.

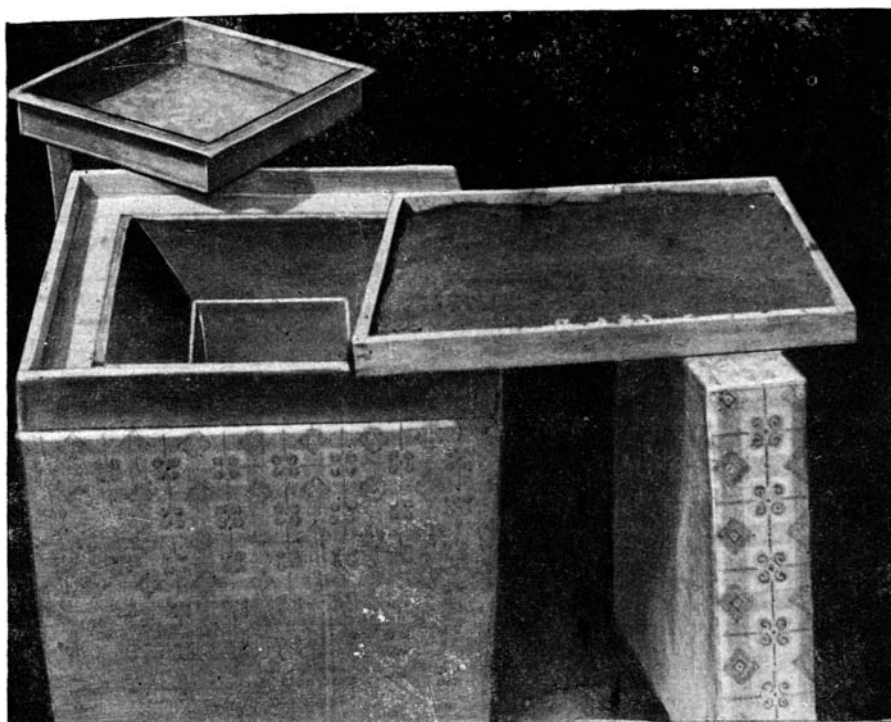
При охлаждении цилиндров сверху охладительная смесь помещалась в металлический сосуд, который ставился над цилиндрами с грунтом; при охлаждении снизу, охладительная смесь помещалась в металлический ящик, который ставился на дно рабочего пространства морозного ящика, а над ним уже располагались опытные цилиндры с грунтом. Для изоляции цилиндры с боков засыпались пробковой крошкой, как это видно на фиг. 4 и 5. При промораживании снизу, над охладительной смесью помещался деревянный ящик с металлическим дном, цилиндры с грунтами ставились на дно ящика и с остальных сторон окружались пробковой крошкой.

Грунты загружались в картонные пропарафинированные цилиндры, имевшие высоту 8 см, внутренний диаметр 6 см. Дно цилиндра имело отверстия диаметром 0.5—1 мм.

Цилиндры делились вертикальной перегородкой на две приблизительно равные части, в которые загружались разные грунты, и, таким образом, в каждом цилиндре подвергались промораживанию два грунта.

В одной части опытов перегородка была временной и удалялась после загрузки грунта в цилиндры, во второй — постоянной, и в этих случаях

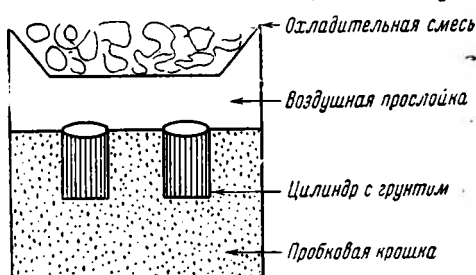
она имела круглые отверстия — „окошечки“, диаметром 0.5—0.7 мм, расположенные на глубинах 2, 4 и 6 см.



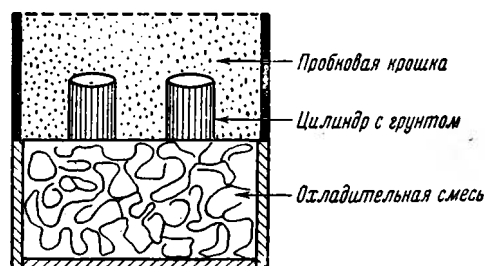
Фиг. 3. Ящик мороза проф. Белелюбского

Таким образом, в первом случае контакт грунтов при промораживании был непосредственный, во втором — очень незначительный, лишь через окошечки (фиг. 6). Опыты производились с грунтами, просеянными через сито, с диаметром отверстий, равным 1 мм.

Перед промораживанием грунты увлажнялись капиллярно до постоянного веса или в обеих половинах цилиндра или только в одной, грунт же во второй половине цилиндра шел в опыт при увлажнении, меньших капиллярной влагоемкости. В тех случаях, когда капиллярно увлажнялся один грунт, отверстия в дне цилиндра располагались лишь под этим грунтом, вторая же половина дна отверстий не имела. Увлажняемый грунт загружался в одну половину цилиндра, капиллярно насыщался, и уже после этого вторая половина цилиндра заполнялась вторым грунтом. Часть цилиндров затем промораживалась, другая часть оставалась при положительных, ком-



Фиг. 4. Схема установки для замораживания грунтов при охлаждении сверху



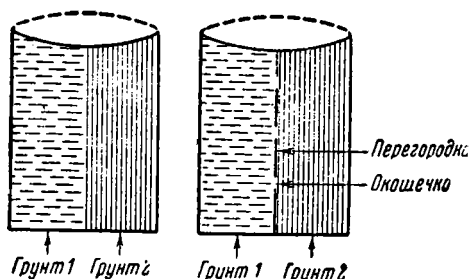
Фиг. 5. Схема установки для замораживания грунтов при охлаждении снизу

натных температурах и служила контролем к промораживающимся цилиндрам. Кроме того один или несколько цилиндров использовались для определения влажности грунта в талом состоянии, причем данные этих определений нами распространяются на все цилиндры, поступавшие в опыт.

С целью предохранения грунтов от испарения воды во время опыта поверхность грунтов, а если требовалось, то и отверстия дна цилиндров заливались расплавленным парафином. При промерзании грунтов велся учет температуры. Температура измерялась термометрами на глубинах 2—4—6—8 см, и отсчеты производились не реже одного раза в сутки.

Температура воздуха в морозном ящике колебалась в пределах от -17 до -12° и выше; а температура грунта — от -9 до -4° и выше. Поэтому измерения температур грунта имели в наших опытах только качественный характер.

По окончании опыта во всех цилиндрах, находившихся как при положительных (контрольных), так и при отрицательных температурах, определялась влажность грунтов. Влажность грунтов определялась послойно



Фиг. 6. Слева. Два грунта расположены в цилиндре без перегородки и находятся в непосредственном контакте друг с другом

Справа. Цилиндр имеет перегородку с тремя окошечками и контакт между грунтами осуществляется лишь через окошечки

методом сушки при $100-105^{\circ}\text{C}$ и выражалась в процентах на абсолютно — сухую навеску грунта. Таким образом мы получали данные по послойному распределению влажности в грунтах перед опытом и после опыта.

Определенная таким путем влажность грунтов является лишь средней влажностью всего слоя. Для талого состояния всех грунтов, а также для мерзлого состояния песчаных грунтов и фракций диаметром до 0.005 мм осредненная влажность будет совпадать с истинной влажностью этих грунтов. Что же касается суглинистых и глинистых грунтов, то здесь дело сложнее. Но для наших точностей этим обстоятельством

можно пренебречь, так как мы даем не детали, а общий характер процессов.

Мы имеем все основания сопоставлять влажность грунтов в талом и мерзлом состоянии, так как условия насыщения для всех цилиндров создавались совершенно одинаковыми, а испарение воды из грунтов при промораживании сводилось к минимуму.

По окончании опыта картон с цилиндров, если это требовалось обстоятельствами, удалялся, и грунты оказывались доступными для наблюдений и фотографирования.

Нами были проведены следующие серии опытов:

Серия 1. Грунты помещались в цилиндры без перегородки. Оба грунта увлажнялись до капиллярной влагоемкости. Охлаждение грунтов во всех случаях производилось сверху:

Песок № 1; рядом глина № 4
Песок № 1; рядом суглинок № 3
Один песок № 1
Одна глина № 4

Капиллярный подток воды во время опыта отсутствовал

Песок № 1; рядом глина № 4
Песок № 1; рядом суглинок № 3
Один песок № 1
Одна глина № 4

Грунты были обеспечены капиллярным подтоком воды во время опыта

Серия 2. Грунты помещались в цилиндры с перегородкой, имеющей окошечки. Одну половину цилиндра во всех случаях занимала фракция диаметром 2—1 мм в воздушно-сухом состоянии, другую — различные фракции и грунты при капиллярном увлажнении. Охлаждение грунтов осуществлялось сверху. Капиллярный подток воды во время опытов отсутствовал:

Фракция № 7, диам. 1—0.5 мм	} По другую сторону перегородки — фракция № 6, диам. 2—1 мм
Фракция № 8, диам. 0.5—0.15 мм	
Фракция № 9, диам. 0.25—0.05 мм	
Фракция № 10, диам. 0.05—0.01 мм	
Фракция № 11, диам. 0.01—0.005 мм	
Песок № 1, диам. меньше 1 мм	
Суглинок № 3	
Кембрийская глина № 12	

Серия 3. Грунты помещались в цилиндры с перегородкой, имеющей окошечки. Одну половину цилиндра во всех случаях занимала фракция диаметром 2—1 мм в воздушно-сухом состоянии, другую — различные фракции и грунты при капиллярном увлажнении. Охлаждение грунтов осуществлялось снизу. Капиллярный подток воды во время опыта отсутствовал:

Фракция № 7, диам. 1—0.5 мм	} По другую сторону перегородки — фракция № 6, диам. 2—1 мм
Фракция № 8, диам. 0.5—0.15 мм	
Фракция № 9, диам. 0.25—0.05 мм	
Фракция № 10, диам. 0.05—0.01 мм	
Фракция № 11, диам. 0.01—0.005 мм	
Песок № 1	
Песок № 2	
Суглинок № 3	
Майкопская глина № 5	

Серия 4. Цилиндры имели перегородку. В окошечки перегородки герметически вставлялись стеклянные трубки, которые и занимали одну половину цилиндров; в другой половине помещались различные фракции и грунты при капиллярном увлажнении. Капиллярный подток воды во время опыта отсутствовал:

Охлаждение осуществлялось сверху	Фракция № 7, диам. 1—0.5 мм	} По другую сторону перегородки стеклянные трубки
	Фракция № 8, диам. 0.5—0.15 мм	
	Фракция № 9, диам. 0.25—0.05 мм	
	Песок № 2	
	Суглинок № 3	
	Майкопская глина № 5	
Охлаждение осуществлялось снизу	Фракция № 7, диам. 1—0.5 мм	
	Фракция № 8, диам. 0.5—0.15 мм	
	Фракция № 9, диам. 0.25—0.05 мм	
	Песок № 2	
	Суглинок № 3	
	Майкопская глина № 5	

Серия 5. Одну половину цилиндра занимал капиллярно увлажненный песок, другую — пылеватый суглинок при различных грациях влажности. Капиллярный подток воды во время опыта отсутствовал:

Охлаждение грунтов осуществлялось сверху	Песок № 1; за перегородкой с окошечками воздушно-сухая белая глина № 4
При положительных, комнатных температурах	Песок № 1; за перегородкой с окошечками воздушно-сухая белая глина № 4
При положительных, комнатных температурах и трех сроках взаимодействия грунтов:	Песок № 1; за перегородкой с окошечками суглинок № 3, увлажненный до 75% капиллярной влагоемкости
1 сутки, 9 суток и 13 суток	Песок № 1; за перегородкой с окошечками суглинок № 3, увлажненный до 50% капиллярной влагоемкости
	Песок № 1; за перегородкой с окошечками суглинок № 3, увлажненный до 25% капиллярной влагоемкости

При положительных,
комнатных температурах
и трех сроках взаимо-
действия грунтов:
30 минут, 2 часа
и 24 часа

Песок № 1; рядом суглинков № 3,
увлажненный до 75% капиллярной
влагоемкости
Песок № 1; рядом суглинков № 3,
увлажненный до 50% капиллярной
влагоемкости
Песок № 1; рядом суглинков № 3,
увлажненный до 25% капиллярной
влагоемкости

Результаты опытов серии 1

При проведении опытов этой серии мы стремились воспроизвести наиболее точно опыты Тебера с промерзанием вертикально-слоистых грунтов.

Цилиндры делились временной вертикальной перегородкой на две половины; одна из них заполнялась песком, другая — глиной или суглинком. После заполнения цилиндров грунтами перегородка удалялась, оба грунта увлажнялись до капиллярной влагоемкости и подвергались действию отрицательных температур в ящике мороза проф. Белелюбского. В одних случаях грунтам при промерзании давался капиллярный подток воды, в других — он отсутствовал. Определялась послойная влажность грунтов как в талом, так и мерзлом состоянии.

В случаях наличия капиллярного подтока воды при промерзании грунтов, учитывалось количество поглощенной грунтами воды путем взвешивания цилиндров до и после промерзания. Прибыль в весе цилиндров после промерзания и составляла вес поглощенной воды.

Капиллярный подток воды в промораживающиеся грунты осуществлялся следующим образом. На дно морозного ящика ставилась невысокая ванночка с дистиллированной водой; сверху ванночка покрывалась фанерной крышкой, в которой по числу опытных цилиндров были сделаны отверстия диаметром, немного большим 6 см. Цилиндры с грунтами погружались через эти отверстия в воду на 1 см. Зазоры между цилиндром и отверстиями крышки заливались парафином, и затем пространство между цилиндрами заполнялось пробковой крошкой. Так как охлаждение грунтов во всех случаях капиллярного потока происходило сверху, то вода в ванночке замерзала лишь, когда грунты в цилиндрах были в мерзлом состоянии.

Грунты при промерзании предохранялись парафиновой крышкой от испарения воды, но, к сожалению, полного прекращения испарения достичь в этих опытах не удалось, оно было лишь уменьшено. Количества испарившейся воды определялись также взвешиванием цилиндров перед и после промерзания. Убыль в весе цилиндров составляла вес испарившейся воды. Само собой понятно, что в опытах, в которых грунты обеспечивались подтоком воды, учесть испарившуюся воду было нельзя.

Опыт 1

Одна половина цилиндра заполнялась песком № 1, другая — белой глиной № 4. Капиллярный подток воды во время опыта отсутствовал. Влажность песка и глины перед опытом была определена лишь в одном цилиндре. Ежедневно производились отсчеты температуры глины и песка. Перед вскрытием цилиндра температура в песке колебалась от -7.6° на глубине 2 см до -6.1° на глубине 8 см.

В глине в это время температура на глубине 2 см равнялась -8.4° , на глубине 8 см -7.2° .

При внешнем осмотре грунтов после промерзания наблюдалась следующая картина (фиг. 7).

В белой глине имелось большое количество ледяных прослоек толщиной 1—2 мм, причем они концентрировались в слое грунта 0—6 см и совершенно отсутствовали на глубине 6—8 см. Прослойки льда имели вид темных извилистых полосок, идущих, главным образом, в горизонтальном направлении. Около границы раздела глина—песок прослойки льда плавно изгибались вниз и упирались в песок. Песок представлял однородную смерзшуюся массу без ледяных прослоек. При замерзании глины наблюдалось пучение, доходившее до нескольких миллиметров. Распределение влажности в грунтах дано в табл. 4.

В глине после промерзания наблюдается переувлажнение верхних горизонтов и некоторое иссушение нижних слоев; так, влажность глины на глубине 0—2 см с 63.5% возрастает до 102.0%, а на глубине 6—8 см с 65.3% снижается до 44.0%.

В песке, находящемся в непосредственном контакте с глиной, перемещение воды в верхние слои при замерзании совершенно отсутствует и влажность их даже несколько ниже исходной. В то же самое время наблюдается сильное иссушение нижних слоев песка; так, влажность песка на глубине 0—2 см с 18.4%



Фиг. 7. Промороженный сверху цилиндр. Половина цилиндра заполнена песком № 1, половина глиной № 4. В глине много выделявшегося льда в виде прослоек; в песке они отсутствуют

Таблица 4

Распределение влажности в мерзлых грунтах (песке и глине)
(капиллярный подток воды отсутствовал)

№ цилиндра	Наименование грунта	Вес цилиндра с капиллярно насы- щенными грунтами (в г)		Испари- лось воды за время промер- зания (в г)	Глубина взятия проб на влаж- ность (в см)	Влажность грунта (в %)	
		перед промер- занием	после промер- зания			перед промер- занием	после промер- зания
40	Глина № 4	463.0	458.0	5.0	0—2	63.50	92.20
					2—4	62.30	82.60
					4—6	63.50	67.30
					6—8	65.30	43.70
	Песок № 1				0—2	18.40	17.40
					2—4	18.80	18.20
					4—6	18.10	16.40
					6—8	20.60	12.60
13	Глина № 4	470.5	467.0	3.5	0—2	63.50	102.0
					2—4	62.30	83.90
					4—6	63.50	76.40
					6—8	65.30	44.0
	Песок № 1				0—2	18.40	17.40
					2—4	18.80	16.50
					4—6	18.10	17.30
					6—8	20.60	12.0

снижается до 17.4%, на глубине 6—8 см с 20.6% снижается до 12.0%. Следовательно, в результате промерзания вертикально-слоистых грунтов, наряду с накоплением больших количеств воды в виде ледяных прослоек в толще глины 0—6 см, отмечается иссушение всей толщи песка и нижнего слоя глины. Оба эти процесса протекают одновременно и во взаимной связи: обогащение водой верхних горизонтов глины идет за счет потери воды песком и нижними слоями глины. Данное положение вполне подтверждается результатами и следующего опыта.

Опыт 2

Цилиндры наполнялись целиком лишь одним грунтом — или только глиной или только песком — и после капиллярного насыщения промораживались. Капиллярного подтока воды при замерзании грунтам не давалось. Температурные условия в данном опыте те же, что и в опыте 1, так как цилиндры обоих опытов промораживались одновременно.

Цифровой материал по влажности глины и песка перед промерзанием взят из опыта 1.

Таблица 5

Перераспределение влажности в песке и глинне после промерзания

№ цилиндра	Наименование грунта	Вес цилиндра с капиллярно насы- щенными грунтами (в г)		Испари- лось воды за время промер- зания (в г)	Глубина взятия проб на влаж- ность (в см)	Влажность грунта (в %)	
		перед промер- занием	после промер- зания			перед промер- занием	после промер- зания
11	Глина № 4	443.0	439.0	4.0	0—2	63.50	86.90
					2—4	62.30	88.20
					4—6	63.50	68.10
					6—8	65.30	36.80
39	Глина № 4	404.0	399.5	4.5	0—2	63.50	79.70
					2—4	62.30	98.0
					4—6	63.50	76.40
					6—8	65.30	40.0
17	Песок № 1	496.5	494.0	2.5	0—2	18.40	16.90
					2—4	18.80	16.90
					4—6	18.10	17.0
					6—8	20.60	18.60
38	Песок № 1	533.5	529.5	4.0	0—2	18.40	16.35
					2—4	18.80	16.90
					4—6	18.10	18.0
					6—8	20.60	13.90

Из сопоставления цифрового материала данного опыта с материалом предыдущего видно, что в случае замерзания глины и песка изолированно друг от друга послойная влажность их имеет иные количественные показатели.

При замерзании глины в условиях данного опыта отсутствие водных резервов песка обуславливало более сильное иссушение ее нижних горизонтов и меньшую водонасыщенность верхних. Влажность глины на глу-

бине 6—8 см с 65.3% падает уже до 36.8%, в то время как минимальная влажность глины для этой глубины в предыдущем опыте равнялась 43.7%.

При замерзании песка вследствие отсутствия рядом глины не наблюдалось того сильного иссушения нижних горизонтов, которое отмечалось в опыте 1.

Таким образом, цифровой материал опыта 2 приводит нас к тому же выводу, что был сделан в предыдущем опыте: при замерзании песка в соседстве с глиной вода из песка мигрирует в глину, чем и вызывается сильное иссушение нижних слоев его. Вопрос о силах, под действием которых происходит эта миграция, будет разобран нами несколько ниже. Сейчас же переходим к описанию опытов с промораживанием вертикально-слоистых грунтов при наличии капиллярного подтока воды.

Опыт 3

Одна половина цилиндра заполнялась песком № 1, другая — глиной № 4. Оба грунта увлажнялись до капиллярной влагоемкости. Влажность глины перед опытом была определена в одном цилиндре; для песка были использованы данные по влажности из опыта 1.

Цифровая характеристика опыта дана в табл. 6.

Таблица 6

Перераспределение влажности в песке и глине
(грунты при промерзании обеспечены капиллярным подтоком воды)

№ цилиндра	Наименование грунта	Вес цилиндра с капиллярно насы- щенными грунтами (в г)		Прибыло воды в грунтах за время про- мерзания		Глубина взятия проб на влаж- ность (в см)	Влажность грунта (в %)	
		перед промер- занием	после промер- зания	в г	в % от воды, бывшей в грунте перед промерза- нием		перед промер- занием	после промер- зания
18	Глина № 4	404.6	416.0	11.4	10.9	0—2 2—4 4—6 6—8	61.30 63.30 65.10 —	95.70 101.0 89.20 50.50
	Песок № 1					0—2 2—4 4—6 6—8	18.40 18.80 18.10 20.60	18.40 19.90 21.70 23.60
48	Глина № 4	434.0	448.7	14.7	13.0	0—2 2—4 4—6 6—8	61.30 63.30 65.10 —	95.60 96.70 98.0 60.60
	Песок № 1					0—2 2—4 4—8	18.40 18.80 20.60	19.0 20.20 23.30

Результаты перераспределения воды при промерзании вертикально-слоистых грунтов в условиях капиллярного подтока воды не сходятся с данными, полученными при промерзании этих же грунтов без подтока воды, хотя внешний вид мерзлых грунтов тот же, что и в опыте 1. Влажность песка при промерзании в условиях данного опыта возрастает на глубине 4—6 см с 18.10 до 21.70%, на глубине 6—8 см с 20.60 до 23.60%, в то время как в опыте 1 она снижалась до 12.0%.

Для нижних слоев глины отмечается значительно меньшее иссушение, чем в опыте 1.

Влажность мерзлой глины на глубине 6—8 см не падает ниже 50—60%, в то время как при отсутствии капиллярного подтока воды она снижалась до 44%.

На основании поверхностного просмотра цифрового материала табл. 6 можно было бы сделать вывод, что миграция воды из песка в глину в условиях данного опыта отсутствует. Но такой вывод, по нашему мнению, был бы неправилен. Процесс миграции воды из песка в глину происходит и в данных условиях, но здесь он маскируется, вследствие наличия нового фактора в опыте — капиллярного подтока воды. Иссушенные в результате миграции воды нижние слои песка, вследствие подтока воды, снова увлажняются до капиллярной влагоемкости.

Кроме того, необходимо отметить, что в случае подтока воды повышается общая водонасыщенность вертикально-слоистых грунтов, главным образом глины, так как при промерзании грунты поглощают от 11 до 15 г свободной воды, что составляет 11—13% от общего количества воды, находившейся в грунтах перед промерзанием. Что при подтоке вода в конечном итоге поглощается главным образом глиной, а не песком, хорошо отображается как цифровым материалом табл. 6, так и данными следующего опыта.

Опыт 4

Цилиндры наполнялись целиком только глиной и только песком. Грунты капиллярно увлажнялись и промораживались при условии подтока воды (табл. 7).

Замерзая при совершенно одинаковых условиях, грунты по-разному относятся к свободной воде: в то время как глина поглощает значительные количества воды — до 32 г, песок совершенно не поглощает ее. В песке в результате промерзания наблюдается даже водный дефицит, равный 1.7—2.7 г, образующийся частично вследствие испарения.

Суммируя данные опытов 3 и 4, можно сказать, что во время замерзания вертикально-слоистых грунтов в сочетании глина — песок вода при капиллярном подтоке в конечном итоге поглощается лишь одним грунтом — глиной. Но и в песке, надо полагать, происходит капиллярное поглощение воды, однако эта вода в процессе промерзания переходит в глину — вода в песке транзитного характера.

Все описанные выше опыты были нами повторены при другом сочетании вертикально-слоистых грунтов: вместо глины и песка были взяты пылеватый суглинок и песок, причем при замерзании их наблюдались те же закономерности, что и в случае глины — песка, лишь в несколько ослабленной форме. Наблюдалось: 1) переувлажнение верхних горизонтов у пылеватого суглинка и отсутствие его у песка; 2) иссушение нижних слоев и у суглинка и у песка при промерзании грунтов в случае отсутствия подтока воды и иссушение нижних слоев только пылеватого суглинка при подтоке воды.

На основании описанных опытов процесс перераспределения воды при замерзании вертикально-слоистых грунтов представляется в следующем виде.

Послойная влажность глины и песка после промерзания

№ цилиндра	Наименование грунта	Вес цилиндра с капиллярно насы- щенным грунтом (в г)		Прибыло воды в грунтах за время про- мерзания		Влажность грунта (в %)		
		перед промер- занием	после промер- зания	в грам- мах	в % от воды, бывшей в грунте перед промер- занием	глубина взятия проб на влаж- ность (в см)	влаж- ность до про- мерзания	влаж- ность после промер- зания
12	Глина № 4	406.2	434.2	28	19.4	0—2 2—4 4—6 6—8	61.30 63.30 65.10 —	90.0 101.0 105.0 41.0
14	Глина № 4	425.5	458.0	32.5	22.0	0—2 2—4 4—6 6—8	61.30 63.30 65.10 —	81.70 109.0 55.50
41	Песок № 1	500.7	499.0	—1.7	—	0—2 2—4 4—6 6—8	18.40 18.80 18.10 20.60	16.90 17.80 18.30 20.40
46	Песок № 1	493.7	491.0	—2.7	—	0—2 2—4 4—6 6—8	18.40 18.80 18.10 20.60	16.80 17.90 18.50 20.35

В глине и пылеватом суглинке происходит накопление воды в форме ледяных прослоек в верхней половине грунта цилиндров (при промораживании грунтов с поверхности), вследствие чего эти слои грунта становятся сильно переувлажненными. Для построения ледяных прослоек указанные грунты в первую очередь используют воду своих же нижележащих

Таблица 8

Изменения влажности

Наименование грунта	Глубина взятия проб на влаж- ность (в см)	Влаж- ность грунта в талом состоянии (в %)	Влажность мерзлого грунта (в %)			
			при от- дельном залегании и отсут- ствии подтока воды	при зале- гании рядом с песком и без подтока воды	при от- дельном залегании и наличии подтока воды	при сов- местном залегании с песком и наличии подтока воды
Белая глина № 4	6—8	65.30	36.8	43.70	41.0	50.50
То же	6—8	65.30	40.0	44.0	55.5	60.60
Пылеватый суглинок № 3	6—8	33.66	—	24.0	—	30.70
То же	6—8	33.66	—	23.0	—	28.0

горизонтов, снижая этим путем их влажность до величины значительно меньшей капиллярной влагоемкости (в наших опытах — исходной влажности грунтов), затем используют воду рядом расположенного песка, а также и свободную воду в случае наличия подтока воды.

В нижних горизонтах глины и суглинка ледяные прослойки отсутствуют, влажность грунта на этой глубине значительно ниже исходной, что хорошо иллюстрируется цифрами табл. 8.

Как видно из таблицы, при каких бы условиях ни происходило промерзание глины и суглинка, всегда наблюдается уменьшение влажности в нижних горизонтах этих грунтов, в одних случаях более сильное, как например, при отсутствии подтока воды, в других — слабее.

Таким образом, в глине и суглинке вода мигрирует в направлении теплового потока, концентрируясь в слоях, расположенных ближе к источнику холода, как это было и у Тебера. Общая водонасыщенность грунтов при этом не уменьшается, происходит лишь перераспределение воды в толще этих же грунтов. В случае же подтока воды и наличия рядом песка общая водонасыщенность глины и суглинка даже увеличивается.

В песке процесс миграции воды идет иначе, чем в глине и суглинке. Мерзлый песок имеет вид сплошной смерзшейся массы — ледяные прослойки в нем не образуются. Не наблюдается переувлажнения верхних горизонтов песка; влажность их после промерзания даже несколько снижается, частично вследствие испарения, но главным образом потому, что образующиеся при замерзании воды кристаллы льда, занимая больший объем, вытесняют часть воды сначала в нижние слои песка, а затем и в рядом расположенные глину или суглинок. Таким образом, вода в песке при замерзании перемещается в направлении, обратном тепловому потоку. Общая водонасыщенность песка, при каких бы условиях ни происходило промерзание, уменьшается. Особенно сильно снижается водонасыщенность песка в тех случаях, когда рядом с ним при промерзании расположена глина или суглинок, так как очень большие количества воды мигрируют из песка в эти грунты. Влажность нижних слоев песка в этих случаях сильно снижается.

Из дальнейших наших опытов по миграции воды при замерзании песка будет видно, что количества воды, мигрирующей в соседний с песком грунт под влиянием напряжений, возникающих при замерзании, очень незначительны. К действию сил напряжения в данном случае присоединяются еще и силы всасывания, образующиеся на границе раздела песок — глина или песок — суглинок. По вопросу действия этих сил нами проведены отдельные опыты (серия 5), которые будут описаны ниже.

Результаты опытов серии 2

Чтобы выяснить более подробно влияние гранулометрического состава грунта на поведение воды в процессе замерзания грунтов, мы взяли несколько фракций с последовательно уменьшающимися зернами и несколько разных по гранулометрическому составу грунтов и после капиллярного насыщения подвергли их промораживанию.

Каждая фракция или грунт закладывались в одну половину вертикально разгороженного цилиндра, в другую половину в каждом опыте закладывалась фракция крупного песка диаметром 2.0—1.0 мм. Таким образом, мы имели ряд опытов, в которых в одной вертикальной половине цилиндров находились фракции с мелкими зернами, а в другой — упомянутая фракция крупного песка; последняя закладывалась в воздушно-сухом состоянии, что по нашим определениям соответствовало 0.17% влажности к сухой навеске этой фракции.

В каждом опыте между фракциями укреплялась картонная пропарфинированная перегородка с тремя окошечками на глубинах 2, 4 и 6 см. Если бы не было окошечек, то фракции в цилиндре полностью были бы

отделены друг от друга и все процессы при промерзании капиллярно увлажненных грунтов происходили бы независимо от рядом находящейся крупной фракции песка. Наличие окошечек устанавливало некоторую связь между фракциями в процессе их промерзания, но не по всему вертикальному сечению цилиндра, как было бы без перегородки, а только в некоторых местах. Фракция крупного песка, закладываемая в воздушно-сухом состоянии, не смерзалась при тех отрицательных температурах, которые были в грунтах при наших опытах (до -8°), и после промораживания легко высыпалась из цилиндров; таким образом, ни о каком переходе воды из фракции крупного песка в рядом находящуюся более мелкую фракцию не могло быть и речи. При миграции же воды в более мелких капиллярно увлажненных фракциях в процессе их промерзания может быть два случая. Если миграция будет происходить в данной фракции по типу миграции воды в опытах Тебера с глиной, то в грунте должны появиться характерные для глины прослойки льда. Если же миграция будет происходить в данной фракции по типу миграции воды в опытах с песками, то вода незамерзшей части грунта под влиянием гидростатических напряжений в грунте должна передвигаться во все стороны, т. е. в наших опытах — вниз и в стороны. Вверх вода, вообще говоря, не могла передвигаться, так как сверху находился слой мерзлого грунта, в который вода могла проникнуть только при наличии в нем трещин. В условиях наших опытов вода через окошечки могла проникнуть в воздушно-сухую крупную фракцию песка и смочить часть ее, прилегающую к данному окошечку. А так как крупная фракция во время проникновения в нее воды через окошечко находится при отрицательных температурах, то проникающая в нее вода должна кристаллизоваться и сцементировать смоченный ею участок фракции крупного песка. Эти соображения подтверждаются результатами нашего опыта.

По окончании опыта цилиндр вынимался из морозного ящика, с него удалялась парафиновая крышка, и он опрокидывался: капиллярно увлажненные фракции и грунты крепко смерзались со стеной цилиндра и вертикальной перегородкой и оставались в цилиндре, а та часть крупной воздушно-сухой фракции песка, в которую не проникала вода через окошечки из соседних капиллярно увлажненных фракций и грунтов, легко высыпалась из него. Цилиндр разрезался, эта часть фракции тщательно собиралась, и в ней определялось количество воды путем высушивания ее при температуре $100-105^{\circ}$. Таким образом мы могли легко и безошибочно определить, мигрировала ли вода из увлажняемой фракции в крупную воздушно-сухую и в каком количестве. Для контроля совершенно таким же образом приготовленные цилиндры с теми же самыми вертикально расположенными фракциями — грунтами, с вертикальной перегородкой с окошечками, с капиллярным увлажнением мелких фракций и с воздушно-сухой крупной песчаной фракцией — ставились в комнату при обычной положительной температуре и стояли все время, пока производился опыт с промораживанием. Проникла ли при этом вода в крупную фракцию песка контрольных цилиндров, проверялось обычным определением влажности песка после того, как кончался опыт с промораживанием грунтов в цилиндрах.

Все опыты этой серии производились без подтока воды во время промораживания.

До и после промерзания проводился послойный учет влажности фракций — грунтов, как в основных, так и в контрольных цилиндрах.

Для предохранения от испарения применялись, как и в предыдущей серии, парафиновые крышки, а взвешиванием цилиндров до и после опыта устанавливалось наличие или отсутствие испарения. В большинстве опытов этой серии испарение воды в грунтах или не наблюдалось вовсе или было минимальным. Охлаждение грунтов производилось только сверху.

Прежде чем перейти к описанию опытов этой серии, скажем, почему мы брали неувлажняемой частью грунта в цилиндре фракцию диаметром 2—1 мм. Необходимо было подобрать такой грунт, поры которого были бы крупнее пор увлажняемой фракции. Грунт с такими порами, находясь в воздушно-сухом состоянии и будучи расположен рядом с капиллярно насыщенным грунтом, не „всасывал“ воду из увлажненной фракции. Данное сочетание грунтов не исключало, конечно, передвижения из увлажненной фракции в воздушно-сухую парообразной и пленочной воды, вследствие разницы в увлажнении этих фракций. Забегая несколько вперед, скажем, что и температурные условия опытов данной серии вызывали передвижение парообразной воды в том же направлении, так как отрицательные температуры в воздушно-сухой фракции всегда были ниже, чем в соседнем увлажненном грунте. Но так как связь между фракциями осуществлялась не по всему вертикальному сечению, а лишь через окошечки, то количественная сторона этих процессов была очень незначительна. Таким образом, в воздушно-сухую фракцию из увлажненного грунта попадала вода преимущественно в результате процессов миграции жидкой воды, происходивших в капиллярно увлажненном грунте при его промерзании.

Переходим к описанию некоторых из проведенных нами опытов этой серии.

Опыт 5

Одну половину каждого цилиндра заполняет капиллярно увлажненная фракция диаметром 1—0.5 мм, другую — воздушно-сухая фракция крупного песка диаметром 2—1 мм. Влажность фракции 1—0.5 мм перед



Фиг. 8. Промороженный сверху цилиндр. У нижнего окошечка перегородки смерзшаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм. Смерзание фракции 2—1 мм произошло вследствие миграции в нее жидкой воды из фракции диаметром 1—0.5 мм, расположенной за перегородкой



Фиг. 9. То же, что и фиг. 8

опытом определялась лишь в одном цилиндре. Как мы уже упоминали выше, температуры в воздушно-сухой фракции на 1—2° ниже, чем в увлажненной, что, надо думать, объясняется действием так называемой нулевой завесы¹ в увлажненном грунте.

По окончании опыта, в цилиндрах, находившихся при отрицательных температурах, наблюдалась следующая картина. Увлажненная фракция песка 1—0.5 мм представляла однородную смерзшуюся массу без видимых

¹ См. Сумгин М. И. Вечная мерзлота почв в пределах СССР. Гл. III, стр. 171, 1937.

Таблица 9

Перераспределение влажности грунта при промерзании фракции песка
диаметром 1—0,5 мм

№ цилиндра	Общий вес цилиндра (в г)		Прибыло (+), убыло (—) в весе всего цилиндра (в г)	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность фракции 1—0,5 мм в % на абсолютно сухую навеску	
	перед установкой его в термостат	после промерзания			в талом состоянии	в мерзлом состоянии
2	508,7	508,3	— 0,4	0—2 2—4 4—6 6—8	22,20 23,60 23,80 23,60	19,30 19,40 19,40 20,60
5	529,3	528,8	— 0,5	0—2 2—4 4—6 6—8	22,20 23,60 23,80 23,60	19,10 19,10 19,30 19,80
47	528,0	527,2	— 0,8	0—2 2—4 4—6 6—8	22,20 23,60 23,80 23,60	19,30 19,30 19,70 20,60

Таблица 10

Миграция воды из фракции диаметром 1—0,5 мм в воздушно-сухую фракцию диаметром 1—2 мм при замораживании

№ цилиндра	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность несмерзшейся части фракции после опыта (в %)	Средняя влажность несмерзшейся части фракции после опыта (в %)	Общий вес смерзшейся части фракции (в г)	Вес после высушивания ее при 100—105° С (в г)	Общий вес воды в смерзшейся части фракции (в г)	Влажность ее в % от абсолютно сухой навески	Вес гигроскопической влаги в смерзшейся части фракции (в г)	Вес воды, мигрировавшей из другой половины цилиндра в жидком виде (в г)	Вес абсолютно сухой части несмерзшейся части фракции (в г)	Вес воды, мигрировавшей в несмерзшуюся часть фракции (парообразной) (в г)	Вес всей мигрировавшей воды (в г)	Вес воды, находившейся в фракции 1—0,5 мм перед опытом (в г)	Мигрировало воды в % от воды, находившейся в фракции 1—0,5 мм перед опытом
2	0—2 2—4 4—8	0,37 0,38 0,42	0,39	24,44	21,33	3,11	14,60	0,04	3,07	130,71	0,28	3,35	47,5	7,05
5	0—8	0,41	0,41	21,77	19,19	2,58	13,50	0,03	2,55	161,30	0,39	2,94	47,3	6,22
47	0—2 2—4 4—8	0,33 0,41 0,43	0,39	21,27	18,56	2,68	14,50	0,03	2,65	162,33	0,36	3,01	51,1	5,89

ледяных прослоек; фракция крупного песка легко высыпалась из второй половины цилиндра почти вся, только у нижнего окошечка перегородки было обнаружено небольшое количество смерзшейся фракции.

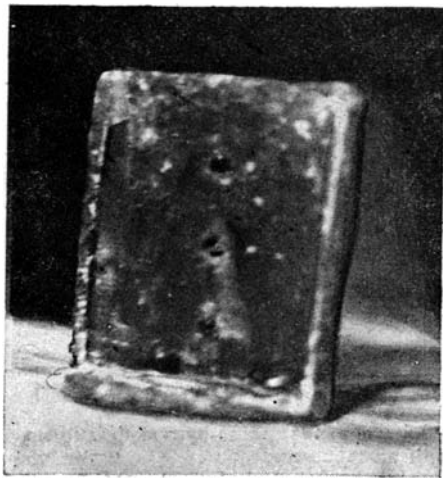
имевшее вид жгута, выходявшего из окошечка и спускавшегося на дно цилиндра (фиг. 8, 9). В контрольном цилиндре, находившемся при положительной температуре, вода через окошечки не выливалась (фиг. 10). Цифровые характеристики опыта даны в табл. 9 и 10.

Из опыта с очевидностью ясно следующее:

1) Вода из увлажненной фракции в процессе ее промерзания мигрировала в воздушно-сухую фракцию.

2) Количества мигрировавшей воды составляют 6—7% от общего количества воды, содержавшегося в увлажненной фракции перед промерзанием.

3) Влажность фракции диаметром 1—0.5 мм после промерзания на несколько процентов ниже, чем влажность этой же фракции в талом состоянии.



Фиг. 10. Контрольный, талый цилиндр. Смоченная фракция крупного песка диаметром 2—1 мм у окошечек перегородки отсутствует

4) Вода мигрировала, как мы полагаем, преимущественно в жидком виде.

5) Миграция жидкой воды происходила только через нижнее, в нашем случае самое отдаленное от источника холода, окошечко.

6) Гигроскопическая влажность воздушно-сухой фракции (1.0—2.0 мм) возросла, что говорит об одновременной миграции воды парообразной и пленочной.

7) Миграция воды во взятой фракции 1—0.5 мм происходила по типу миграции в песке в опытах с слоисто-вертикальными грунтами.

Подтверждением того, что смерзание воздушно-сухой фракции у нижнего окошечка происходит вследствие смачивания его жидкой водой, мигрировавшей из увлажненной фракции в результате ее замерзания, служат: во-первых, наши опыты серии 4,

когда в окошечки вставлялись стеклянные трубки, в которые и собиралась мигрирующая жидкая вода, и, во-вторых, то, что замерзшая парообразная вода имеет вид янтя, чего не наблюдалось в смерзшихся участках воздушно-сухой фракции.

Данные контрольного цилиндра, приведенные в табл. 11, подтверждают выводы, сделанные нами выше.

Из анализа данных контрольного цилиндра получается, что вода в воздушно-сухую фракцию мигрировала в весьма малых количествах. Участков крупного песка с заметной на-глаз смоченностью в контрольном цилиндре обнаружено не было (см. фиг. 10). Все это говорит о том, что миграция воды в этом случае происходила исключительно в форме пара и в виде пленочной воды, миграция же гравитационной воды отсутствовала. Сравнение данных цилиндров, подвергшихся промораживанию, и контрольного приводит нас к выводу, что миграция воды в цилиндрах, находившихся при отрицательных температурах, происходила в результате процессов, совершавшихся при промерзании увлажненной фракции. Цепь этих процессов можно расположить в следующей последовательности:

1) Кристаллизация воды при замерзании и расширение ее при этом.

2) Напряжения в грунтах, вследствие увеличения объема льда сравнительно с объемом воды.

3) Напряжение создает гидростатические силы в воде грунта.

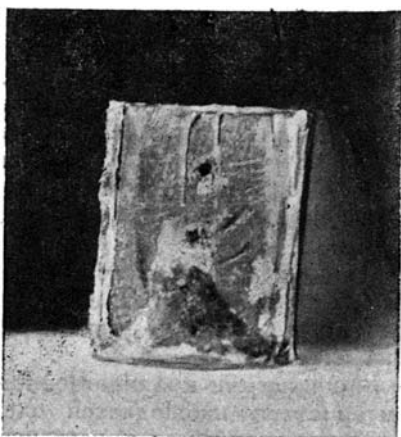
Данные контрольного (не промораживавшегося) цилиндра

№ цилиндра	Общий вес цилиндра (в г)		Прибыло (+), убыло (-) в весе всего цилиндра (в г)	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность фракции 1.0—0.5 мм (в %)		Влажность фракции 2—1 мм (в %)			Вес абсолютно сухой фракции 1—2 мм (в г)	Вес воды, мигрировавшей из другой половины цилиндра (в г)	Вес воды, находившейся в фракции 1—0.5 мм перед опытом (в г)	Мигрировала воды в % от воды находившейся в фракции 1—0.5 мм перед опытом
	перед опытом	после опыта			в начале опыта	в конце опыта	в начале опыта	в конце опыта	средняя для всего образца				
16	471.0	469.6	-1.4	0—2 2—4 4—6 6—8	22.20 23.60 23.80 23.60	19.60 21.90 22.10 22.70	0.17 0.17 0.17 0.17	0.39 0.39 0.32 0.38	0.37	91.04	0.18	45.1	0.40

4) Еще не кристаллизовавшаяся вода передвигается под влиянием гидростатических сил по всем возможным для нее направлениям.

5) В нашем случае вода устремлялась в нижнее окошечко вертикальной перегородки, попадала в воздушно-сухой крупный песок, замерзала в нем и могла легко фиксироваться нами.

Прежде чем давать описание последующих опытов данной серии, необхо-



Фиг. 11. Промороженный сверху цилиндр. У нижнего окошечка перегородки смерзшаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм. Смерзание фракции крупного песка 2—1 мм произошло вследствие миграции в нее жидкой воды из фракции диаметром 0.5—0.15 мм, расположенной за перегородкой



Фиг. 12. Промороженный сверху цилиндр. У нижнего окошечка перегородки смерзшаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм. Смерзание фракции крупного песка 2—1 мм произошло вследствие миграции в нее воды из фракции диаметром 0.5—0.15 мм, расположенной за перегородкой

димо отметить, что каждый опыт данной серии отличался от любого из всех остальных этой же серии лишь по гранулометрическому составу капиллярно увлажненного грунта.

Все остальные условия опыта, как-то температурные условия грунтов, техника увлажнения, процессы испарения воды и др., были более или менее одинаковыми.

По тому же типу, что был отмечен нами для фракции диаметром 1—0.5 мм, протекают процессы миграции воды и при промерзании следующих капиллярно увлажненных фракций:

0.5—0.15 мм
0.25—0.05 „
0.05—0.01 „
0.01—0.005 „

В результате промерзания каждой из этих фракций мы наблюдали так же, как и в опыте 1, миграцию воды через нижнее окошечко перегородки в воздушно-сухую фракцию крупного песка диаметром 2—1 мм и смерзание этой фракции. Миграция воды происходила тоже преимущественно в жидкой форме; количества воды, мигрировавшей в парообразной форме и в виде пленочной очень незначительны. В результате миграции воды влажность всей толщи фракции несколько снижалась.

Ниже, в табл. 12, 13 и 14 мы приводим цифровой материал, отображающий количественную характеристику процессов миграции воды при промерзании отдельных фракций.

Нами было зафотографировано смерзание фракции крупного песка, наблюдавшееся при замерзании различных фракций.

Фиг. 11 и 12 представляют смерзание фракции 1—2 мм при замерзании капиллярно увлажненной фракции диаметром 0.5—0.15 мм, фиг. 13 то же при замерзании капиллярно увлажненной фракции диаметром 0.25—0.05 мм.

Таким образом, качественная характеристика процессов миграции для всех перечисленных выше фракций одна и та же.

В отношении количественной характеристики наблюдается следующая закономерность: с уменьшением

диаметра фракций происходит и уменьшение количеств мигрирующей жидкой воды.

Необходимо остановиться на данных по миграции воды при промерзании фракции 0.5—0.15 мм. Как видно из табл. 12, в данном опыте по отдельным цилиндрам наблюдается разнობой в количествах мигрировавшей воды, который, по нашему мнению, объясняется наличием испарения воды при промерзании грунта, что ясно видно из сопоставления количеств испарившейся и мигрировавшей воды по отдельным цилиндрам (табл. 15).

В цилиндрах, в которых отмечено большее испарение, наблюдается меньшая миграция воды, а общая сумма испарившейся и мигрировавшей воды во всех цилиндрах почти одинакова.

Таблица 12

**Количества воды, мигрировавшие при промерзании фракции
диаметром 0.5—0.15 мм**

Основные цилиндры				Контрольные (не промораживавшиеся) цилиндры			
№ цилиндра	вес воды, мигрировавшей через окошечко в жидком виде (в г)	вес воды, мигрировавшей в форме пара и пленочной воды (в г)	общее количество мигрировавшей воды в % от количества ее в фракции передопытом	№ цилиндра	вес воды, мигрировавшей в жидком виде (в г)	вес воды, мигрировавшей в форме пара и пленочной воды (в г)	общее количество мигрировавшей воды в % от количества ее в фракции передопытом
7	2.03	0.36	4.23	9	0.0	0.28	0.66
15	1.21	0.39	2.85	19	0.0	0.53	0.95
21	3.36	0.24	6.46	—	—	—	—

Таблица 13

**Количества воды, мигрировавшие при промерзании фракции
диаметром 0.25—0.05 мм**

Основные цилиндры				Контрольные (не промораживавшиеся) цилиндры			
№ цилиндра	вес воды, мигрировавшей через окошечко в жидком виде (в г)	вес воды, мигрировавшей в форме пара и пленочной воды (в г)	общее количество мигрировавшей воды в % от количества ее в фракции передопытом	№ цилиндра	вес воды, мигрировавшей в жидком виде (в г)	вес воды, мигрировавшей в форме пара и пленочной воды (в г)	общее количество мигрировавшей воды в % от количества ее в фракции передопытом
9	1.74	0.26	4.18	25	0.0	0.28	0.57
15	0.96	0.28	2.70	—	—	—	—
16	1.19	0.24	3.01	—	—	—	—
18	1.39	0.24	3.89	—	—	—	—

Таблица 14

**Количества воды, мигрировавшие при промерзании фракции
диаметром 0.05—0.01 мм и 0.01—0.005 мм**

Наименование фракции	Основные цилиндры		
	вес воды, мигрировавшей через окошечко в жидком виде (в г)	вес воды, мигрировавшей в форме пара и пленочной воды (в г)	общее количество мигрировавшей воды в % от количества ее в фракции перед опытом
Фракция 0.05—0.01 мм + + фракция 2—1 мм . . .	1.24	0.59	3.45
Фракция 0.01—0.005 мм + + фракция 2—1 мм . . .	0.72	0.47	2.12

Количества испарившейся и мигрировавшей воды по цилиндрам

№ цилиндра	Испарилось воды за время промерзания грунта (в г)	Вес мигрировавшей воды (в г)	Сумма испарившейся и мигрировавшей воды (в г)
15	3.30	1.21	4.51
7	2.20	2.03	4.23
21	0.20	3.36	3.56

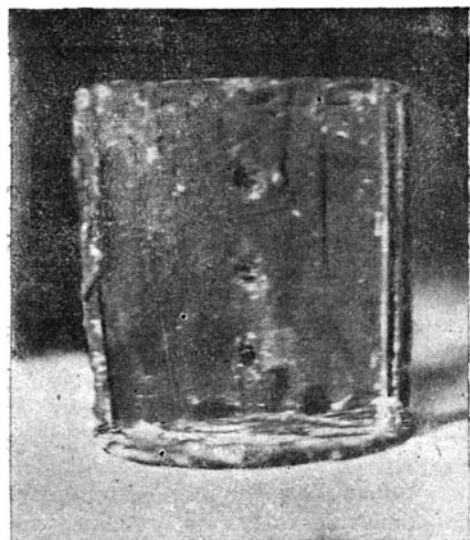
В опытах с промораживанием фракции кембрийской глины диаметром меньше 0.005 мм наблюдались иные закономерности при миграции воды, поэтому описание этих опытов мы дадим ниже, сейчас же перейдем к рассмотрению процессов миграции при замерзании песчаных грунтов.

Опыт 6

Одну половину каждого цилиндра заполнял капиллярно увлажненный песок (№ 1), вторую — воздушно-сухая фракция крупного песка диа-



Фиг. 14. Промороженный сверху цилиндр. У нижнего окошечка перегородки смерзшаяся фракция крупного песка диаметром 2—1 мм. Смерзание фракции крупного песка 2—1 мм произошло вследствие миграции жидкой воды из песка № 1, расположенного за перегородкой



Фиг. 15. Промороженный сверху цилиндр. Смерзшаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм у окошечек перегородки отсутствует. За перегородкой расположен суглинок № 3

метром 2—1 мм. Влажность песка перед опытом определена была в одном цилиндре.

Испарения воды во время опыта как в основных, так и в контрольных цилиндрах не наблюдалось.

После промерзания песок № 1 представлял однородную сцементированную замерзшей водой массу без видимых ледяных прослоек. Большая часть фракции песка 2—1 мм выпала из цилиндра, и лишь некоторое ее количество, расположенное у нижнего окошечка перегородки, находилось в смерзшемся состоянии (фиг. 14).

на глубине же 6—8 см ледяные прослойки отсутствовали. Пучение грунта равнялось 2—3 мм. Перераспределение влажности грунта при промерзании представлено в табл. 17.

Таблица 17

Перераспределение влажности в пылеватом суглинке при промерзании

№ цилиндра	Общий вес цилиндра (в г)		Прибыло (+), убыло (-) в весе всего цилиндра (в г)	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность суглинка в % на абсолютно сухую навеску	
	перед установкой его в термостат	после промерзания			в талом состоянии	в мерзлом состоянии
50	464.3	462.5	-1.8	0—2	35.90	40.50
				2—4	36.20	36.70
				4—6	36.80	35.40
				6—8	39.0	30.30
52	485.5	484.0	-1.5	0—2	34.70	41.0
				2—4	35.40	35.90
				4—6	35.90	34.60
				6—8	36.90	30.80
68	495.3	493.2	-2.1	0—2	35.60	41.50
				2—4	36.40	34.91
				4—6	36.80	33.10
				6—8	38.10	29.30

Таблица 18

Миграция воды из пылеватого суглинка в воздушно-сухую фракцию песка диаметром 2—1 мм при промерзании

№ цилиндра	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Гигроскопическая влажность фракции перед опытом (в %)	Влажность несмерзшейся части фракции после опыта (в %)	Средняя влажность для всего образца (в %)	Общий вес смерзшейся части фракции после опыта (в г) *	Вес абсолютно сухой несмерзшейся фракции (в г)	Вес воды, мигрировавшей из другой половины цилиндра (в г)	Вес воды, находившейся в суглинке перед промерзанием (в г)	Мигрировало воды в % от воды, находившейся в суглинке перед промерзанием
50	0—5 5—8	0.17	0.27 0.33	0.30*	0.0	165.32	0.21	57.0	0.37
52	0—5 5—8	0.17	0.35 0.34	0.35	0.0	179.60	0.32	61.5	0.52
68	0—5 5—8	0.17	0.31 0.29	0.30	0.0	178.09	0.23	59.9	0.38

* Смерзшейся части этой фракции не было.

Фракция воздушно-сухого песка 2—1 мм вся целиком высыпалась из цилиндров, и смерзшихся участков в ней обнаружено не было, что отобрано в цифровом материале табл. 18 и на фиг. 15.

Из анализа данных опыта с очевидностью вытекает следующее:

1) Миграции воды в жидкой фазе из капиллярно увлажненного суглинка в воздушно-сухую фракцию песка не наблюдается, о чем говорит отсутствие смерзшихся участков в этой фракции.

2) В воздушно-сухую фракцию песка мигрирует только парообразная и пленочная вода, но количества ее очень незначительны, не превышают 0.52%.

3) Вследствие миграции парообразной воды возрастает влажность фракции песка 2—1 мм с 0.17 до 0.35%.

4) Наблюдается перераспределение воды в пределах самого же суглинка, в результате чего образуются ледяные прослойки и некоторое переувлажнение верхних горизонтов его и иссушение нижних слоев.

5) Миграция воды в суглинке происходит по типу миграции в глине в опытах с вертикально-слоистыми грунтами.

По этому же типу происходит миграция воды в фракции диаметром: меньше 0.005 мм (см. опыт 8).

Опыт 8

Одну половину цилиндра занимала капиллярно увлажненная фракция кембрийской глины № 12 диаметром меньше 0.005 мм, вторую — воздушно-сухая фракция крупного песка диаметром 2—1 мм.

Влажность фракции кембрийской глины перед опытом определялась в одном цилиндре.

В виду малого количества данного грунта, имевшегося в нашем распоряжении, контрольных цилиндров заложено не было.

Испарение воды во время опыта наблюдалось, но размеры его были незначительны и не превышали 2.77% от общего количества воды в грунте перед опытом.

Процесс капиллярного насыщения фракции кембрийской глины шел очень медленно. Поверхность кембрийской глины смачивалась лишь на 10—12-е сутки после установки ее на насыщение, а постоянный вес цилиндров с грунтом достигался через месяц—полтора. Вследствие такой малой скорости капиллярного увлажнения цилиндр, в котором определялась влажность талой глины, оказался недонасыщенным.

Цифровая характеристика опыта для фракции 2—1 мм представлена в табл. 19.

При замерзании фракции глины не наблюдается миграции жидкой

воды в воздушно-сухую фракцию песка: смерзшихся участков в фракции песка обнаружено не было (фиг. 16). Количества парообразной и пленочной воды, мигрировавшей в фракцию песка, не превышают 0.60%. В толще



Фиг. 16. Промороженный сверху цилиндр. Смерзшаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм у окошечек перегородки отсутствует. За перегородкой расположена фракция кембрийской глины диаметром меньше 0.005 мм

Миграция воды из кембрийской глины в воздушно-сухую фракцию крупного песка диаметром 2—1 мм при промерзании

№ цилиндра	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность фракции перед промерзанием (в %)	Влажность несмерзшейся части фракции после промерзания (в %)	Средняя влажность для всей несмерзшейся фракции (в %)	Общий вес смерзшейся части фракции после опыта (в г)	Вес абсолютно сухой несмерзшейся части фракции (в г)	Вес воды, мигрировавшей из другой половины цилиндра (в г)	Вес воды, находившейся в глинистой фракции перед промерзанием (в г)	Мигрировала воды в % от воды, находившейся в фракции кембрийской глины перед промерзанием
2	0—5 5—8	} 0.17	0.37 0.38	} 0.38	0.0	262.55	0.55	91.5	0.60
5	0—5 0—8	} 0.17	0.37 0.30	} 0.34	0.0	216.63	0.37	90.2	0.41

самой глины происходит перераспределение влажности, в результате чего верхние горизонты ее (при подаче холода сверху) после промерзания имеют большее увлажнение, чем нижние. Но процесс перераспределения воды у фракции кембрийской глины выражен довольно слабо, что хорошо видно при сопоставлении данных по распределению влажности после промерзания у белой глины № 4 и у фракции кембрийской глины № 12 в табл. 20.

Таблица 20

Миграция воды в белой глине и фракции кембрийской глины при промерзании

Глубина взятия проб на влажность (в см)	Распределение влажности по глубинам у мерзлой белой глины № 4 (в %)	Распределение влажности по глубинам у мерзлой фракции кембрийской глины № 12 (в %)
0—2	90.0	61.50
2—4	101.0	61.30
4—6	105.0	60.70
6—8	41.0	57.0

Примечание. Цифры по влажности мерзлой белой глины взяты из табл. 7.

На основании опытов серии 2 можно сказать, что наблюдается два типа процессов миграции воды при замерзании грунтов.

Первый тип наблюдается при замерзании глинистых и суглинистых грунтов и для него характерны следующие явления.

Направление миграции воды совпадает с направлением теплового потока, в результате чего происходит переувлажнение слоев грунта ближе расположенных к источнику холода, за счет иссушения нижележащих горизонтов. Избыточная вода в переувлажненных горизонтах образует ледяные прослойки разной толщины. При отсутствии подтока воды извне общая водонасыщенность грунта не изменяется, происходит лишь перераспределение воды в толще того же грунта.

Второй тип процессов миграции воды наблюдается при замерзании грунтов песчаных и супесчаных и характеризуется противоположными явлениями. Миграция воды в этом случае идет в направлении, обратном тепловому потоку; некоторое, небольшое количество воды из слоев, расположенных ближе к источнику холода, перемещается в нижележащие горизонты. Избыточная вода в этих горизонтах не образует ледяных прослоек, может иметь место лишь образование линз льда. В условиях наших опытов избыточная вода вытеснялась в воздушно-сухую фракцию песка диаметром 2—1 мм через окошечко перегородки. Общая водонасыщенность после замерзания у этих грунтов становится меньше. Решающее значение в протекании процессов миграции воды по первому или второму типу имеют не размеры частиц грунта, а природа этих частиц. При промерзании самых разнообразных фракций, полученных из песка, вплоть до фракций диаметром 0.01—0.005 мм, характеристика процессов оставалась одна и та же. Во всех случаях миграция воды в жидком виде проходила по второму типу, изменялась лишь количественная сторона процесса. При переходе же к суглинистым и глинистым грунтам характер процессов миграции в корне изменялся, что и видно из сводной табл. 21.

Таблица 21

(сводная по опытам серии 2)

Наименование фракции и грунта	Вес воды, мигрировав- шей через окошечко в жидком виде (в г)	Вес воды, мигрировав- шей в форме пара и пленочной воды (в г)	Общее коли- чество мигри- ровавшей воды в % от коли- чества ее в грунтах перед опытом
Фракция № 7, диаметром 1 —0.5 мм .	2.76	0.34	6.39
Фракция № 8 " 0.5 —0.15 " .	2.20	0.33	4.51
Фракция № 9 " 0.25—0.05 " .	1.32	0.25	3.45
Фракция № 10 " 0.05—0.01 " .	1.24	0.59	3.45
Фракция № 11 " 0.01—0.005 " .	0.72	0.47	2.12
Песок № 1	2.04	0.30	4.85
Пылеватый суглинок № 3	0.0	0.25	0.42
Фракция кембрийской глины № 12, диа- метром меньше 0.005 мм	0.0	0.46	0.50

Результаты опытов серии 3

Данные опыты как по методике их постановки, так и по условиям (увлажнение, температура) и исследуемым грунтам являются повторением опытов серии 2 с одним лишь изменением, которое касается схемы охлаждения грунтов. В опытах серии 2 охлаждение грунтов осуществлялось с поверхности, в данной же серии охлаждение грунтов производилось снизу, со дна цилиндров. Посмотрим, что нового привносило это обстоятельство в процессы миграции воды.

В предыдущих опытах нами было установлено, что передвижение жидкой воды при замерзании песка и фракций его идет в направлении, обратном тепловому потоку, а в суглинистых и глинистых — в одном направлении с тепловым потоком. При подаче холода сверху в суглинистых и глинистых грунтах происходило накопление воды в верхних горизонтах; в фракциях песка и песчанистых грунтах, наоборот, под влиянием напряжений вода выжималась вниз, т. е. перемещалась в направлении действия сил тяжести.

Миграция воды из песка диаметром 1—0,5 мм в воздушно-сухую фракцию песка диаметром 2—1 мм при промерзании

№ цилиндра	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность несмерзшейся части фракции (в %)	Средняя влажность для всей несмерзшейся части фракции (в %)	Общий вес несмерзшейся части фракции (в г)	Вес ее после высушивания при 100—105°С (в г)	Общий вес воды в смержшейся части фракции (в г)	Влажность ее в % на абсолютно сухую навеску	Вес гироскопической ваги в смержшейся части фракции (в г)	Вес воды, мигрировавшей из другой половины цилиндра (в г)	Вес абсолютно сухой несмерзшейся части фракции (в г)	Вес воды, мигрировавшей в несмерзшуюся часть фракции (в г)	Вес всей мигрировавшей воды (в г)	Вес воды, находящейся в фракции 1—0,5 мм перед промерзанием	Мигрировавшего воды в % от воды, находящейся в фракции 1—0,5 мм перед промерзанием
26	0—4 4—8	0,35 0,32	0,34	11,84	10,92	0,92	8,42	0,02	0,90	131,44	0,22	1,12	51,3	2,18
33	0—8	0,33	0,33	12,62	11,73	0,89	7,58	0,02	0,87	269,07	0,30	1,17	55,8	2,09
38	0—4 4—8	0,35 0,37	0,36	17,44	15,97	1,47	9,20	0,03	1,44	128,78	0,24	1,68	44,0	3,81

Охлаждая грунты снизу, мы меняли ориентировку направления теплового потока в отношении горизонтов исследуемых грунтов. Вследствие этого должно было измениться и направление водного потока в замерзающих грунтах: в суглинистых и глинистых грунтах переувлажняться должны были уже нижние слои, в фракциях песка вода должна была перемещаться от дна цилиндров к поверхности их, т. е. в направлении, обратном действию сил тяжести. Переходим к описанию некоторых опытов этой серии.

Опыт 9

Одну половину цилиндра заполняет капиллярно увлажненная фракция № 7 диаметром 1—0,5 мм, вторую — воздушно-сухая фракция песка диаметром 2—1 мм. Влажность фракции до опыта определена в двух цилиндрах.

Испарение воды наблюдалось как в цилиндрах, находившихся при положительных, так и отрицательных температурах, но количества испарившейся воды в обоих случаях незначительны.

Цифровая характеристика опыта дана в табл. 22.

После промерзания фракции диаметром 1—0,5 мм наблюдались те же явления, что и в анало-

гичных опытах серии 2, т. е. отсутствие ледяных прослоек в замерзшей фракции 1—0.5 мм, миграция воды, преимущественно в жидком виде, из капиллярно увлажненной фракции в воздушно-сухую и наличие вследствие этого смерзшегося участка в воздушно-сухой фракции, расположенного у нижнего окошечка перегородки (фиг. 17). Необходимо лишь обратить внимание на следующее обстоятельство: в то время как нижнее окошечко, через которое происходила миграция воды из капиллярно увлажненной фракции в воздушно-сухую, в опытах серии 2 было самым дальним от источника холода, в данном опыте было самым близким к нему.

Как увидим дальше, это явление не случайно и наблюдалось во всех опытах, в которых охлаждение грунтов происходило снизу.

Совершенно так же протекают процессы миграции воды и в случае замерзания других капиллярно увлажненных фракций и песка, с той лишь разницей, что при замерзании



Фиг. 17. Промороженный снизу цилиндр. У нижнего окошечка часть смерзшейся фракции крупного песка диаметром 2—1 мм. Смерзание фракции крупного песка 2—1 мм произошло вследствие миграции в нее жидкой воды из фракции диаметром 1—0.5 мм, расположенной за перегородкой



Фиг. 18. Промороженный снизу цилиндр. У нижнего и среднего окошечек перегородки смерзшаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм. Смерзание фракции крупного песка 2—1 мм произошло вследствие миграции жидкой воды из фракции диаметром 0.5—0.15 мм, расположенной за перегородкой

некоторых из них миграция воды происходит уже через два, а иногда и все три окошечка перегородки. В тех случаях, когда миграция жидкой воды происходит через два окошечка, этими окошечками оказываются те, которые ближе расположены к источнику холода. Ниже мы даем сокращенные таблицы, характеризующие процессы миграции воды по отдельным фракциям.

В табл. 23 даны цифры по миграции воды при промерзании фракции диаметром 0.5—0.15 мм, а на фиг. 18 заснята смерзшаяся фракция крупного песка.

Как видно из табл. 23 и фиг. 18, миграция жидкой воды в фракции 0.5—0.15 мм происходила уже через два окошечка перегородки, причем больше воды мигрировало через 2-е окошечко. Оба окошечка ближе расположены к источнику холода, чем 1-е окошечко, через которое миграции воды не наблюдалось.

Миграция воды из капиллярно увлажненной фракции диаметром 0,5—0,15 мм в воздушно-сухую фракцию песка диаметром 2—1 мм при промерзании

Основные цилиндры					Контрольные (непромерзавшие) цилиндры				
№ цилиндра	№ окошечка перегородки	Вес воды, мигрировавшей через окошечко в жидкой форме (в г)	Вес воды, мигрировавшей в виде пара и пленочной воды (в г)	Общее колич. мигр. воды в ‰ от количества ее в фракции перед опытом	№ цилиндра	Вес воды, мигрировавшей в жидкой форме	Вес воды, мигрировавшей в виде пара и пленочной воды (в г)	Общее количество мигрировавшей воды в ‰ от количества ее в фракции перед опытом	
55	2 3	1,62 0,87	} 0,23	5,39	53	0,0	0,37	0,71	
56	2 3	2,29 0,39	} 0,32	5,79	66	0,0	0,24	0,51	
60	2 3	1,53 0,60	} 0,29	4,78	—	—	—	—	
63	2 3	1,21 0,78	} 0,28	4,42	—	—	—	—	

Таблица 24

Миграция воды капиллярно увлажненной фракции диаметром 0,25—0,05 мм в воздушно-сухую фракцию песка диаметром 2—1 мм при промерзании

Основные цилиндры					Контрольные (непромерзавшие) цилиндры				
№ цилиндра	№ окошечка	Вес воды, мигрировавшей через окошечко в жидкой форме (в г)	Вес воды, мигрировавшей в виде пара и пленочной воды (в г)	Общее количество мигрировавшей воды в ‰ от количества ее в фракции перед опытом	№ цилиндра	Вес воды, мигрировавшей в жидкой форме	Вес воды, мигрировавшей в виде пара и пленочной воды (в г)	Общее количество мигрировавшей воды в ‰ от количества ее в фракции перед опытом	
51	1 2 3	0,84 1,48 0,69	0,33	6,25	71	0,0	0,22	0,49	
72	1 2 3	0,69 1,48 0,85	0,41	6,51	—	—	—	—	
76	1 2 3	0,98 1,30 0,31	0,44	5,72	—	—	—	—	

Нумерация окошечек идет от поверхности цилиндра к его дну.

Процессы миграции при промерзании для фракции 0.25—0.05 мм характеризуются цифровым материалом табл. 24, для фракций 0.5—0.01 и 0.01—0.005 мм — табл. 25.

Смерзающаяся воздушно-сухая фракция 2—1 мм при миграции в нее воды из капиллярно увлажненной фракции 0.25—0.05 мм представлена на фиг. 19, из фракции 0.05—0.01 мм — на фиг. 20.



Фиг. 19. Промороженный снизу цилиндр. У всех трех окошечек перегородки смерзающаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм. Смерзание фракции крупного песка произошло вследствие миграции жидкой воды из фракции диаметром 0.25—0.05 мм, расположенной за перегородкой



Фиг. 20 Промороженный снизу цилиндр. У окошечек перегородки смерзающаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм. Смерзание фракции крупного песка 2—1 мм произошло вследствие миграции жидкой воды из фракции диаметром 0.05—0.01 мм, расположенной за перегородкой

Таблица 25

Миграция воды из капиллярно увлажненных фракций диаметром 0.05—0.01 мм и 0.01—0.005 мм в воздушно-сухую фракцию песка диаметром 2—1 мм при промерзании

Наименование фракции	№ окошечка	Вес воды, мигрировавшей через окошечко в жидкой форме (в г)	Вес воды, мигрировавшей в виде пара и пленочной воды (в г)	Общее количество мигрировавшей воды в % от количества ее в фракции перед опытом
Фракция диаметром 0.05—0.01 мм	1	0.39	} 0.14	4.61
	2	1.45		
Фракция диаметром 0.01—0.005 мм	1	—	} 0.18	1.18
	2	0.48		

В виду малых количеств имевшихся у нас фракций диаметром 0.05—0.01 мм и 0.01—0.005 мм промораживание их производилось в меньших по размеру цилиндрах, а именно: диаметр цилиндров был 6 см, высота тоже 6 см, перегородки цилиндров имели лишь по два окошечка.

По той же причине в данных опытах отсутствовали контрольные цилиндры.

Все это заставляет нас считать количественные показатели миграции воды в этих фракциях ориентировочными, но тип миграции воды, свойственный этим фракциям, сомнений не вызывает. Несмотря на малый размер зерен этих фракций, миграция воды в них идет по типу миграции в песчаных грунтах.

Посмотрим теперь, как перераспределяется вода в суглинистых и глинистых грунтах при условии охлаждения их снизу.

Опыт 10

Одну половину цилиндра заселяет капиллярно увлажненный пылеватый суглинок № 3, вторую — воздушно-сухая фракция песка 2—1 мм.

Влажность пылеватого суглинка перед опытом определена в двух цилиндрах.

Испарение воды в промораживавшихся цилиндрах отсутствовало, в контрольных наблюдалось.

Цифровая характеристика опыта дана в табл. 26 и 27.

Таблица 26

Перераспределение влажности в пылеватом суглинке при промерзании

№ цилиндра	Общий вес цилиндра (в г)		Прибыло (+), убыло (—) в весе всего цилиндра (в г)	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность пылеватого суглинка в % на абсолютно сухую навеску	
	перед установкой его в термостат	после промерзания			в талом состоянии	в мерзлом состоянии
75	576.0	576.5	+ 0.5	0—2	35.10	24.30
				2—4	36.20	38.60
				4—6	36.60	40.0
				6—8	37.50	42.60
77	554.2	554.7	+ 0.5	0—2	36.0	19.93
				2—4	36.20	40.50
				4—6	36.60	37.90
				6—8	37.60	41.80

Как видно из таблиц и из фиг. 21, все закономерности миграции воды для суглинистых и глинистых грунтов сохраняются и в случае подачи холода снизу. В данном опыте заслуживает внимания лишь следующее явление: переувлажнение наблюдается не в верхних горизонтах суглинка, как это было при охлаждении грунта сверху, а наоборот, в нижних — в слое 6—8 см; там же образуются и ледяные прослойки.

Влажность суглинка на глубине 0—2 см с 36% снизилась до 19.93%, на глубине 6—8 см — с 37.60% повысилась до 41.80%, т. е. картина, обратная той, которая наблюдалась при подаче холода сверху (см. табл. 17, цилиндр 68).

Таким образом, подавая холод снизу, мы изменили направление теплового потока в суглинке, а следовательно и направление водного потока в замерзающем грунте.

Миграция воды из пылеватого суглинка в воздушно-сухую фракцию песка диаметром 2—1 мм при промерзании

№ цилиндра	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность несмерзшейся части фракции после опыта (в %)	Средняя влажность для всей несмерзшейся части фракции (в %)	Общий вес смерзшейся части фракции (в г)	Вес абсолютно сухой несмерзшейся части фракции (в г)	Вес воды, мигрировавшей в несмерзшуюся часть фракции (в г)	Вес воды, находившейся в фракции 0.25—0.05 мм перед промерзанием	Мигрировала воды в % от воды, находившейся в фракции 0.25—0.05 мм перед промерзанием
75	0—3	0.31	0.33	0.0	236.0	0.37	68.8	0.53
	3—6	0.31						
	6—8	0.37						
77	0—3	0.23	0.28	0.0	226.8	0.25	58.2	0.43
	3—6	0.35						
	6—8	0.27						

Опыт 11

Одну половину цилиндра заполняет капиллярно увлажненная майкопская глина № 5, вторую — воздушно-сухая фракция песка диаметром 2—1 мм.

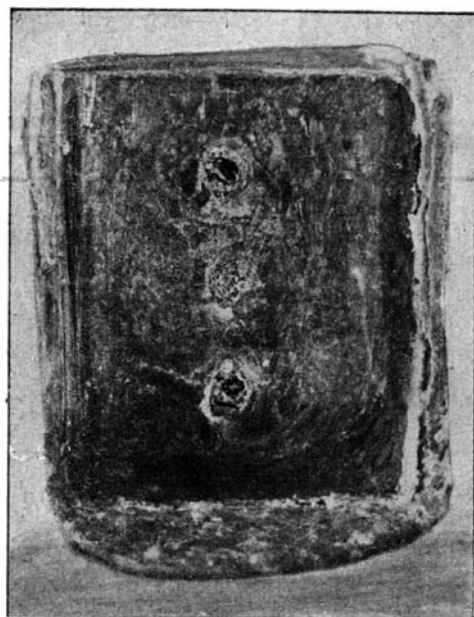
Влажность майкопской глины до опыта определена в одном цилиндре.

При капиллярном насыщении майкопской глины наблюдалось сильное разбухание грунта, и он вследствие этого выпирал из цилиндров на 1—1.5 см. Насыщение майкопской глины шло значительно быстрее, чем кембрийской (серия 2, опыт 8). Уже на второй день после установки цилиндров на насыщение поверхность глины смачивалась.

Испарения воды при промерзании глины почти не наблюдалось.

Перераспределение воды в глине в результате ее промерзания отображено в табл. 28.

Как и у суглинка, в результате промерзания глины переувлажняются нижние слои ее. Влажность глины на глубине 0—2 см с 62.0% снижается до 38.0%, на глубине 6—8 см с 62.80% возрастает до 85.30%. Миграции воды из глины в воздушно-сухую фракцию песка не наблюдается, что с очевидностью вытекает из цифрового материала табл. 29.



Фиг. 21. Промороженный снизу цилиндр. Смерзшаяся часть фракции крупного песка диаметром 2—1 мм у окошечек перегородки отсутствует. За перегородкой расположен суглинок № 3

Перераспределение воды в майкопской глинне при промерзании

№ цилиндра	Общий вес цилиндра (в г)		Прибыло (+), убыло (—) в весе всего цилиндра (в г)	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность глины в % на абсолютно сухую навеску	
	перед уста- новкой в термостат	после промерзания			в талом состоянии	в мерзлом состоянии
65	474.0	474.0	0.0	0—2	62.0	50.60
				2—4	60.20	77.0
				4—6	60.30	84.0
				6—8	62.80	73.60
89	502.0	502.0	0.0	0—2	62.0	38.0
				2—4	60.20	57.30
				4—6	60.30	83.60
				6—8	62.80	82.50
91	533.0	532.0	—1.0	0—2	62.0	49.0
				2—4	60.20	64.0
				4—6	60.30	89.10
				6—8	62.80	85.30

Таблица 29

Миграция воды из майкопской глины в фракцию песка
диаметром 2—1 мм при промерзании

№ цилиндра	Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность несмерз- шейся части фракции после опыта (в %)	Средняя влажность для всей несмерзшейся части фракции (в %)	Общий вес смерз- шейся части фракции (в г)	Вес абсолютно сухой несмерзшейся части фракции (в г)	Вес воды, мигрировав- шей в несмерзшуюся часть фракции (в г)	Вес воды, находящейся в глинне перед промер- занием	Мигрировало воды в % от воды, находящейся в глинне перед промер- занием
65	0—4	0.25	} 0.27	0.0	197.96	0.20	75.7	0.26
	4—8	0.29						
89	0—4	0.17	} 0.19	0.0	191.87	0.04	85.0	0.05
	4—8	—						
91	0—4	0.19	} 0.20	0.0	185.98	0.06	90.5	0.07
	4—8	0.21						

Опыты серии 3 еще раз подтвердили установленные нами ранее закономерности миграции воды в жидкой форме для различных по своей природе грунтов.

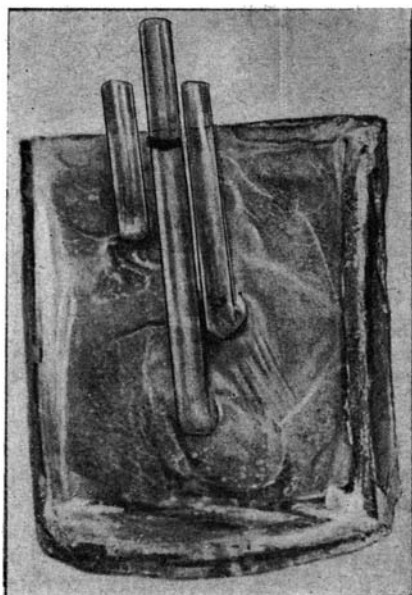
Изменение направления охлаждения не нарушает эти закономерности процессов миграции, а лишь способствует возникновению других вариаций для проявления тех же закономерностей (см. табл. 30).

(Сводная по опытам серии 3)

Наименование фракции и грунта	Вес воды, мигрировавшей в жидком виде (в г)	Вес воды, мигрировавшей в форме пара и пленочной воды (в г)	Общее количество мигрировавшей воды в % от количества ее в грунтах передопытом
Фракция № 7, диаметром 1—0.5 мм	1.07	0.26	2.69
Фракция № 8, диаметром 0.5—0.15 мм	2.30	0.32	5.10
Фракция № 9, диаметром 0.25—0.05 мм	2.87	0.39	6.16
Фракция № 10, диаметром 0.05—0.01 мм	1.84	0.14	4.61
Фракция № 11, диаметром 0.01—0.005 мм	0.48	0.18	1.18
Пылеватый песок № 2	1.39	0.20	2.98
Пылеватый суглинок № 3	0.0	0.31	0.53
Майкопская глина № 5	0.0	0.10	0.13

Результаты опытов серии 4

Опыты серии 4 являются как бы наглядным пособием для демонстрации процессов миграции воды в жидком виде при замерзании различных грунтов. Воду, мигрировавшую из капиллярно увлажненных



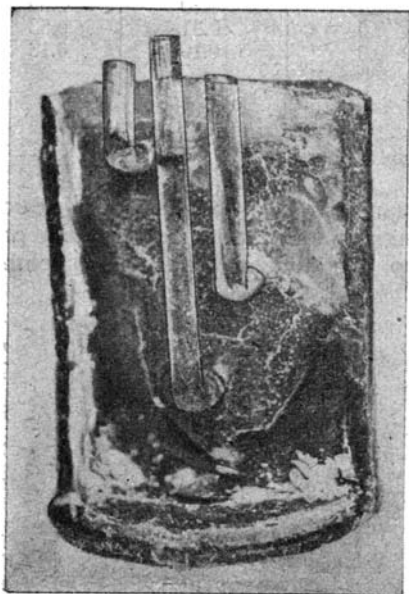
Фиг. 22. Промороженный сверху цилиндр. Стекла́нная трубка, вделанная в нижнее окошечко перегородки, содержит замерзшую воду. Вода в трубке мигрировала из фракции диаметром 1—0.5 мм, расположенной за перегородкой



Фиг. 23. Промороженный сверху цилиндр. Черта на трубке, вделанной в нижнее окошечко перегородки, отмечает объем содержащейся в трубке воды. Вода мигрировала в трубку из фракции диаметром 0.5—0.15 мм, расположенной за перегородкой

фракций песка и песчаных грунтов, мы получали в чистом виде, а не в виде смерзшихся участков воздушно-сухой фракции песка.

Методика постановки этих опытов следующая. Как и в предыдущих опытах, цилиндры делились перегородкой с тремя окошечками на две части. В каждое окошечко перегородки герметически вставлялись стеклянные трубки диаметром 7 мм. Оба конца трубок оставались открытыми; один конец каждой трубки заканчивался на расстоянии нескольких миллиметров от окошечка внутри увлажненного грунта, а по другую сторону перегородки трубки изгибались под прямым углом в сторону верхнего сечения цилиндра, на уровне которого и заканчивались. Стеклянные трубки в данных опытах должны были выполнять ту же роль, что воздушно-сухая фракция песка диаметром 2—1 мм, т. е. служить резервуаром для приема воды, отжимаемой при промерзании капиллярно увлажненных грунтов. Таким образом, в одной половине цилиндра помещались стеклянные трубки, вторая же половина заполнялась испытуемым грунтом.



Фиг. 24. Промороженный сверху цилиндр. Черта на трубке, вделанной в нижнее окошечко перегородки, отмечает объем содержащейся в трубке воды. Вода мигрировала в трубку из фракции диаметром 0.25—0.05 мм, расположенной за перегородкой



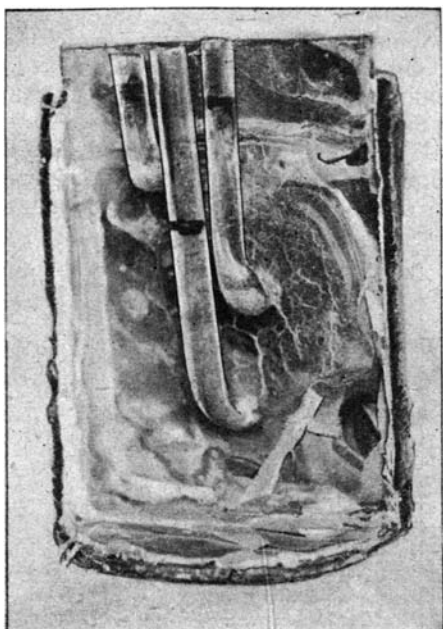
Фиг. 25. Промороженный сверху цилиндр. Во всех трех трубках замерзший песок. Песок был увлечен водой при ее миграции

Для предохранения грунтов от испарения воды применялась парафиновая покрывка.

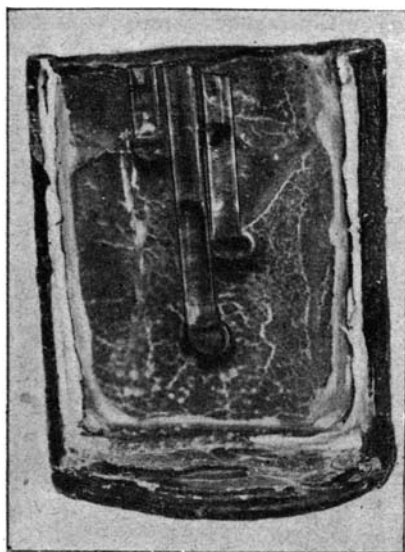
Одна часть таким образом смонтированных цилиндров подвергалась действию отрицательных температур, другая — оставлялась для контроля при положительных комнатных температурах. В тех цилиндрах, которые подвергались действию отрицательных температур, пространство между трубками заполнялось пробковой крошкой. Идеальной теплоизоляции для трубок таким путем мы не получали, так как между трубками помещалось очень небольшое количество пробковой крошки, но снижение температуры воздуха в трубках и около них шло значительно медленнее. При отсутствии изоляции вокруг трубок температура воздуха в них моментально выравнивалась бы с температурой морозного ящика, которая в наших опытах доходила до —15° и ниже, и первые же порции воды, поступившие в трубки, быстро замерзли бы, что создало бы препятствие для поступления новых количеств воды, а это искажало бы результаты опытов.

Благодаря изоляции температура воздуха в трубках лишь на 1—2° была ниже температуры замерзающего капиллярно увлажненного грунта.

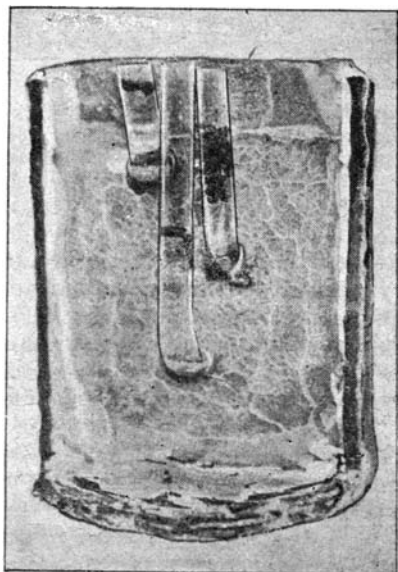
Часть опытов проведена при охлаждении грунтов сверху, другая часть—при охлаждении снизу.



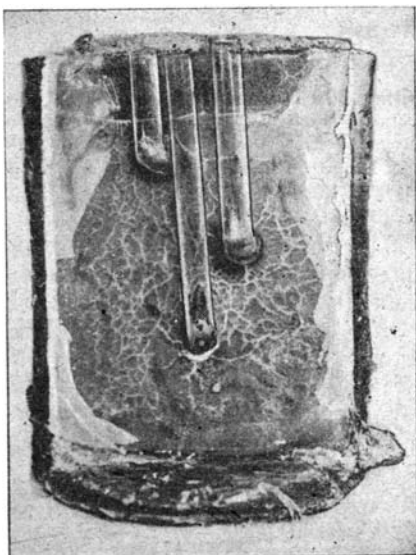
Фиг. 26. Промороженный снизу цилиндр. Вода содержится во всех трех трубках. Вода в трубки мигрировала из фракции диаметром 1—0.5 мм, расположенной за перегородкой



Фиг. 27. Промороженный снизу цилиндр. Вода содержится во всех трех трубках. Вода в трубки мигрировала из фракции диаметром 0.5—0.15 мм, расположенной за перегородкой



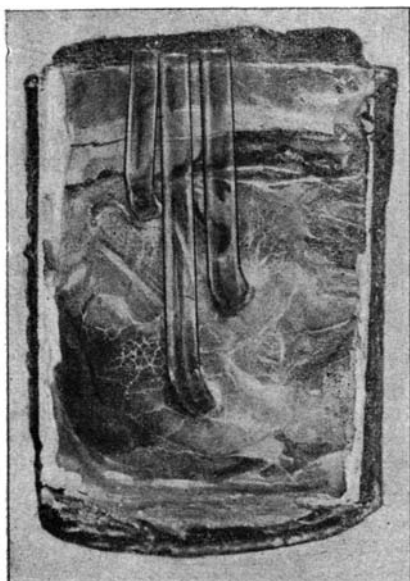
Фиг. 28. Промороженный снизу цилиндр. Вода содержится во всех трех трубках. Вода в трубки мигрировала из фракции диаметром 0.25—0.05 мм, расположенной за перегородкой



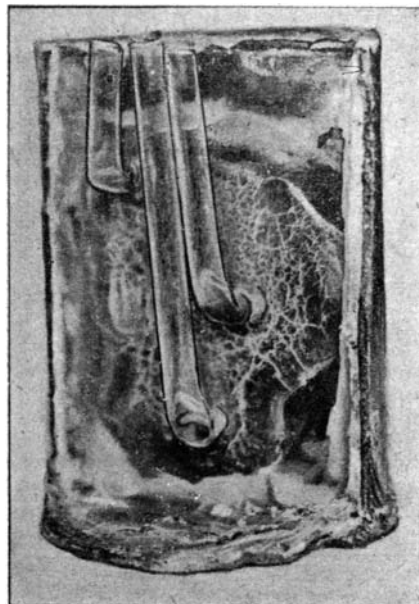
Фиг. 29. Промороженный снизу цилиндр. Вода в трубках отсутствует. За перегородкой расположен суглинок № 3

По окончании опыта часть стенки цилиндра, расположенная со стороны трубок, а также и пробковая изоляция удалялись, и трубки становились доступными для наблюдений и промеров в них воды. При вскрытии цилиндров обнаружено следующее:!

1. Трубки цилиндров, вторая половина которых была заполнена капиллярно увлажненным песком и фракциями его, содержали воду в замерзшем состоянии. При охлаждении этих грунтов снизу замерзшая вода наблюдалась во всех трех трубках, при охлаждении же сверху вода имелаась только в одной нижней трубке (фиг. 22, 23, 24, 25, 26, 27 и 28). Таким образом, здесь повторяется та же закономерность, что и в случае фиксации мигрирующей воды воздушно-сухой фракцией песка 2—1 мм (опыты серии 3).



Фиг. 30. Промороженный снизу цилиндр. Вода в трубках отсутствует. За перегородкой расположена майкопская глина № 5



Фиг. 31. Промороженный сверху цилиндр. Вода в трубках отсутствует. За перегородкой расположена майкопская глина № 5

2. В трубках цилиндров, вторая половина которых была заполнена капиллярно увлажненным пылеватым суглинком и глиной, воды обнаружено не было ни при каких условиях охлаждения (фиг. 29, 30, 31).

3. В контрольных цилиндрах во всех случаях трубки также были пусты.

Нами были произведены промеры уровня замерзшей воды в трубках. Результаты этих промеров даны в табл. 31.

У пылеватого песка № 2, как в случае охлаждения сверху, так и при охлаждении снизу, трубки были заполнены не чистой водой: к воде был примешан в достаточном количестве грунт, увлеченный ею при поступлении в трубки.

Таким образом, данные опыты, как мы сказали, наглядно продемонстрировали нам разный характер процессов миграции воды в жидкой форме в песчаных и глинистых грунтах.

Гидростатические давления, развивающиеся при замерзании песчаных грунтов, „выжимают“ воду из этих грунтов, и она собирается в стеклянных трубках.

Миграция воды в различных грунтах при их промерзании

Наименование грунта	При охлаждении грунтов сверху			При охлаждении грунтов снизу		
	№ трубки	высота столба воды в отдельных трубках (в см)	общая высота водяного столба (в см)	№ трубки	высота столба воды в отдельных трубках (в см)	общая высота водяного столба (в см)
Фракция № 7, диам. 1—0,5 мм .	1 2 3	0.0 0.0 6.5	} 6.5	1 2 3	1.2 2.5 2.8	} 6.5
Фракция № 8, диам. 0.5—0.15 мм	1 2 3	0.0 0.0 5.5	} 5.5	1 2 3	1.6 1.7 2.8	} 6.1
Фракция № 9, диам. 0.25—0.05 мм	1 2 3	0.0 0.0 4.5	} 4.5	1 2 3	1.7 4.0 3.3	} 9.0
Песок № 1	1 2 3	0.0 0.0 6.5	} 6.5	1 2 3	Опыта не было	} —
Пылеватый песок № 2	1 2 3	0.8 2.0 5.0	} 7.8	1 2 3	0.0 1.2 2.7	} 3.9
Пылеватый суглинок № 3	1 2 3	0.0 0.0 0.0	} 0.0	1 2 3	0.0 0.0 0.0	} 0.0
Майкопская глина № 5	1 2 3	0.0 0.0 0.0	} 0.0	1 2 3	0.0 0.0 0.0	} 0.0

При замерзании же глинистых грунтов вода перераспределяется в толще этого грунта, и трубки остаются пустыми.

Результаты опытов серии 5

Как нами уже указывалось ранее (опыты серии 1), иссушение нижних слоев песка при замерзании его в соседстве с глиной или суглинком является результатом взаимодействия двух факторов: сил напряжения, развивающихся в песке при переходе воды в лед, и сил всасывания, действующих на границе раздела песок — суглинок или песок — глина. Для выяснения значения сил всасывания в процессах перераспределения воды при замерзании вертикально-слоистых грунтов нами были проведены специальные опыты, причем мы не ставили задачи детального изучения вопроса о силах всасывания, так как этот вопрос представляет особую большую проблему и имеет уже значительную литературу. Нами этот

вопрос прорабатывался лишь в том объеме, в каком этого требовала основная, разрабатываемая нами проблема. Методика постановки опытов следующая.

Одна половина цилиндра заполнялась песком; после капиллярного насыщения песка во вторую половину помещался пылеватый суглинок № 3 или белая глина № 4, при этом в одних опытах перегородка была временной и после загрузки второго грунта удалялась, в других она была постоянной и имела окошечки.

Пылеватый суглинок шел в опыт или в воздушно-сухом состоянии или же при увлажнении около 25, 50 и 75% от его капиллярной влагоемкости; белая глина — в воздушно-сухом состоянии.

Опыт 12

В одной половине цилиндра находился капиллярно увлажненный песок, в другой — воздушно-сухая белая глина. Цилиндры имели перегородку с окошечками.

Часть таким образом смонтированных цилиндров оставлялась при комнатных положительных температурах, вторая часть промораживалась. Охлаждение грунтов производилось сверху. Через 6 суток опытные цилиндры были вскрыты, и обнаружено следующее (табл. 32):

Таблица 32

Перераспределение воды под действием сил всасывания на контакте воздушно-сухой белой глины и капиллярно увлажненного песка

При положительных температурах						При отрицательных температурах					
№ цилиндра	глубина взятия проб на влажность (в см)	влажность белой глины (в %)		влажность песка (в %)		№ цилиндра	глубина взятия проб на влажность (в см)	влажность белой глины (в %)		влажность песка диам. 0,5 мм (в %)	
		до опыта	после опыта	до опыта	после опыта			до опыта	после опыта	до опыта	после опыта
23	0—2	В воздушно-сухом состоянии	32.13	18.40	2.15	24	0—2	В воздушно-сухом состоянии	24.80	18.40	12.75
	2—4		32.01	18.80	2.35		2—4		24.40	18.80	13.20
	4—6		31.85	18.10	2.10		4—6		20.60	18.10	12.70
	6—8		31.62	20.60	—		6—8		20.80	20.60	10.80
25	0—2	В воздушно-сухом состоянии	22.0	18.40	6.45	26	0—2	В воздушно-сухом состоянии	—	18.40	9.20
	2—4		22.60	18.80	6.40		2—4		30.05	18.80	10.20
	4—6		23.0	18.10	6.10		4—6		27.20	18.10	10.40
	6—8		22.10	20.60	5.75		6—8		26.40	20.60	8.30

Белая глина как при положительных, так и при отрицательных температурах не сохранила воздушно-сухого состояния и была увлажнена. Увлажнение глины произошло путем засасывания ею воды из песка, в результате чего влажность песка по всей толще его снизилась.

Влажность песка с 18% в случае положительных температур снизилась до 5 и даже 2%, в случае отрицательных температур — до 10—8%. Влажность глины возросла до 20—30%.

Таким образом, процесс засасывания воды глиной при отрицательных температурах идет менее интенсивно, чем при положительных.

Все дальнейшие опыты по изучению сил всасывания проводились нами лишь в условиях положительных температур.

В одной половине цилиндра помещался песок № 1, во второй — пылеватый суглинок № 3. Песок во всех случаях увлажнялся до капиллярной влагоемкости, суглинок имел три градации увлажнения: 1) около 25%, 2) около 50% и 3) около 75% от капиллярной влагоемкости.

Грунты отделялись друг от друга перегородкой с окошечками.

Всего в опыт пошло 9 цилиндров, которые разбивались на три тройки, причем каждая тройка включала в себя цилиндры с разно увлажненным суглинком. Вскрывались цилиндры в три срока: первые три цилиндра были вскрыты через сутки, вторые три — через 9 суток, третьи три — через 13 суток.

Наблюдавшееся перераспределение воды в грунтах представлено в табл. 33.

Таблица 33

Перераспределение воды под действием сил всасывания на контакте пылеватого суглинка и песка при наличии между ними перегородок с окошечками

Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность суглинка (в %)				Влажность песка (в %)			
	перед опытом	после 24 часов взаимодействия	после 9 суток взаимодействия	после 13 суток взаимодействия	перед опытом	после 24 часов взаимодействия	после 9 суток взаимодействия	после 13 суток взаимодействия
0—2	28.60	27.80	—	32.10	19.50	—	16.10	12.40
2—4		28.50	28.10	28.80	20.60	18.70	18.80	15.60
4—6		28.80	28.60	28.90	22.80	20.40	22.30	18.70
6—8		28.90	28.50	29.0	23.80	20.80	21.30	20.30
0—2	19.90	21.25	23.50	—	19.70	12.80	11.60	13.40
2—4		23.20	24.0	—	20.30	17.0	15.80	16.60
4—6		23.10	24.50	—	20.60	18.80	17.80	18.90
6—8		22.60	24.20	—	22.50	19.30	19.50	19.0
0—2	11.50	21.10	19.80	24.50	21.0	7.83	8.65	2.84
2—4		21.40	20.0	24.40	21.10	11.0	10.95	2.90
4—6		20.80	20.30	25.40	21.60	13.3	14.85	2.98
6—8		20.70	20.20	25.40	23.20	15.8	—	3.25

При влажности суглинка, равной 28.60%, что составляет около 75% капиллярной влагоемкости его, водного обмена между песком и суглинком, как правило, не происходило. Даже после взаимодействия в течение 13 суток влажность суглинка не изменялась. В песке наблюдалось небольшое снижение влажности, особенно в верхних слоях, но оно, по нашему мнению, происходило за счет испарения воды.

При влажности суглинка, равной 19.90%, что составляет около 50% капиллярной влагоемкости его, водный обмен между суглинком и песком происходит, причем в течение первых же суток из песка в суглинок перемещаются большие количества воды. В цилиндрах, стоявших 24 часа, влажность суглинка с 19.90% повысилась до 23%, в то время как в цилиндрах, стоявших 9 суток, она повысилась лишь до 24%.

Наиболее сильное повышение влажности суглинка наблюдается в тех случаях, когда исходная влажность его равна 11.50%, т. е. 25% капиллярной влагоемкости. Здесь также наибольшие количества воды всасываются суглинком из песка в первые сутки, но процесс всасывания, хотя и замедленными темпами, продолжается и после десяти суток.

В одной половине цилиндра помещался капиллярно увлажненный песок, во второй — пылеватый суглинок при тех же трех градациях увлажнения, что и в опыте 13.

Данный опыт имел лишь следующие отличия от предыдущего 1) перегородка между грунтами отсутствовала и 2) были снижены сроки взаимодействия между грунтами.

В данном опыте эти сроки были следующие: 24 часа, 2 часа и 0.5 часа.

Наблюдавшееся перераспределение влажности в грунтах представлено в табл. 34.

Таблица 34

Перераспределение воды под действием сил всасывания на контакте пылеватого суглинка и песка при отсутствии между ними перегородок

Глубина взятия проб на влажность (в см)	Влажность суглинка (в %)				Влажность песка (в %)			
	перед опытом	после часового взаимодействия	после 2 часов взаимодействия	после 24 часов взаимодействия	перед опытом	после часового взаимодействия	после 2 часов взаимодействия	после 24 часов взаимодействия
0—2	28.10	27.50	27.40	27.0	19.80	21.50	20.0	19.60
2—4		27.80	27.40	27.80	18.50	22.10	20.0	19.60
4—6		27.10	—	27.9	18.10	22.0	19.70	20.40
6—8		27.70	28.30	28.60	20.60	23.10	22.80	21.40
0—2	20.0	23.80	25.10	26.40	19.80	13.20	11.60	11.10
2—4		24.50	25.20	26.90	18.50	14.70	13.0	12.80
4—6		24.90	26.30	27.30	18.10	18.0	16.80	15.30
6—8		25.60	25.50	27.60	20.60	19.0	18.80	18.0
0—2	11.30	28.30	30.40	33.60	19.80	5.90	4.40	4.40
2—4		30.0	31.50	32.30	18.50	6.13	4.45	5.10
4—6		29.40	32.30	33.70	18.10	6.84	4.60	5.50
6—8		29.10	32.0	34.40	20.60	7.90	4.55	6.80

Как и в предыдущем опыте, при увлажнении суглинка до 75% капиллярной влагоемкости водного обмена между песком и суглинком не происходило. При двух других градациях увлажнения суглинка происходило энергичное всасывание воды из песка в суглинок, и наиболее интенсивное всасывание воды суглинком происходило в первый же час взаимодействия грунтов.

В свете данных опытов серии 5 становится вполне очевидным, что при промерзании вертикально-слоистых грунтов в комбинации песок — глина или песок — суглинок (разнородных по природе грунтов) иссушение песка происходит под влиянием двух факторов, причем преобладающее значение имеют силы всасывания.

ВЫВОДЫ

1. Подтверждаются данные Тебера о характере миграции воды при замерзании глинистых и песчаных грунтов в открытых системах: в первых влага мигрирует по направлению к источнику холода, во вторых — по направлению от источника холода.¹

¹ О таких же закономерностях в направлении мигрирующей воды говорил Н. И. Быков в своем докладе в Институте географии Акад. Наук в зиму 1936/37 г.

2. Подтверждаются данные опытов Тебера с замораживанием без подтока воды со стороны вертикально-слоистых грунтов, а именно — вода при этом мигрирует из песков в глины; обобщая, можно сказать так: вода при одностороннем промораживании грунтов мигрирует из грунтов с более крупными зернами в грунты с более мелкими зернами.

При этом пучение грунтов с мелкими зернами резко возрастает сравнительно с тем, когда они замерзают без соседства крупнозернистых грунтов.

3. Явления, о которых говорится в пункте втором, протекают более интенсивно, если процесс замораживания глин и песков в вертикально-слоистом расположении происходит при подтоке воды.

4. При наших опытах по типу „миграции воды в замерзающем песке“ нами констатировалась миграция воды в следующие фракции:

1	— 0.5	мм
0.5	— 0.15	„
0.25	— 0.05	„
0.05	— 0.01	„
0.01	— 0.005	„

(Все фракции получены из песка или просеиванием через сито или отмучиванием по способу Сабанина.)

5. По типу „миграции воды в замерзающей глине“ нами констатировалась миграция воды в фракции с диаметром частиц меньше 0.005 мм.

6. Установлено, что при замораживании вертикально-слоистых грунтов миграция влаги в соседний грунт тем меньше, чем меньше зерна увлажненной фракции.

7. В опытах промораживания грунтов с применением стеклянных трубок (серия 4 наших опытов) нами с наглядностью доказано, что миграция воды по типу „миграция в замерзающем песке“ происходит преимущественно в гравитационно-жидкой фазе.

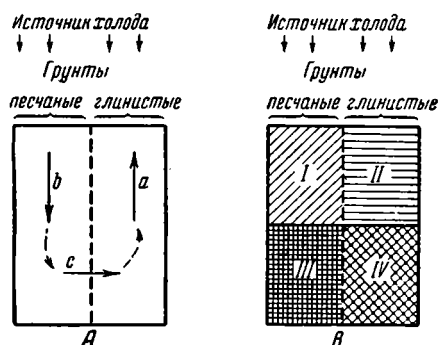
8. Однако если в процессе промерзания рядом с капиллярно увлажненным грунтом находится воздушно-сухой грунт, то одновременно с гравитационной жидкой фазой мигрирует в рядом находящийся грунт вода и в плечном состоянии и в фазе пара.

9. В процессе замораживания вертикально-слоистых грунтов вода из грунтов песчаных разностей переходит в грунты глинистых разностей под влиянием двух сил: а) сил гидростатического давления, образующегося в замерзающем песке, и б) сил капиллярного всасывания воды глинистыми грунтами из грунтов песчаных разностей.

По нашим опытам, капиллярная сила всасывания в глинистые грунты действует не только при сухом и воздушно-сухом состоянии всасывающих глинистых грунтов, но и при влажности в 25 и даже 50% от их капиллярной влагоемкости.

10. Этот процесс миграции воды при отсутствии подтока воды в процессе замораживания происходит по следующим схемам (фиг. 32):

В схеме А по стрелке а вода идет в грунтах глинистых разностей по направлению к источнику холода под влиянием пока не выясненных сил (по Теберу, под влиянием сил кристаллизации); по стрелке б в грунтах песчаных разностей вода идет от источника холода под влиянием гидростатических сил, образующихся в процессе замораживания; по стрелке в вода из грунтов песчаных разностей идет в грунты глинистых раз-



Фиг. 32. Схемы процессов миграции жидкой воды в песчаных и глинистых разностях при их замораживании и при условии отсутствия подтока воды в процессе замораживания

ностей под влиянием гидростатических сил и сил капиллярного всасывания.

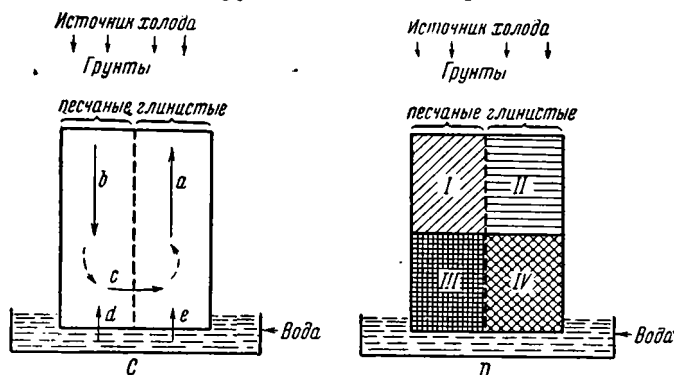
По схеме *В* в вышеуказанных условиях получаются в конечном результате четыре области:

I—область обеднения водой грунтов песчаных разностей.

II—область обогащения водой грунтов глинистых разностей за счет воды грунтов как глинистых, так и песчаных разностей.

III—область транзитного перемещения воды грунтов песчаных разностей из области *I* в область *IV* (по стрелке *с*).

IV—область сложных процессов миграции воды: *а*) обеднения водой в процессе замерзания только глинистого грунта (стрелка *а* схемы *А*); *б*) обогащения водой в процессе замерзания системы вертикально-слоистых грунтов за счет области *III* (стрелка *с* схемы *А*); *γ*) как правило, в итоге процесс *а* превалирует над процессом *б*, и в результате область *IV* есть область обеднения водой грунтов глинистых разностей.



Фиг. 33. Схемы процессов миграции жидкой воды в песчаных и глинистых разностях при их замерзании и при условии наличия подтока воды в процессе замерзания

11. При наличии подтока воды в процессе замерзания вертикально-слоистых грунтов процесс миграции воды происходит по следующим схемам (фиг. 33).

В схеме *С* по направлению стрелок *а*, *б*, *с* вода переходит, как и в схеме *А*, и под влиянием тех же сил; но, кроме того, в песчаную разность входит под влиянием капиллярных сил вода по стрелке *д*, а в глинистую разность—под влиянием тех же сил, по стрелке *е*.

В схеме *Д* в условиях подтока воды в конечном результате замерзания грунтов получаются также четыре области:

I—та же, что и в схеме *А* (фиг. 32) область обеднения водой грунтов песчаных разностей.

II—та же, что и в схеме *В* (фиг. 32) область обогащения водой грунтов глинистых разностей, но уже не только за счет воды грунтов глинистых и песчаных разностей, но и за счет подтока воды со стороны (в природе—за счет грунтовых вод).

III—область прихода воды по стрелке *б* и по стрелке *д* и ухода воды в область *IV* по стрелке *с*. В итоге обычно приход воды больше, чем ее уход.

IV—область сложных процессов миграции воды, как и в схеме *В* (фиг. 32); но, кроме того, в эту область поступает вода по стрелке *е* и по стрелке *д* через стрелку *с*. В итоге часто случается, что из области *IV* уходит по направлению стрелки *а* больше воды, чем приходит по стрелкам *с* и *е*.

Примечание. Обеднение водой области *IV*, по Теберу, объясняется тем, что передвижение воды в замерзающих глинах под влиянием сил кристаллизации много скорее, чем под влиянием капил-

лярных сил. Мы считаем, что вопрос этот требует основательной проработки.

12. Таким образом, в случае промерзания вертикально-слоистых грунтов системы песок — глина область II обогащается водой из следующих источников: за счет воды области IV; за счет воды песчаного грунта, поступающей через область III; за счет подтока воды со стороны через область IV и за счет подтока воды со стороны через область III.

13. Опыты Тебера и наши (см. п. 12) объясняют весьма значительное дифференциальное пучение глинистых грунтов, если рядом с ними имеется подток воды со стороны в процессе промерзания этих грунтов.

14. На основании опытов Тебера и проработки и развития этих опытов нами, можно ввести в практику характеристику грунтов по типу миграции в них воды в процессе промерзания. На первое время можно установить два типа: 1) тип миграции воды в песках и 2) тип миграции воды в глинах.

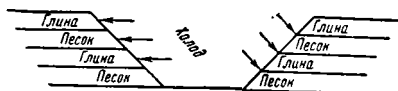
15. Наши опыты подтверждают вывод Тебера о необходимости перемешивания или замены вертикально- или косо-слоистых грунтов в основании дорожного полотна, если основание находится в сфере зимнего промерзания грунтов.

16. В бортах канав горизонтально-слоистые грунты могут служить причиной разрушения бортов при их промерзании, так как по отношению к источнику холода в бортах канав получают вертикально-слоистые грунты, которые при промерзании могут дать значительные дифференциальные смещения грунта (фиг. 34).

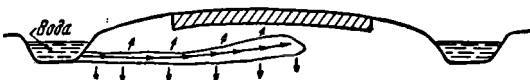
17. Если в бортах канав имеются хотя бы тонкие прослойки песка, идущие в тело дорожного полотна, то последнее может весьма значительно насыщаться водой из канавы через эти песчаные прослойки, которые как фитили будут высасывать воду из канавы, обогащать водой грунты тела полотна и служить причиной разрушения покрытия дороги или через пучение увлажненных грунтов тела полотна, или через потерю несущей способности этих грунтов вследствие их переувлажнения (фиг. 35).

18. Из пп. 16 и 17 вытекает необходимость теми или другими мерами уничтожить слоистость грунтов в бортах канав.

19. Если под подошвой фундамента находятся вертикально-слоистые грунты и есть опасение, что промерзание грунтов может достигнуть этих грунтов, то следует уничтожить эту слоистость или путем перемешивания этих грунтов или путем выемки их на некоторую глубину и замены однородным грунтом.



Фиг. 34. Вертикально-слоистое расположение грунтов в бортах канав, которое при замерзании может вызывать значительные дифференциальные смещения грунта



Фиг. 35. Тонкие прослойки песка, идущие из бортов канав в тело дорожного полотна. Стрелки указывают направление движения воды из канавы в песчаную прослойку и окружающий ее грунт

ЛИТЕРАТУРА

- Сумгин М. И. Современное положение исследования вечной мерзлоты в СССР и желательная постановка этих исследований в ближайшем будущем. Сборн. Вечная мерзлота, 5—9, Изд. Акад. Наук, М.—Л. 1930.
Федосов А. Е. Физико-механические процессы в грунтах при их замерзании и оттаивании. Трансжелдориздат, М., 1935.
Тебер С. Морозное пучение. *Journal of Geol.*, 37, № 5, 1929.

Тебер С. 1. Замерзание и оттаивание почвы как факторы разрушения дорожных одежд. Public Roads, № 6, 1930.
Тебер С. 2. Механика морозного изучения. Journ. of Geol., 38, № 4, 1930.

A. P. BAZHENOVA

A DEVELOPMENT OF TEBER'S EXPERIMENTS CONCERNING THE FROST HEAVING OF SOILS WITH VERTICAL STRATIFICATION

Summary

The author has repeated and developed Teber's experiments concerning the freezing of the soils with vertical layers. In the result of there experiments the author was able to draw the following conclusions: 1. There are two types of the water migration in the freezing soils: first the migration against the warmth flow in the arenaceous soils and second the migration down the warmth from in the argillaceous soils; 2. for the fractions of soils the author has stated the boundary up to which water, in the process of freezing, moves according to the mode of arenaceous soils and another boundary from which water moves according to the mode of argillaceous soils; 3. The freezing of soils with a vertical stratification causes the differential heaving. In the case when the road surface lies on such a stratified foundation freezing in winter, it is useful, in order to prevent heaving, to work the foundation into the uniform mass by means of intermixing.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Проф. А. А. Петровский. Применение горизонтальной антенны к электрическому картированию	1
Инж. В. В. Алексеев. Полевая ондометрическая установка для электрокартирования	21
А. П. Баженова. Некоторое развитие опытов Тебера по изучению грунтов с вертикальной слоистостью	29

Редактор Л. С. Зайцев.

Технический редактор А. П. Дронов.

Корректор О. В. Герцман.

Сдано в набор 22/VIII 1939 г. Подписано к печати 3/V 1940 г. Формат 7/Х108^{1/16}. Объем 5 п. л.
 В 1 п. л. 58 000 печ. зн. Уч.-изд. л. 7,42. Тираж 800 экз. А-28592. РИСО № 955.
 АНИ № 1199.

Типо-литография Издательства Академии Наук СССР. Ленинград, В. О., 9 л., д. 12. Заказ № 254

Минералогия Союза (Под общей редакцией акад. А. Е. Ферсмана)
Серия А, вып. 1. Э. М. Бонштедт и Б. В. Щербина. Нефелин. 1933. Стр. 69. Ц. 3 р.

— **Вып. 2.** Е. В. Костылева и М. Б. Владимиров. Циркон. 1934. Стр. 83. С 18 фиг. Ц. 1 р.

— **Вып. 3.** Э. М. Бонштедт. Титанит. (Сфен) 1934. Стр. 64. С 21 фиг. Ц. 1 р. 75 к.

— **Вып. 4.** Е. Ф. Чирва. Пироморфит. 1935. Стр. 43. Ц. 2 р. 25 к.

— **Вып. 5.** Э. М. Бонштедт. Перовскит. 1935. Стр. 36. Ц. 1 р. 60 к.

— **Вып. 7.** Е. Ф. Чирва. Ванадинит. (Ломоносовский институт). 1936. Стр. 35. С 15 рис. 5 табл. Ц. 8 р. 25 к.

Минералы Хибинских и Ловозерских тундр. (Сборник). Под ред. акад. А. Е. Ферсмана, Я. А. Смолянинова и Э. М. Бонштедт. 1937. Стр. 564. С 2 вкл. рис. Ц. в пер. 23 р.

Среди статей: Предисловие. В. М. Куплетский. Петрографический очерк Ловозерских тундр. Е. В. Костылева. Минералогический очерк Хибинских тундр. А. Е. Ферсман. Общая характеристика хибинских минералов, и др. главы.

Неметаллические ископаемые СССР. Т. 1. (Академия Наук СССР) НКТ). 1936. Стр. 580. Ц. в пер. 25 р.

КНИГИ ВЫСЛАЮТСЯ НАЛОЖЕННЫМ ПЛАТЕЖОМ

Адрес. Москва, Б. Черкасский пер., д. 2, „АКАДЕМКНИГА“

АДРЕСА ФИЛИАЛОВ КОНТОРЫ „АКАДЕМКНИГА“

Ленинград 104, пр. Володарского, 53-а.

Киев, ул. Свердлова, 15.

Харьков, ул. Свободной Академии, 13.

Одесса, ул. 10-летия Красной Армии, 28.

Ростов н/Дону, ул. Энгельса, 68.

Минск, Советская, 39.

Казань, Пионерская ул. д. 17/38.

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует
10	1 св., в сноске	$C_{a0} = \frac{5}{9} \cdot \frac{lmk}{2 \lg \frac{l}{r_0} - 0.618} + \dots$	$C_{a0} = \frac{5}{9} \cdot \left[\frac{lmk}{2 \lg \frac{l}{r_0} - 0.618} + \dots \right.$
11	в сноске, форм. (32')	$\left. + \frac{l'}{2 \lg \frac{l'}{r_0} - 0.618} \right],$	$\left. + \frac{l'}{2 \lg \frac{l'}{r_0} - 0.618} \right],$
18	3 св., графа 4	153. 4	173.4
56	в табл. 18, № 50	0.30 *	[уничтожить звездочку]
58	в табл. 19, графа 2, № 5	0—8	5—8
75	13 св.	в следующие фракции	в следующих фракциях

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Обручев, В. А. акад. История геологического исследования Сибири. Период первый, обнимающий XVII и XVIII вв. (Гмелин, Паллас, Георги). 1931. Стр. 154. Ц. 2 р. 50 к.

Обручев, В. А. акад. История геологического исследования Сибири. Период второй (1801—1850). (Гельмарсен, Гофман, Миддендорф, Чихачев, Щуровский, Эрман). 1933. Стр. 257. Ц. 5 р.

Обручев, В. А. акад. История геологического исследования Сибири. Период третий (1851—1888). (Кропоткин, Маак, Меглицкий, Чекаловский, Черский и Шмидт). 1934. Стр. 354+41. Ц. 10 р.

Обручев, В. А. акад. История геологического исследования Сибири. Период четвертый (1889—1917) (систематических государственных исследований). 1937. Стр. 573+214. Ц. 25 р.

Содержание: Введение. Общий обзор исследований Сибири с 1889 по 1917 г. Краткие биографии главных исследователей. Западносибирская низменность и Киргизский край. Горные страны Алтая, Кузнецкого Алатау, Салаира, Западного Саяна и котловины — Кузнецкая и Минусинская. Среднесибирская платформа. Древнее течение — Прибайкалье. Байкальское нагорье и Забайкалье. Верхоянско-Колымский край. Амурский край. Дальний Восток. Обзор сочинений, содержащих описание всей Сибири или крупных частей ее, а также полезных ископаемых, остатков фауны и флоры, метеоритов, землетрясений, вечной мерзлоты. Тектонические представления конца XIX века и начала XX века и приложения их к объяснению строения Сибири и образования Байкала. Предметный указатель. Геологическая литература 1889—1917 гг.

КНИГИ ВЫСЫЛАЮТСЯ НАЛОЖЕННЫМ ПЛАТЕЖОМ

Адрес, Москва, Б. Черкасский пер., д. 2, „АКАДЕМКНИГА“

АДРЕСА ФИЛИАЛОВ КОНТОРЫ „АКАДЕМКНИГА“

Ленинград 104, пр. Володарского 53-а

Киев, ул. Свердлова, 15.

Харьков, ул. Свободной Академии, 13

Одесса, ул. 10-летия Красной Армии, 28

Ростов н/Дону, ул. Энгельса, 68

Минск, Советская, 39

Казань, Пионерская 17/38
