

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 551.321.1

АПРОКСИМАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЬДИСТОСТИ И ВЛАЖНОСТИ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МОДЕЛИ РЕГРЕССИИ

Л.А. Конченко

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, konchenko@mail.ru

Представлены результаты определений шлировой льдистости и влажности минеральных прослоев и агрегатов для многолетнемерзлых грунтов, характеризующихся микро-, тонкошлировыми и микро-, частослоистыми или микро-, мелкосетчатыми криогенными текстурами. Шлировая льдистость определялась по материалам фотодокументации образцов мерзлого грунта, влажность минеральных прослоев – обратным расчетом на основе данных о шлировой льдистости и суммарной влажности и плотности, полученных в результате опробования. Методом наименьших квадратов построены модели линейной регрессии, позволяющие аппроксимировать значения влажности минеральных прослоев и агрегатов в случаях, когда непосредственное опробование невозможно.

Шлировая льдистость, влажность минеральных прослоев и агрегатов, криогенные текстуры, корреляционный анализ, модель регрессии

APPROXIMATION OF ICINESS AND WATER CONTENT
IN FROZEN GROUND WITH USE OF REGRESSION MODEL

L.A. Konchenko

Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, konchenko@mail.ru

Observational data of ice-lens iciness (visible ice content) and water content of mineral layers and aggregates in frozen ground are submitted for permafrost, characterized by small-scale reticulate and small-scale layered cryogenic structures. Visible ice content was estimated based on photographic documentation of the frozen core samples. Water content of mineral layers was obtained by backward calculation using the found values of visible ice content and total water content and density of frozen ground determined by direct sampling. Linear regress models are received by the least-squares method, allowing us to approximate the values of water content of mineral layers and aggregates in frozen ground in cases when direct sampling of ground is impossible owing to the small size of mineral units.

Ice-lens iciness, water content of mineral layers and aggregates, cryogenic structures, correlation analysis, regression model

ВВЕДЕНИЕ

Качество инженерно-геокриологических исследований и составляемых на их основе карт для различных регионов криолитозоны во многом определяется точностью и детальностью учета пространственных изменений криогенного строения и льдистости (влажности) многолетнемерзлых пород (ММП). Предусматривается [Методические..., 1989], что при инженерно-геокриологических исследованиях необходимо установить различные виды влажности и льдистости ММП. Определяются влажность суммарная, минеральных прослоев и агрегатов, влажность за счет незамерзшей воды, льдистость за счет залежеобразующего льда и тек-

стурообразующего льда, последняя подразделяется, в свою очередь, на цементационную и шлировую (сегрегационную, или льдистость за счет ледяных включений).

Величина шлировой льдистости (I_i) используется в качестве классификационного показателя как в нашей стране, так и за рубежом [Мельников, Кондратьева, 1998], в частности, при разделении пород на категории. Эта величина применяется в различных инженерных расчетах и определяется непосредственными замерами шлиров льда в породе. В случаях, когда ледяные шлиры частые и сложной формы, прямые замеры невозможны.

Влажность минеральных прослоев и агрегатов (W_m) – одна из главных характеристик мерзлых грунтов. Цементационная льдистость оценивается именно по этому показателю. В методических документах по инженерно-геологической съемке рекомендуется определять W_m путем опробования мерзлого грунта (керна) с интервалом 1 м. Однако ММП, особенно синкриогенные, а также эпикриогенные, слагающие верхнюю часть мерзлой толщи, зачастую имеют, по классификации Б.И. Втюрина и Е.А. Втюриной [Втюрин, 1975], микро-, частослоистые и микро-, мелкосетчатые криогенные текстуры. Вследствие малого размера минеральных агрегатов отбор проб на определение влажности из них невозможен.

В научной литературе отмечалось [Клишевич, 1989], что однозначной трактовки показателя льдистости грунта за счет ледяных включений нет, как нет и методики его определения, а оперирование в нормативных документах физическими величинами, значения которых не могут быть найдены, некорректно и приводит к различным пониманиям льдистости и влажности. Необходимость развития методов количественного описания криогенного строения мерзлых пород также отмечалась ранее [Шур и др., 1989]. На сегодняшний день изучение криогенного строения ММП зачастую носит описательный характер и сводится к нахождению диапазонов изменения размеров шпиров льда и минеральной составляющей; отдельные определения шпировой и цементационной льдистости (влажности минеральных прослоев и агрегатов) не проводятся. Количественные методы определения важнейших показателей ММП (льдистости и влажности) в грунтах с указанными видами криогенных текстур – важная задача современных исследований, которая рассматривается в данной работе.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для целого ряда мерзлых грунтов с микро-, тонкошпировыми, микро-, частосетчатыми или микро-, частослоистыми криогенными текстурами отдельные определения шпировой льдистости и влажности за счет льда-цемента путем отбора проб не проводились. На практике зачастую не удается не только отобрать пробы из минеральных прослоев и агрегатов, не захватив ледяные шпир, но и измерить последние.

В случаях, когда непосредственные замеры шпиров льда невозможны, для определения шпировой льдистости используют формулу

$$I_i = \frac{W_{tot} - W_m}{\rho_i} \rho_d,$$

где ρ_d – плотность сухого грунта, кг/м³; W_{tot} – суммарная влажность грунта (весовая), %; W_m – влаж-

ность минеральных прослоев (весовая), %; ρ_i – плотность льда, кг/м³.

В данную формулу входит показатель W_m , значение которого зачастую считается равным влажности на границе раскатывания. Такие допущения принимаются, поскольку непосредственные определения W_m проводились в основном для мелкольдистых грунтов, в которых минеральные прослои и агрегаты имеют достаточный для отбора проб размер. Накопленный в настоящее время фактический материал показывает, что часто W_m может быть очень высокой и намного превышать влажность не только на границе раскатывания, но и на границе текучести [Жесткова, 1982; Конченко, 1988; Шур, 1988]. В большинстве случаев W_m изменяется в широких пределах, что вызывает необходимость экспериментального нахождения этого показателя.

Определения W_m и I_i для грунтов с указанными видами криогенных текстур возможны по материалам фотодокументации керна. Такая работа была нами проведена для супесчано-суглинистых покровных отложений, развитых в Центральной Якутии (рис. 1). Путем отбора проб определялись суммарная влажность (W_{tot}) и плотность сухого грунта (ρ_d). Величина I_i вычислялась по материалам фотодокументации керна мерзлых пород, при этом шпировая льдистость определялась как отношение площади, занятой видимым льдом, к общей площади образца (в %). Принцип,

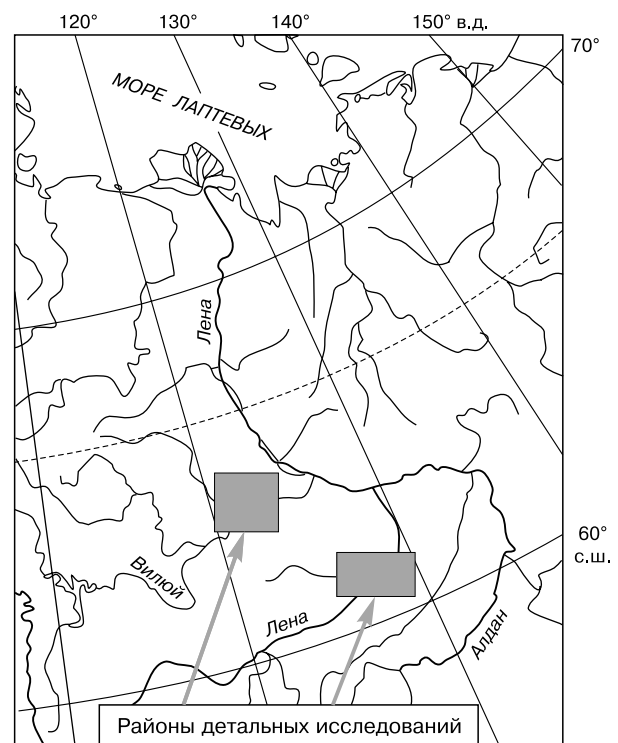


Рис. 1. Схема районов исследований.

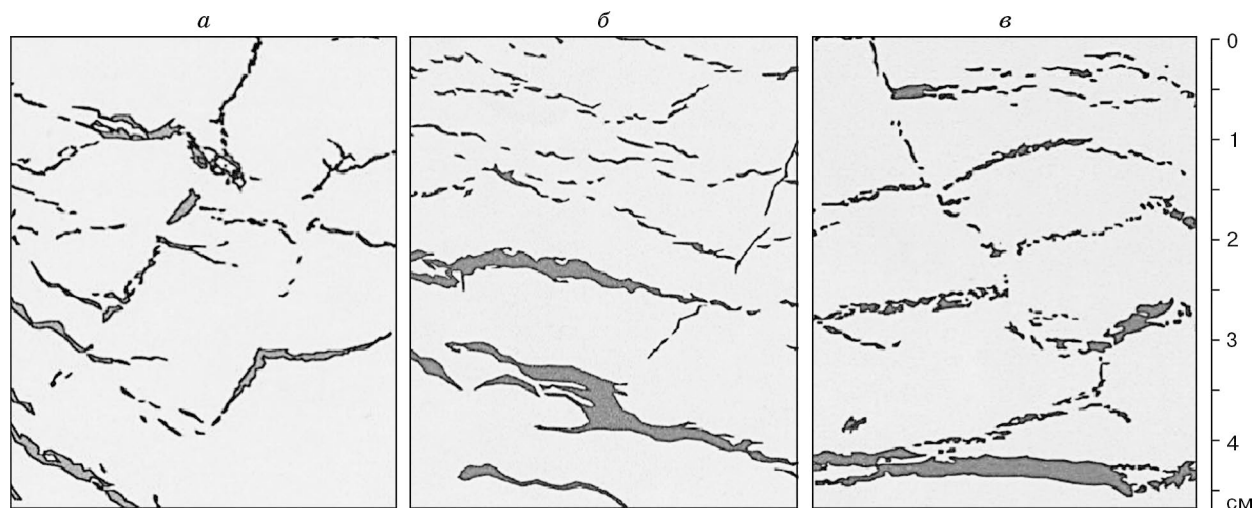


Рис. 2. Три сечения образца эпигенетически промерзавших пород:

$a - I_i = 6,1\%$; $b - I_i = 7,1\%$; $v - I_i = 7,4\%$.

позволяющий заменять измерение объемов сравнимых тел (шлировая льдистость выражается в объемных размерностях) измерениями площадей, был предложен еще в XIX в. математиком Кавальери [Богданов и др., 1984]. В геологии планиметрический метод был предложен М. Делессом для определения объемного минералогического состава горных пород по макроскопической структуре полированного образца породы. В настоящее время планиметрический метод применяется в различных отраслях науки и техники [Салтыков, 1976]. Погрешность метода для решения конкретной задачи определения доли объема, занятого ледяными шлирами, в общем объеме породы оценивалась путем анализа различных сечений одного и того же образца. Образцы, отобранные из керна диаметром 70 мм и высотой до 120 мм, зачищались с нескольких сторон, по полученным сечениям рассчитывалась площадь, занятая льдом (рис. 2). Для образцов, содержащих более частые ледяные шлиры, шлировая льдистость определялась дополнительно в пределах различных полос одного сечения; при этом значения льдистости в различных полосах отличались менее чем на 3%. Абсолютная ошибка определения шлировой льдистости изменяется от 0 до 6%, а ее значения в данном случае зависят от криогенной текстуры мерзлой породы: чем чаще и тоньше ледяные шлиры, тем меньше погрешность вычисления.

Площадь, занятая видимым льдом, определялась методом оптико-структурного машинного анализа. В ходе сканирования фотоизображений по полученным гистограммам коэффициентов пропускания различных точек определялось процентное содержание фаз льда и грунта. Влажность

минеральных прослоев и агрегатов (W_m) в грунтах с мелкими и частыми ледяными шлирами может быть определена обратным расчетом на основе значений W_{tot} и ρ_d , полученных в результате непосредственного опробования, и I_i , вычисленной по материалам фотодокументации мерзлых пород.

Опыт использования оптико-структурного машинного анализа для изучения криогенного строения излагался Ю.Л. Шуром с соавт. [1989]. Основной акцент в этой работе был сделан на формализацию описания криогенного строения и снижение субъективности оценок.

Количество текстурообразующего льда, содержащегося в мерзлых грунтах, контролируется многими региональными и локальными факторами. В результате для описания формирования текстурообразующего льда в породе указывается большое число различных зависимостей. Если известны зависимости, можно предсказать поведение любой физической системы и ее свойства. Однако различных тенденций и связей в природе огромное множество, поэтому зависимости количества разных видов текстурообразующего льда зачастую скрыты за многофакторностью геосистем. Когда нет функциональной связи между параметрами, а конкретному значению одного параметра соответствует не одно значение, а распределение значений другого параметра, говорят о статистической зависимости. Большинство природных явлений описываются статистическими методами. В рассматриваемом случае, когда льдистость ММП определяется сложным взаимодействием многих природных факторов, применимы статистические методы, в том числе корреляционный и регрессионный анализ.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Изменчивость различных факторов и их влияние на изменчивость льдистости за счет текстурообразующего льда оценивались для ММП Центрально-Якутского региона (см. рис. 1). Большая часть исследуемой территории представляет собой пологонаклонную поверхность террас рек Лены и Вилюя, аллювий которых в значительной части переработан и перекрыт супесчано-суглинистыми покровными отложениями [Гравис, 2005] мощностью от первых метров до 40 м. Здесь широко развиты породы ледового комплекса и аласные отложения, представляющие собой парагенезис различных осадков.

Синкриогенные породы ледового комплекса характеризуются микрошлировыми и тонко-, среднешлировыми криогенными текстурами с размерами минеральных прослоев и агрегатов, не превышающими 1 см (рис. 3). Породы голоценового горизонта подстилают сезонноталый слой [Конченко, 1999]; они промерзали снизу и имеют криогенные текстуры сингенетического типа, в основном линзовидные тонкошлировые, интервал между шлирами превышает таковой для нижележащих пород ледового комплекса.

Среди аласных отложений преобладают таберальные, образовавшиеся в результате протаивания пород ледового комплекса и повторного их промерзания эпигенетическим путем. Криогенные текстуры таберальных отложений, которые в районах исследований характеризуются обычно небольшой мощностью (до 5–7 м), также имеют малые размеры (до 1–2 см) минеральных агрегатов (см. рис. 2), с увеличением глубины ледяная решетка разреживается до 3–10 см. В последнем случае возможен непосредственный отбор проб.

Характеристики влажности и льдистости образцов, для которых выполнены определения по материалам фотодокументации ядра, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Льдистость и влажность образцов мерзлых пород

Породы	W_{tot} , %	W_m , %	I_p , %
Синкриогенные	37–171 (73)	15–75 (39)	1–62 (30)
Эпикриогенные	26–95 (50)	21–59 (34)	6–34 (18)

Примечание к табл. 1, 2. В скобках указано среднее значение.

Таблица 2. Характеристики гранулометрического состава и пластичности супесчано-суглинистых покровных отложений

W_l , %	W_p , %	Количество фракции, %		k , д. ед.*
		алевритовой	глинистой	
18–48 (30)	16–28 (21)	29,3–89,1 (64,7)	2,6–36,9 (21,3)	1,1–14,8 (5,6)

* k – коэффициент, равный отношению количества крупнопылеватых частиц к мелкопылевым.

Литологический состав изучаемых покровных отложений довольно однородный, преобладают супеси и суглинки. Некоторые характеристики гранулометрического состава и пластичности отложений приведены в табл. 2. Алевритовая фракция преобладает во всех глинистых отложениях, но наибольшее ее количество характерно для пород ледового комплекса, а наименьшее – для эпикриогенных аласных отложений. При этом фракция крупной пыли является доминирующей даже в наименее пылеватых породах аласных котловин (рис. 4). Глинистая фракция, напротив, более присуща эпикриогенным аласным отложениям, нежели ледовому комплексу (рис. 5).

Вещественный и гранулометрический состав и условия промерзания являются основными факторами, определяющими льдонакопление в грунтах. Были отобраны образцы ядра из ледового

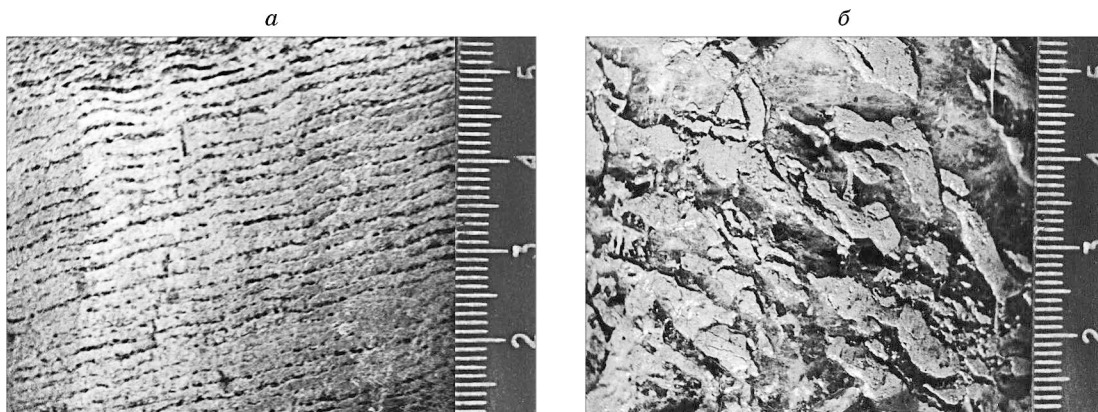


Рис. 3. Криогенные текстуры ледового комплекса:

а – микрошлировые; б – тонко-, среднешлировые.

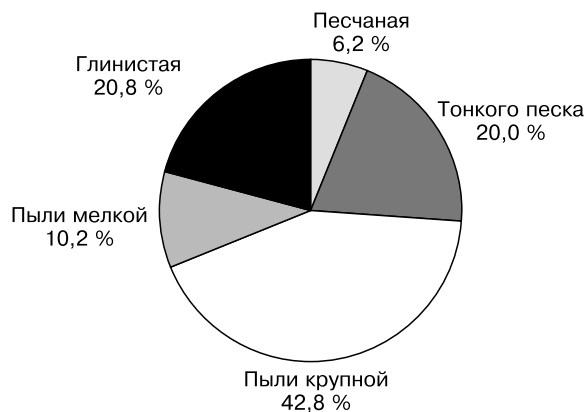


Рис. 4. Среднее содержание различных гранулометрических фракций (%) эпигенетически промерзавших глинистых отложений.

комплекса, отличающиеся значительной изменчивостью в содержании текстурообразующего льда (см. рис. 3,а, б). Изучался минеральный состав этих образцов. В глинистых породах ледового комплекса как с микрошлировыми, так и с тонко-, среднешлировыми криогенными текстурами отмечены кварц, полевой шпат, монтмориллонит, каолинит, слюда, хлорит. Исследования, проведенные во ВСЕГИНГЕО Т.Ф. Голубенко (*устное сообщение*), привели к выводу, что вариации минерального состава граничат с погрешностями определения. Глинистые минералы характеризуются разупорядоченной структурой с размытыми, умеренными пиками на рентгенограммах – признаками беспорядочного переслаивания слоев глинистых минералов. Структурное совершенство глинистых минералов с глубиной возрастает.

Химический состав пород ледового комплекса по результатам опробований, проведенных О.Е. Пономаревой (*устное сообщение*), здесь также довольно однородный – гидрокарбонатно-натриево-магниевый или гидрокарбонатно-магниево-натриевый. Содержание солей в основном не превышает 0,15 %.

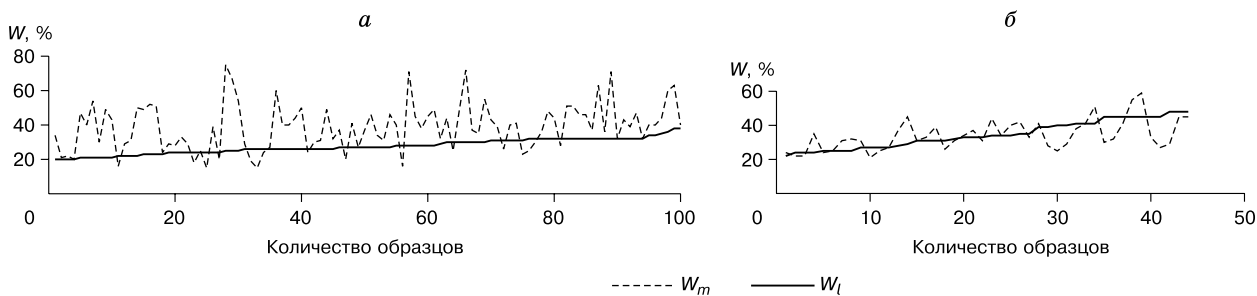


Рис. 6. Влажность минеральных прослоев (W_m) и влажность на границе текучести (W_l) сингенетически (а) и эпигенетически (б) промерзавших пород.

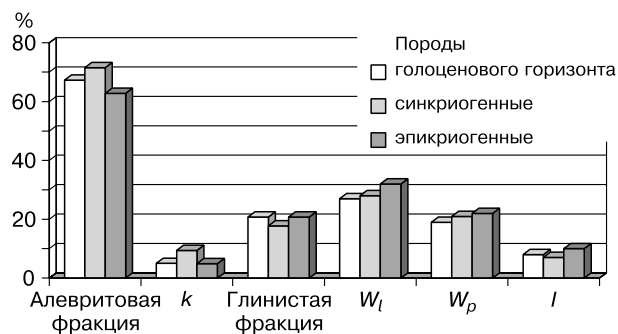


Рис. 5. Характеристики гранулометрического состава и пластичности глинистых покровных отложений.

Исходя из вышеизложенного можно заключить, что различия в льдистости пород ледового комплекса в данном случае не объясняются различиями вещественного состава.

Исследовалось также влияние гранулометрического состава на содержание текстурообразующего льда. Общеизвестно, что количество пленочной влаги, обеспечивающей процесс сегрегации, возрастает в ряду от песчаных грунтов к глинистым, причем наличие пылевой фракции является наиболее благоприятным для указанного процесса. Утверждается, что наибольшее льдонакопление и интенсивное сегрегационное льдовыделение фиксируется обычно в пылеватых грунтах, а при переходе от пылевой фракции к глинистой интенсивность сегрегационного льдовыделения начинает убывать [Ершов, 1979].

Как уже указывалось, значения цементационной льдистости (или W_m) связывали с характеристиками пластичности грунтов: ранее с влажностью грунта на границе раскатывания, а по мере появления новых данных еще и с влажностью на границе текучести. Так, Т.Н. Жесткова [1982] отмечала, что одним из основных признаков криогенного строения ММП, промерзающих по сингенетическому типу, является высокая влажность минеральных агрегатов, превышающая влажность верхнего

предела текучести, тогда как для ММП, промерзающих по эпигенетическому типу, эта влажность не превышает влажности верхнего предела текучести.

Нами исследовалось влияние различных характеристик гранулометрического состава и пластичности грунтов на W_m и I_i :

- процентного содержания различных фракций: тонкого песка, крупной пыли, алевроитовой фракции (сумме фракций тонкого песка и крупной пыли), мелкой пыли, суммы мелкой и крупной пыли, глинистой фракции;

- коэффициента, равного отношению количества крупнопылеватых частиц к мелкопылеватым частицам (k , д. ед.); указанный коэффициент используется для характеристики пылеватых пород;

- влажности на границе раскатывания (W_p), влажности на границе текучести (W_l) и вычисленного по указанным показателям числа пластичности (I_p).

Результаты определений W_m в сравнении со значениями W_l приведены на рис. 6.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Корреляционный анализ позволяет установить наличие связи между признаками и оценить степень тесноты этой связи. Однако коэффициенты корреляции, по которым обычно судят о степени тесноты связи, могут служить этой цели в случае, когда признаки в генеральной совокупности имеют нормальное или близкое к нормальному распределение. То, что нормальное распределение является широко распространенной моделью эмпирических распределений, наблюдаемых при изучении геологических объектов, неоднократно отмечалось Д.А. Родионовым [1968, 1981]. Он (вслед за Н.К. Разумовским) подчеркивал, что зачастую отмечается логнормальный закон распределения, когда нормальным законом описываются распределения не самих значений изучаемого признака, а распределение логарифмов этих значений, либо имеются другие распределения, связанные с логнормальным, когда изучаемая случайная величина представляет собой сумму или разность константы и логнормально распределенной случайной величины. Так, Д.С. Дроздов и А.С. Ширшикова [1981], оценивая распределение взвешенных значений суммарной влажности ММП полуостровов Ямал и Тазовский, отметили, что распределение имеет положительные асимметрию и эксцесс. Этот факт они объяснили наложением двух независимых распределений: распределения максимальной молекулярной влагоемкости, которую в вычислениях можно принять за константу, и распределения избыточной влаги. Используя статистические критерии, Д.С. Дроздов и А.С. Ширшикова показали, что количество избыточной влаги имеет логнормальный закон распределения.

С помощью критерия согласия Пирсона χ^2 была проведена количественная оценка различий эмпирических и теоретических частот, выравненных исходя из гипотезы о нормальном законе распределения W_{tot} и W_m . Проверка обоснованности выбранной аппроксимации необходима, поскольку в литературе прочно утвердилось мнение о том, что влажность минеральных прослоев и агрегатов меняется несущественно и близка к влажности грунта у нижнего предела пластичности. Фактические значения χ^2 как для сингенетически, так и для эпигенетически промерзавших ММП меньше критических. В соответствии с указанным критерием расхождения между эмпирическими и теоретическими частотами можно считать случайными при уровне значимости 0,05 или 0,02 (в случае отбраковки 4 % эмпирических данных и без отбраковки крайних значений). В обоих случаях гипотеза о нормальном законе распределения в соответствии с критерием Пирсона приемлема.

Для выявления наиболее значимых характеристик (факторов) гранулометрического состава и пластичности ММП, определяющих значения шлирового льда и льда-цемента, с помощью пакета Excel были построены матрицы выборочных коэффициентов множественной корреляции (r). Матрица выборочных коэффициентов корреляции анализировалась на наличие мультиколлинеарности, т. е. существенной связи факторных признаков, характеризующих гранулометрический состав грунтов, между собой.

На основе вычисленных коэффициентов парной корреляции выявлены наиболее значимые факторы, определяющие количество льда-цемента (W_m) и сегрегационного льда (I_i).

Проведенный корреляционный анализ показал, что независимо от типа промерзания связь между W_m и W_{tot} и между I_i и W_{tot} отмечается как в сингенетически, так и в эпигенетически промерзавших породах (рис. 7). При этом для эпигенетически промерзавших пород связь между указанными парами показателей сильнее и качественно может быть оценена как *достаточно тесная* (коэффициент корреляции $r = 0,7-0,8$), для сингенетических пород она слабее и оценивается как *заметная* ($r = 0,6$). В обоих случаях связь является доказанной, по t -критерию Стьюдента, с вероятностью не менее 95 %.

Т.Н. Жесткова [1982] отмечала, что на величину влажности минеральных прослоев и агрегатов оказывают влияние те же факторы и условия, которые в конечном счете обуславливают степень льдонасыщения грунта и распределение льда. Она заметила, что лед-цемент минеральных прослоев в грунтах со слоистой и сетчатой криогенными текстурами присутствует как в виде отдельных кристаллов, так и в виде цепочек, что представляет собой стадию перестройки льда-цемента в ледяной

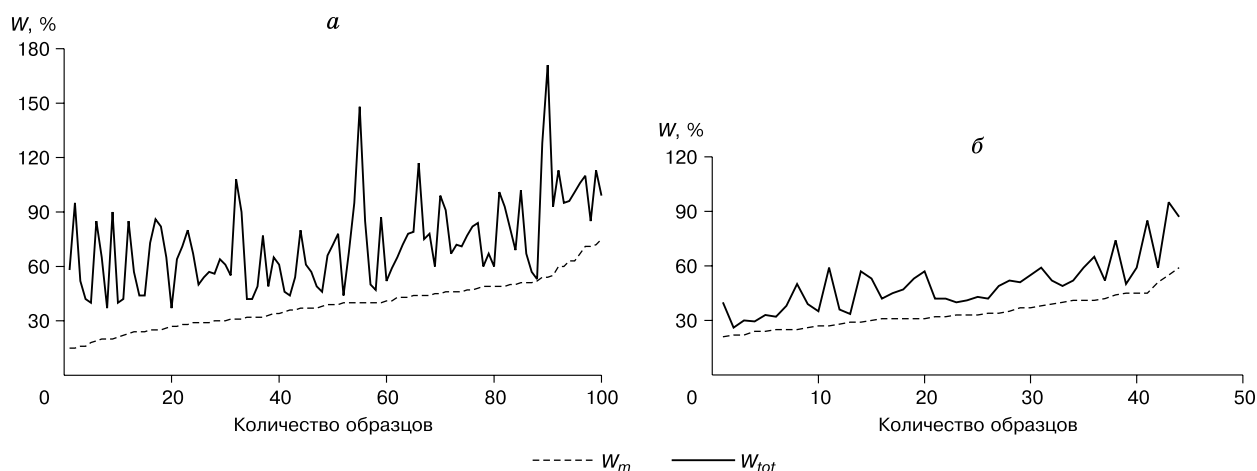


Рис. 7. Влажность минеральных прослоев (W_m) и суммарная влажность (W_{tot}) сингенетически (а) и эпигенетически (б) промерзавших пород.

шпир. На основе этих исследований Т.Н. Жесткова заключает, что отличие ледяного шпиря от льда-цемента является только количественным, а не качественным. Данные по абсолютным значениям W_m позволили ей сделать вывод, что в сингенетических отложениях большей суммарной влажности соответствуют и большие значения W_m , тогда как в эпигенетических породах, наоборот, увеличение суммарной влажности обуславливает уменьшение W_m . Полученные расхождения наших результатов и выводов Т.Н. Жестковой об отсутствии прямой связи между W_m и W_{tot} или даже о наличии обратной связи для эпикриогенных пород можно объяснить тем, что ею исследовались эпикриогенные существенно менее льдистые толщи, тогда как в данной работе изучались гораздо более льдонасыщенные грунты верхнего горизонта ММП.

Для эпикриогенных пород отмечено более значительное влияние гранулометрического состава грунтов на содержание льда-цемента и сегрегационного льда, чем для сингенетически промерзавших пород. Так, для эпигенетически промерзавших пород вычисленные коэффициенты корреляции между I_i и гранулометрическими характеристиками грунтов либо между W_m и теми же характеристиками выше, чем для сингенетических, где связь может не проявляться вовсе ($r < 0,5$ для эпигенетически и $r = 0-0,3$ для сингенетически промерзавших пород).

Выполненный анализ приводит к выводу о том, что для грунтов верхнего горизонта ММП, характеризующихся высокой льдистостью, между I_i и W_{tot} и между W_m и W_{tot} существует связь, обусловленная главным образом степенью влияния на эти показатели существующих условий промерзания, в первую очередь влажностных. При одинако-

вых фациальных условиях промерзания в грунтах сходного вещественного и гранулометрического состава закономерности формирования как сегрегационного льда, так и льда-цемента схожи. При эпигенетическом типе промерзания гранулометрический состав отложений мог оказать более существенное влияние на процесс льдовыделения, так как промерзание происходило в условиях относительно ограниченного влагосодержания.

Из матриц коэффициентов парной корреляции следует, что среди проанализированных показателей, характеризующих свойства грунтов, выделяются две группы факторов, влияющих на величины W_m и I_i . Первая группа – характеристики пластичности (W_b , W_p и I_p), вторая – процентное содержание фракций (алевритовой и глинистой) и степень лессовидности пород, характеризуемая коэффициентом k .

Для исключения мультиколлинеарности из факторов, связанных между собой, необходимо выбрать наиболее значимый, отбросив прочие. Из обеих групп факторов, характеризующих состав грунтов, наиболее значимыми по степени влияния на количество льда-цемента являются W_l и затем процентное содержание алевритовой фракции. Здесь необходимо отметить, что в соответствии с критерием Пирсона значимые различия между эмпирическими значениями W_l и теоретическими (распределенными по нормальному закону) отсутствуют при уровне значимости 0,05, но эмпирическое распределение имеет положительную асимметрию.

Регрессионный анализ. Проведенный корреляционный анализ позволяет сделать вывод о наличии статистически доказанной связи между W_m и W_{tot} . На следующем этапе с помощью регресси-

онного анализа можно определить количественную зависимость между указанными показателями и оценить приемлемость полученной регрессионной модели.

Качество моделей регрессии. В результате расчетов методом наименьших квадратов получены модели множественной регрессии. Качество полученных моделей оценивается по их адекватности и точности.

Для оценки *адекватности* модели регрессии используется критерий Фишера. С этой целью рассчитывается F -отношение по формуле

$$F = MS/SS,$$

где

$$MS = \left[\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_{cp})^2 \right] / K;$$

$$SS = \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] / (n - K - 1);$$

y_i – эмпирическое значение показателя; \hat{y}_i – его теоретическое значение; y_{cp} – среднее, равное сумме эмпирических значений, деленных на объем выборки; n – объем выборки; K – число независимых переменных (факторов).

Исчисленное F -отношение сравнивается с табличным распределением Фишера с заданной вероятностью. Если F -отношение превышает табличное значение, уравнение регрессии признается значимым. В противном случае гипотеза об адекватности модели не подтверждается.

Оценка *точности* модели была проведена с помощью трех основных количественных характеристик (условные обозначения приведены выше).

1. Стандартная ошибка оценки:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - K - 1}}.$$

2. Средняя относительная ошибка модели, %:

$$\bar{E}_{отн} = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (|y_i - \hat{y}_i|) / y_i \cdot 100 \right].$$

3. Коэффициент детерминации, %:

$$R^2 = r^2 \cdot 100.$$

Для эпигенетически промерзавших пород линейная модель регрессии с двумя независимыми переменными имеет вид

$$W_m = 8,7 + 0,46W_{tot} + 0,07W_l.$$

Характеристики, позволяющие оценить качество модели, приведены в табл. 3. Расчетное F -отношение многократно превышает табличное, модель признается адекватной.

Для эпигенетически промерзавших пород изменение значений W_m на 70 % объясняется вариациями учтенных в модели факторов (множествен-

Таблица 3. Адекватность и точность модели W_m

Характеристики	Породы	
	эпикриогенные	синкриогенные
F -отношение, расчетное	42,5	39,5
F -отношение, табличное, уровень значимости $\alpha = 0,05$	3,2	3,1
Стандартная ошибка оценки	5,2	11,8
Средняя относительная ошибка модели, %	10,9	26
Коэффициент детерминации, %	70	44

ный коэффициент корреляции $R = 0,83$). Средняя относительная ошибка модели свидетельствует о довольно высокой точности. Учет фактора, характеризующего состав отложений (W_l), незначительно повышает качество модели; при этом средняя относительная ошибка последней уменьшается лишь на десятые доли процента.

Для сингенетически промерзавших пород линейная модель регрессии с двумя независимыми переменными имеет вид

$$W_m = -3,3 + 0,33W_{tot} + 0,68W_r.$$

Характеристики, позволяющие оценить качество модели, приведены в табл. 3. Расчетное F -отношение многократно превышает табличное, модель признается адекватной.

Для сингенетически промерзавших пород изменение значений W_m всего лишь на 44 % объясняется вариациями учтенных в модели факторов (множественный коэффициент корреляции $R = 0,66$). Средняя относительная ошибка модели недопустимо высока (26 %), поэтому использовать полученную модель для целей прогнозирования значений W_m неоправданно. Учет фактора, характеризующего состав отложений (W_l), незначительно повысил качество модели; при этом средняя относительная ошибка последней уменьшилась на несколько процентов.

ВЫВОДЫ

1. В сингенетически промерзавших породах и в верхнем горизонте эпигенетически промерзавших пород, криогенные текстуры которых характеризуются малым размером минеральных прослоев и агрегатов, определены величины I_i и W_m (W_m не равна какому-либо постоянному значению и существенно превышает W_l).

2. Проведенный корреляционный анализ показал, что для указанных видов ММП существует статистически доказанная связь между I_i и W_{tot} и между W_m и W_{tot} . При этом для эпигенетически промерзавших пород связь между указанными па-

рами показателей более тесная (коэффициент корреляции $r = 0,7-0,8$); для сингенетических пород она слабее ($r = 0,6$).

3. Для верхнего горизонта ММП, характеризующегося криогенными текстурами с мелкими и частыми ледяными шлирами, полученные модели регрессии дают возможность оценить льдистость за счет льда-цемента по значениям W_m . Для эпикриогенных пород указанного горизонта полученная модель регрессии пригодна для аппроксимации показателя W_m , для синкриогенных пород модель может использоваться для предварительного анализа.

4. Зависимости количества шлирового льда и льда-цемента (W_m) от гранулометрических характеристик и характеристик пластичности слабые. Основное влияние на количество текстурообразующего льда оказывали, по-видимому, фациальные условия промерзания – температурные и влажностные; при этом формирование сегрегационного льда и льда-цемента подчинялось общим закономерностям: чем больше содержание шлирового льда в ММП, тем выше содержание в них льда-цемента.

Литература

- Богданов К.М., Яновский К.А., Козлов Ю.Г. и др.** Оптико-структурный машинный анализ изображений. М., Машиностроение, 1984, 277 с.
- Впюрин Б.И.** Подземные льды СССР. М., Наука, 1975, 214 с.
- Гравис Г.Ф.** Особенности эрозионно-аккумулятивной деятельности рек на Центрально-Якутской равнине в течение позднего плейстоцена // Квартер–2005: Материалы IV Всерос. совещания по изучению четвертичного периода. Сыктывкар, Геопринт, 2005, с. 94–95.
- Дроздов Д.С., Ширишкова А.С.** Учет представительности инженерно-геокриологического опробования при расчете обобщенных характеристик свойств // Исследование состава, строения и свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих пород с целью наиболее рационального проектирования и строительства: Тез. докл. школы-семинара. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, с. 44–46.
- Ершов Э.Д.** Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979, 213 с.
- Жесткова Т.Н.** Формирование криогенного строения грунтов. М., Наука, 1982, 216 с.
- Клишевич В.В.** К определению льдистости грунта за счет ледяных включений // Проблемы инженерно-геологических изысканий в криолитозоне: Тез. докл. науч.-практ. конф. Магадан, Колымское газ. изд-во, 1989, с. 59–60.
- Конченко Л.А.** Определение разных видов льдистости в грунтах с мелкими ледяными шлирами // Результаты инженерно-геологических и геокриологических исследований. М., 1988. Деп. в ВИНТИ, № 1978-В88, с. 108–119.
- Конченко Л.А.** Особенности пространственных изменений увеличения мощности сезонного слоя при потеплении климата (по криолитологическим данным) // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 4, с. 32–38.
- Мельников Е.С., Кондратьева К.А.** Циркумарктическая карта многолетнемерзлых пород и грунтовых льдов. М-б 1:10 000 000 // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 4, с. 58–61.
- Методические** рекомендации по гидрогеологическому и геокриологическому изучению верхних горизонтов пород при разведке месторождений нефти и газа в криолитозоне. М., ВСЕГИНГЕО, 1989, 87 с.
- Родионов Д.А.** Статистические методы разграничения геологических объектов по комплексу признаков. М., Недра, 1968, 160 с.
- Родионов Д.А.** Статистические решения в геологии. М., Недра, 1981, 230 с.
- Салтыков С.А.** Стереометрическая металлография. М., Металлургия, 1976, 272 с.
- Шур Ю.Л.** Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1988, 212 с.
- Шур Ю.Л., Павлов А.В., Максимов В.В.** Использование фотодокументации для количественной характеристики криогенного строения мерзлых грунтов // Проблемы инженерно-геологических изысканий в криолитозоне: Тез. докл. науч.-практ. конф. Магадан, Колымское газ. изд-во, 1989, с. 151–152.

*Поступила в редакцию
3 ноября 2005 г.*