



СТЕБЕЛЬКОВЫЙ ЛЕД ВУЛКАНОГЕННЫХ ГРУНТОВ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТКИ)

STALK-LIKE ICE OF VOLCANOGENIC SOILS (BY THE EXAMPLE OF KAMCHATKA)

ТАРАКАНОВ А.И.

Руководитель ООО «Изыскатель», г. Петропавловск-Камчатский,
iziskaniya@mail.ru

БЫКАСОВ В.Е.

Научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, valery@bykasov.com

TARAKANOV A.I.

Head of the «Izyskatel'» LLC, Petropavlovsk-Kamchatsky,
iziskaniya@mail.ru

BYKASOV V.E.

Researcher of the Institute of Volcanology and Seismology of the FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky, valery@bykasov.com

Ключевые слова:

стебельковый лед; почвенно-пирокластический чехол;
вулканогенные грунты; солифлюкция; дезинтеграция.

Key words:

stalk-like ice; soil-pyroclastic cover; volcanogenic soils;
solifluction; desintegration.

Аннотация

Показывается, что процессы, сопровождающие образование и разрушение стебелькового льда, являются одними из ведущих факторов происхождения таких инженерно-геологических особенностей вулканогенных грунтов, как их способность к сильному размоканию, чрезмерному пучению, течению при солифлюкции, возможность интенсивного перехода содержащейся в них капиллярной и пленочной воды в различные агрегатные состояния и, отсюда, способность таких грунтов к повышенной дезинтеграции. Делается вывод о том, что изучение стебелькового льда и процессов, связанных с его формированием и таянием, представляет большой практический интерес в связи с широким вовлечением ареалов распространения почвенно-пирокластических чехлов в сферу хозяйственного освоения и создает предпосылки для оптимизации работы строительной индустрии в областях современного активного вулканизма Камчатки, Курильских и Командорских островов и других регионов Земли с распространением аналогичных вулканогенных грунтов.

Abstract

The paper shows that the processes accompanying formation and destruction of stalk-like ice are among the main factors of origin of such engineering-geological features of volcanogenic soils as their capability of intensive soaking, excessive heaving, flow under influence of solifluction, possibility of intensive transition into various aggregate states of the capillary and film water in them, and, therefore, capability of increased desintegration of such soils. The authors conclude that study of stalk-like ice and processes associated with its formation and thawing is of great practical interest in connection with wide involvement of areas of soil-pyroclastic covers into the sphere of economic development and promotes optimization of the construction industry work in areas of modern volcanic activity in Kamchatka, Kuril and Commander Islands and other regions of the Earth with occurrence of similar volcanogenic soils.

Введение

Под стебельковым льдом (СЛ) понимаются криогенные образования (рис. 1, 2), формирующиеся на поверхности обнаженных грунтов в результате сращивания ледяных стебельков (ледяных столбиков) длиной до 12 см и толщиной до 0,5 см, вырастающих перпендикулярно к замерзающей поверхности [1]. Непременным условием образования СЛ является рыхлость грунтов, их повышенная влагоемкость и, главное, большая скорость подтягивания влаги к границе «грунт — воздух». На Камчатке такими условиями в наибольшей степени обладают так называемые почвенно-пирокластические чехлы (ППЧ) — специфичные вулканогенные образования, представляющие собой покровы рыхлого материала из чередующихся слоев вулканического пепла и погребенных почвенных горизонтов [4, 6].

Сформированные почти исключительно в голоцене, названные образования перекрывают разнообразные и разновозрастные комплексы пород — современные лавовые потоки и покровы, морены верхнеплейстоценовых ледников, поверхности четвертичных аллювиальных, делювиальных и морских отложений, неогеновую кору выветривания туфоконгломератов и даже верхнемеловые сланцы [10].

Мощность почвенно-пирокластического чехла зависит от характера (преимущественно эксплозивного) и интенсивности вулканических извержений, удаленности от центров извержения, а также от силы и направленности господствующих ветров. Поэтому на подножиях вулканических построек толщина ППЧ может достигать 6–8 м и более, а затем она по мере удаления от центров извержения уменьшается до 50–60 см и менее.

В настоящее время значительные участки распространения почвенно-пирокластических чехлов заняты городскими агломерациями и сельскими поселениями. Поэтому изучение стебелькового льда и процессов, протекающих при его образовании и таянии,



имеет большое практическое значение для установления инженерно-геологических характеристик почв и подпочвенных грунтов застраиваемых территорий Камчатки.

Всеми этими обстоятельствами и определяется цель данной работы, которая состоит в рассмотрении механизма образования стебелькового льда и в детальном описании физических процессов, происходящих при таянии ледяных кристаллов, на основе натуральных наблюдений и специальных экспериментов, проведенных авторами на территории г. Петропавловска-Камчатского и в его окрестностях.

Данные натуральных наблюдений

Итак, что же собой представляет почвенно-пирокластический чехол? Визуально это рыхлая макропористая горная порода буровато-коричневого или охристого цвета с четко выраженными прослоями вулканического пепла и погребенных органических горизонтов (рис. 3). В соответствии с инженерно-геологической классификацией по ГОСТ 25100 грунты ППЧ относятся к супесям, изредка к пылеватым пескам и совсем редко к суглинкам. При этом практически вся толща ППЧ, особенно в верхних частях разреза, обогащена многочисленными органическими остатками, содержание которых может достигать нескольких десятков процентов (табл. 1).

Вследствие высокой пористости, низкой плотности и высокой влажности почвенно-пирокластические отложения способны к высокому уплотнению под нагрузками, размоканию, а при промерзании склонны к сильному пучению. По классификации они относятся к макропористым сильносжимаемым чрезмерно пучинистым грунтам. В связи с этим они характеризуются крайней неустойчивостью по отношению к процессам денудации. В целом ППЧ характеризуются низкой прочностью, а некоторые их разновидности относятся к просадочным разновидностям грунтов.

В минералогическом смысле почвенно-пирокластические отложения представляют собой продукты голоценовых вулканических извержений с примесью эолового и почвенного материала. Наиболее широко распространены пеплы кислого и реже основного состава. В пеплах преобладает вулканическое стекло, то есть затвердевший нераскристаллизованный магматический расплав. В незначительных количествах присутствуют плагиоклазы и темноцветные минералы. В результате диагенеза стекло подвергается девитрификации (расстеклованию) и превращается в глинистые минералы, цеолиты и кремнезем [2, 7].

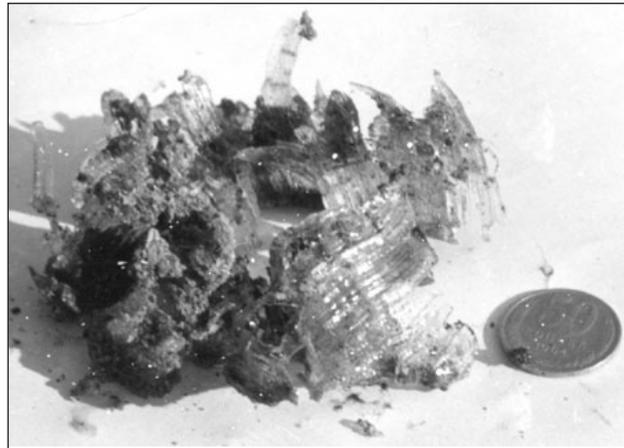


Рис. 1. Стебельковый лед. В основании — его «корни» в макропористой супеси

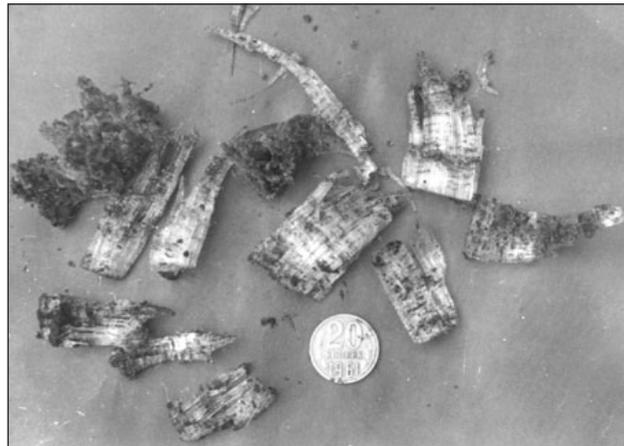


Рис. 2. Стебельковый лед в отделенных от массива пластинах. Темные вкрапления и комочки — включения грунта



Рис. 3. Типичный почвенно-пирокластический чехол мощностью 4 м, состоящий из чередующихся слоев вулканического пепла и почвы (г. Северо-Курильск, подножие вулкана Эбеко)

Таблица 1

Водно-физические свойства пылеватых грунтов почвенно-пирокластического чехла									
Грунты	Группа вулканов	Содержание частиц, %, диаметром, мм			Коэффициент пористости, д. ед.	Естественная влажность, д. ед.	Плотность, г/см ³	Степень влажности, д. ед.	Потеря массы при прокалив., д. ед.
		2÷0,1	0,1÷0,001	<0,001					
Супесь, суглинок	Авачинская	13÷67	12÷80	4÷11	1,1÷4,4	0,24÷1,47	1,1÷1,6	0,5÷0,8	до 0,24
Песок пылеватый	Ключевская	27÷42	54÷71		0,7÷3,3	0,21÷0,87	1,1÷1,9	0,5÷1,0	до 0,05

Гранулометрический состав пеплов довольно разнообразен. Они могут состоять из крупных песчаных (2–0,1 мм), пылеватых (0,01–0,002 мм), глинистых (<0,002 мм) частиц. Частицы вулканического пепла имеют неправильную форму и шероховатую поверхность. Обладая высокой суммарной удельной поверхностью (отношение суммарной площади поверхности к массе частицы), такие грунты способны связывать большое количество влаги в форме капиллярной и пленочной воды (см. табл. 1). Значительную роль в накоплении влаги в ППЧ играет материал погребенных органогенных горизонтов.

Одним из важнейших условий образования стебелькового льда в почвенно-пирокластических грунтах является специфичность их физико-механических свойств, то есть большая рыхлость и высокая пористость. Отсутствие растительного покрова и сомкнутой дернины на этих грунтах — еще одно условие, необходимое для образования СЛ. Вот отчего наиболее интенсивно стебельковый лед развивается на строительных площадках, на разного рода свежих отсыпках и откосах, на грунтовых дорогах, а также на днищах и стенках котлованов и траншей. Довольно часто СЛ встречается также над подземными коммуникациями (канализацией, водопроводом) и вдоль незамерзающих ручьев, в том числе термального происхождения (например, в бассейне реки Паратунка).

Третье неперменное условие формирования и развития стебелькового льда заключается в установлении незначительных отрицательных температур наружного воздуха или режима, характеризующегося переходами от замерзания грунтов к их оттаиванию и обратно к промерзанию. Причем наиболее интенсивно образование СЛ происходит при температурах приземного слоя воздуха в ночное время от 0 до минус 4 °С.

Формирование стебельков льда обусловлено тем, что отрицательные температуры вызывают миграцию пленочной и капиллярной воды в грунтах к фронту воздействия наружных температур воздуха, где она и замерзает в виде «ледяных стеблей». Причем натурные наблюдения показывают, что в отдельные моменты скорость роста кристаллов льда может составлять 5–7 мм/ч.

Обычно формирующиеся стебельки льда ориентируются перпендикулярно поверхности грунта. Но иногда под тяжестью заключенных в них грунтовых частиц (или на крутых склонах и откосах) они могут довольно сильно изгибаться. Как правило, слой СЛ перекрывается плащом приподнятого грунта, так как кристаллы льда способны приподнимать камни диаметром до 5 см. Будучи обогащенным мелкоземом и насыщенным многочисленными воздушными включениями, стебельковый лед отличается хорошими теплоизоляционными свойствами, что заметно препятствует дальнейшему промерзанию расположенных ниже слоев грунта. Промерзанию ППЧ препятствует также приток теплой пленочной воды к фронту охлаждения из нижних слоев. По этим причинам грунт на границе с «корнями» растущих кристаллов льда всегда талый, с температурой, близкой к 0 °С.

Толщина отдельных стебельков льда обычно мала — от долей миллиметра до 1,5–2,0 мм. Внешне

они имеют вид призматических (игольчатых) отдельностей длиной от 5 до 20 см (см. рис. 2). В поперечном разрезе стебельки имеют форму неправильных многоугольников с 5–6 гранями. Нередко можно наблюдать многоярусное наслоение СЛ с довольно четкими границами между отдельными слоями. При этом интервалы между границами этих слоев обычно уменьшаются книзу. Общая мощность такого многоярусного стебелькового льда может достигать 30–40 см и более.

При определенных соотношениях отрицательных температур, видов грунтов, их влагоемкости и интенсивности подтока влаги образование стебельков может происходить довольно длительное время. Препятствует процессу формирования СЛ быстрое и сильное охлаждение, так как в этом случае происходит образование обычной криогенной структуры сезонно-мерзлого слоя. И наоборот, частые и длительные по времени колебания наружных температур в районе 0 °С способствуют слабому перемещению фронта нулевых температур на более низкие уровни грунта и подсасыванию пленочной и капиллярной воды со все более и более с глубоких слоев. Поэтому самыми благоприятными периодами для образования стебелькового льда являются поздняя осень и ранняя весна: именно в эти периоды происходят наиболее частые колебания температур возле точки замерзания. При этом характерно многократное образование СЛ на одном и том же месте, поскольку ночные заморозки приводят к образованию стебельков льда, а дневные оттепели — к их таянию и полному исчезновению.

Таяние стебелькового льда может происходить как сверху вниз по разрезу, так и снизу вверх и, кроме того, одновременно и сверху, и снизу. Поверхностное таяние СЛ обычно сопровождается накоплением переувлажненного мелкозема. Высвобождающаяся в ходе таяния вода приводит к сильному разжижению грунтов, которые по этой причине способны стекать даже при самых малых (порядка 2–3°) уклонах поверхности. На крутых склонах, особенно при таянии СЛ снизу, стебельки колониями отделяются от грунтов и сваливаются вниз. Интересно, что на открытых местах стебельковый лед в результате сублимации быстро разрушается даже при отрицательных температурах воздуха.

Интерпретация материалов натурных наблюдений и экспериментальных данных

Изучение стебелькового льда и процессов, связанных с его образованием и разрушением, представляет несомненный практический интерес, так как понимание их природы позволяет более правильно объяснять такие важные инженерно-геологические особенности вулканогенных поверхностных грунтов, как их феноменальная способность к сильному морозному пучению и формирование солифлюкционных суспензионных потоков. Это, в свою очередь, позволяет разработать надежные способы защиты зданий и сооружений от этих неблагоприятных геологических процессов на уже освоенных и вновь осваиваемых территориях в районах современного вулканизма.

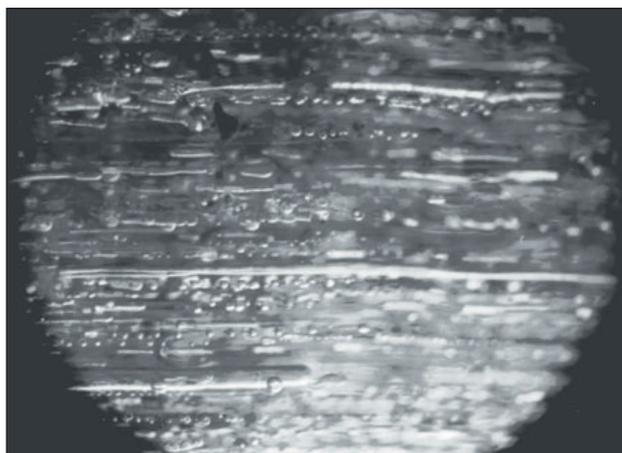


Рис. 4. Структура стебелькового льда под бинокляром. Хорошо видно линейное распределение пузырьков воздуха и трубочек

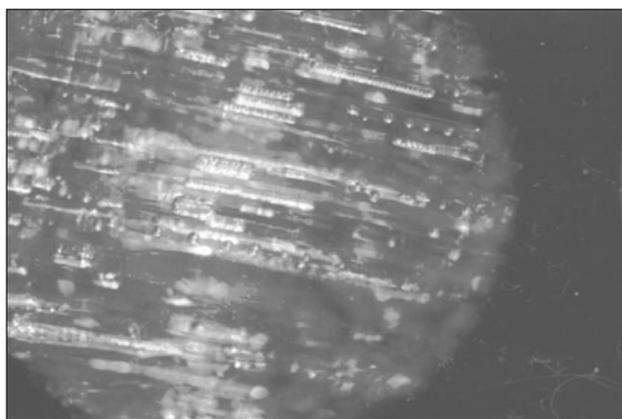


Рис. 5. Микроструктура стебелькового льда с воздушными включениями и частицами грунта

В связи с этим первостепенное значение приобретает знание процессов физических преобразований, происходящих в СЛ в моменты «роста» и таяния самих стебельков. С этой целью авторами были проведены натурные наблюдения с применением бинокляра. Было установлено, что «структурный каркас» СЛ сложен сросшимися игольчатыми призмами льда, содержащими в центральной части множество разнообразных по размеру и строению пузырьков воздуха. Воздушные включения оказались наиболее характерной особенностью строения стебелькового льда. Причем независимо от формы все эти включения располагаются вдоль центральной части стебельков (рис. 4). Что касается формы пузырьков, то чаще всего это тончайшие трубочки, расположенные цепочкой друг за другом. Впрочем, достаточно часто трубочки ориентируются не строго вдоль продольной оси стебельков, а под некоторым ($3-6^\circ$) углом к ней. Длина отдельных трубочек составляет несколько миллиметров, но иногда может достигать 2,0–2,5 см (рис. 5–8). Их поперечный размер обычно варьирует в интервале 0,01–0,10 мм, хотя изредка достигает 0,2 мм.

Трубочки не всегда имеют простое строение. Встречаются трубочки с утолщениями как на одном конце («колбочки»), так и на обоих («гантели»), а также изогнутые, с изменяющимся диаметром, совмещенные с округлыми воздушными включениями. Внутренняя их поверхность, как правило, шероховатая, что отчетливо видно под бинокляром (см. рис. 6).

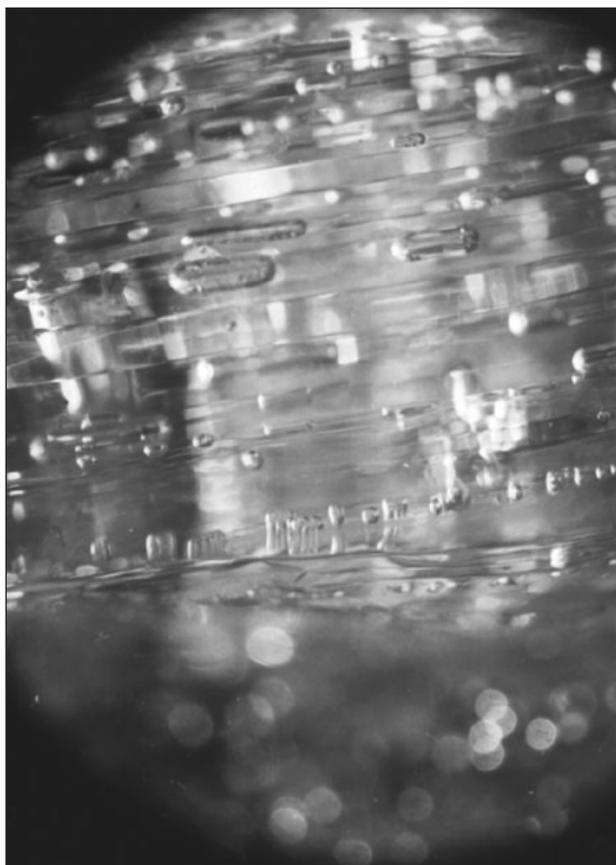


Рис. 6. Укрупненный вариант структуры стебелькового льда, насыщенного пузырьками воздуха. Также хорошо видны продольные каналы, проплавленные во льду

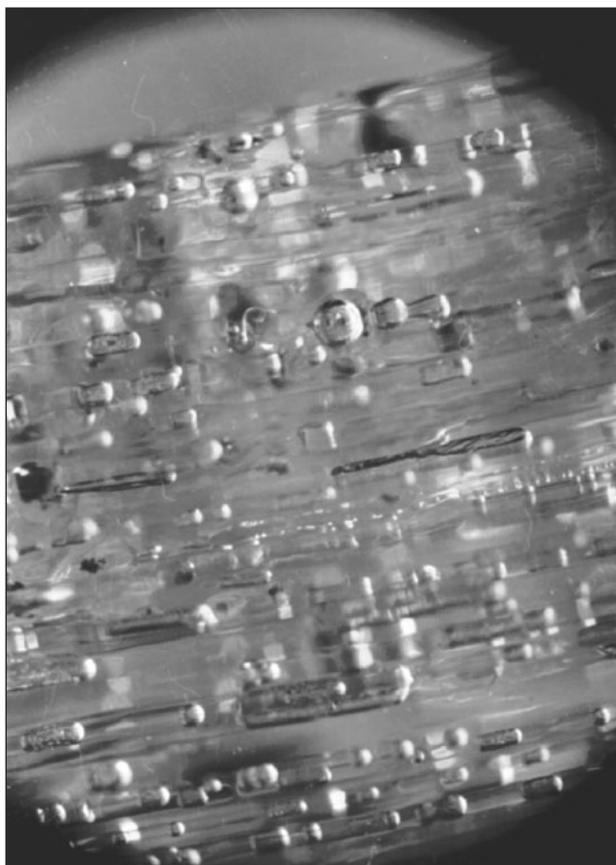


Рис. 7. Структура стебелькового льда. Темные включения — частицы грунта; светлые тона — лед; по продольным проплавленным каналам — воздушные трубочки и «шарики»

Помимо трубочек в стебельковом льду широко распространены пузырьки воздуха, имеющие геометрически правильную шаровидную форму. Расположены такие шарики также линейно по продольной оси стебелька, чередуясь друг с другом и с трубочками (см. рис. 4). Диаметр таких шариков, как и трубочек, может быть меньше диаметра острия иглы или человеческого волоса.

Возникновение пузырьков воздуха в СЛ обусловлено механизмом кристаллообразования льда при переходе воды в иное фазовое состояние (из жидкого в твердое). При таянии пузырьки воздуха не «схлопываются», как это наблюдается в некоторых случаях при кавитации в воде, а происходит их массовое всплытие и высвобождение. Если пузырьки всплывают в разжиженной суспензии из грунта и воды при таянии стебельков, то они играют роль маленьких «пружинок», обеспечивающих понижение вязкости этой суспензии и ее высокую подвижность (текучесть) при движении по подстилающей поверхности. Авторы предлагают называть механизм возникновения пузырьков воздуха в СЛ криогенной кавитацией. Аналогичные процессы протекают и в ледяных образованиях сезонно-промерзающих грунтов вне связи со стебельковым льдом. Авторы полагают, что образование пузырьков воздуха в грунтах при сезонном промерзании ответственно за морозное пучение грунтов по аналогии с тем, как происходит увеличение объема воды при ее переходе в лед.

Неотъемлемыми для стебельков льда компонентами являются частицы почвенно-пирокластического

материала, впаянные в лед или же сопряженные с воздушными пузырьками (см. рис. 8). При этом для СЛ характерна неравномерная по всей массе ледяных кристаллов насыщенность стебельков минеральным материалом, а также явно выраженная поперечная зональность в распределении грунтовых частиц по ледяному горизонту (см. рис. 2). Скорее всего, данные особенности обуславливаются неравномерностью температурного воздействия на грунты в течение суток и, отсюда, различной интенсивностью подтока влаги к фронту промерзания, что и приводит либо к усилению, либо к ослаблению скорости роста стебелькового льда.

Очень интересен процесс таяния СЛ, наиболее полно наблюдаемый при 100-кратном увеличении. Первые признаки таяния стебельков обнаруживаются по едва заметному движению указанных выше воздушных включений, а также по оплавлению граней самих стебельков. Основными центрами первоначального плавления льда в стебельковых сростках являются частицы впаянного в лед грунта и, опять же, воздушные пузырьки. При этом вокруг и тех, и других образуются водяные «рубашки», которые разрастаются преимущественно вдоль стебельков, и таким образом формируются центральные проплавленные каналы, содержащие пузырьки воздуха в форме шариков и трубочек, а также мельчайшие частицы грунта. При этом наружные оболочки СЛ могут сохраняться более длительное время, чем внутренние проплавленные каналы кристаллов льда. То есть, очевидно, температура плавления у тех и других несколько различна.

Воздушные включения весьма активно реагируют на тепловое воздействие, что выражается в делении трубочек на части, в их продольном перемещении вдоль стебельков, в том числе пульсирующими толчками. Неожиданным явлением оказалось преобразование отдельных пузырьков в уплощенные цилиндрики, которые к тому же, будучи заключенными в ледяную камеру, частично заполненную водой, совершают довольно быстрые вращательные движения. Вероятно, вращение таких уплощенных пузырьков и их беспорядочные движения обусловлены тем, что они очень сильно реагируют на изменения геометрии внутреннего пространства ледяных каналов СЛ. Все эти явления способствуют повышению теплообмена между воздухом, заключенным в пузырьке, минеральными включениями грунта и льдом, в результате чего происходит постепенное плавление льда и расширение ледяной камеры с общей тенденцией к увеличению ее размеров.

Наружные части стебельков, то есть их ледяные грани, тают с заметным опозданием по сравнению с внутренними и способны сохранять свою форму до окончательного проплавления кристаллов льда и образования в них сквозных продольных каналов на всю длину. В результате такого неодновременного таяния в СЛ образуется ячеисто-трубчатый «каркас», в грубом приближении напоминающий пчелиные соты (см. рис. 7). При этом ледяные стенки кристаллов льда нередко разрушаются в местах выплавления из них частичек грунта, являющихся центрами первоначального таяния СЛ. Проплавленные продольные

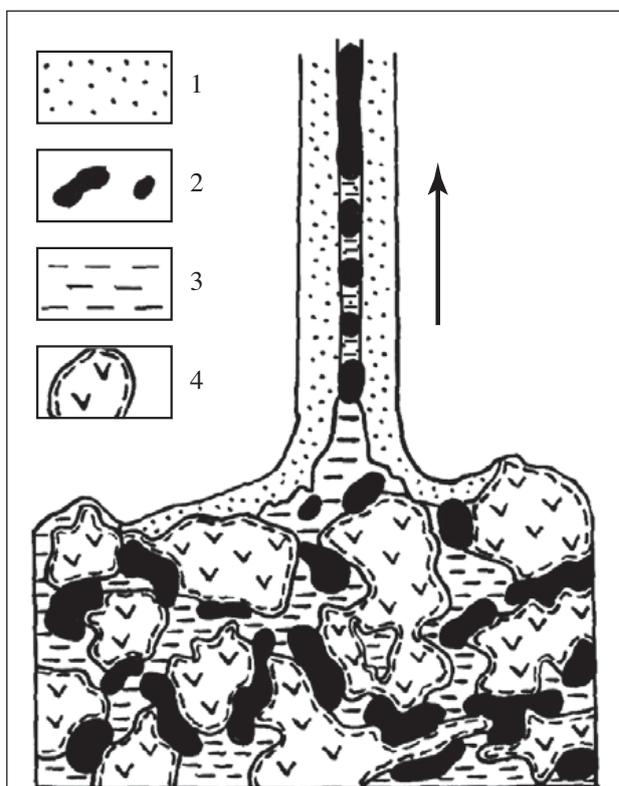


Рис. 8. Схематический разрез стебелькового льда (СЛ).
Условные обозначения: 1 — ледяная оболочка СЛ;
2 — пузырьки воздуха в пепловом грунте и в СЛ;
3 — поровая и пленочная влага (вода); 4 — частицы
вулканического пепла



каналы в стебельках заполнены водой, которая хотя и не может свободно вытекать наружу вследствие воздействия капиллярных сил, но активно перемещается по ледяным капиллярам, как по трубочкам. В замороженных кристаллах стебелькового льда внутренние каналы остаются замерзшими сколь угодно долгое время.

Внутри ледяных оболочек тающих стебельков постоянно происходят активные преобразования — продольное (реже поперечное) перемещение талой воды, переносимой во взвешенном состоянии (или волоком) мелкозем с одновременным вытеснением наружу пузырьков воздуха через проплавленные центральные каналы. При этом пузырьками нередко выносятся и мельчайшие частицы грунта. Достигая границы раздела «стебельки — воздух», пузырьки раскрываются. Иногда мельчайшие частицы грунта в проплавленных ледяных кристаллах оседают вниз камер или же в отдельных случаях с капельками воды и воздушными пузырьками выводятся наружу. Отдельные частицы грунта имеют свойство держаться на поверхности воды и тонут лишь после дополнительного смачивания. В целом же, образование и таяние СЛ сопровождается разрушением агрегатного состояния грунтов ППЧ на мельчайшие частицы.

Движение талой воды внутри стебельков и по их поверхности в значительной степени определяется пленочным механизмом перемещения воды в рыхлой среде и подчиняется влиянию капиллярных сил. Поэтому направление ее перемещения может и не совпадать с наклоном стебельков. В свою очередь, вода, движущаяся по стебелькам и из них, пополняет запасы пленочной воды, что и обуславливает переход последней в гравитационную. В силу всего этого перемещение воды в тающем СЛ может происходить в различных направлениях, хотя, разумеется, в конечном счете оно направлено сверху вниз. В стебельках существуют не только продольные капилляры с малым сечением и каналы миграции, но и довольно широкие поперечные каналы, сообщающиеся как с продольными каналами, так и с поверхностью СЛ.

Вода при таянии перемещается внутри стебельков и по их поверхности с различной скоростью. По данным замеров она в среднем составляет 2,0–2,5 мм/с, но иногда отмечаются пульсирующие толчки, во время которых скорость движения резко увеличивается до 20 см/с. Интересно, что на поверхности СЛ может возникать вихревое вращение пленочной воды со скоростью до десятков оборотов в секунду, что хорошо определяется по движению частиц мелкозема на пленке воды и по мерцанию отражения света.

Натурные наблюдения за образованием стебелькового льда при помощи бинокля при 25-кратном увеличении выявили следующую картину этого процесса. При температуре наружного воздуха минус 3–4 °С на свежем срезе грунтового образца уже через 3–5 мин. появляются первые мельчайшие крупинки льда — зародыши будущих стебельков. Одновременно с этим в результате охлаждения образца происходит замерзание выступающих частиц грунта. По мере дальнейшего охлаждения образца рост ледяных крупинок становится все более и более заметным и через несколько минут они преобразуются в верти-

кально вытянутые кристаллы — предшественники будущих стебельков. Некоторые из этих кристаллов прикрыты мелкими комочками грунта и потому поначалу не видны. Тем не менее их рост обнаруживается по движению самих комочков, выталкиваемых вверх стебельками. Со временем комочки в зависимости от их размеров либо выталкиваются в верхнюю часть СЛ, либо впаиваются в структуру ледяных кристаллов.

В среднем за первый час длина стебельков может достигать 5 мм. При этом стебельки, даже растущие на вертикальных плоскостях, ориентируются перпендикулярно поверхности среза. Однако в дальнейшем они по мере удлинения под действием силы тяжести отклоняются в разные стороны (на наклонном срезе грунтов — вниз) и нередко закручиваются вокруг своей оси на угол до 30 °С под действием неравномерных сил кристаллизации льда в основании растущего СЛ.

Стоит отметить, что в основаниях некоторых стебельков отмечается скопление воды, тогда как другие кристаллы растут без видимой связи с ней, хотя такая связь, несомненно, существует, иначе бы роста как такового просто не происходило. Это доказывает простенький эксперимент, в ходе которого испытываемый кубический образец размером 5×5×5 см поворачивали к солнцу, чтобы прервать его дальнейшее охлаждение. В результате этого уже возникшие стебельки льда сперва прекращали свой рост, а затем по мере прогревания начинали таять, постепенно уменьшаясь в размерах вплоть до полного исчезновения и втягивания воды тающих стебельков в грунт. То есть основания стебельков, соприкасаясь с талым грунтом, расплавляются и постепенно уменьшаются, а образующаяся при этом талая вода всасывается обратно в грунт, равномерно распределяясь по поровому пространству и по поверхности частиц. Кстати, отток талой воды прекрасно фиксируется по «мерцанию», то есть по игре света, отражаемого от поверхности движущейся пленки воды.

При перманентном таянии и охлаждении стебельковый лед испытывает воздействие тепла как сверху, так и снизу. Поэтому он может начать таять и сверху, и снизу, и одновременно с обеих сторон. Причем поскольку при замерзании слои грунта утрачивают воду, то в них возникает дефицит влаги. Так что образующаяся при таянии стебельков вода быстро всасывается обратно в грунт, распределяясь в капиллярах и по поверхности грунтовых частиц. При этом происходит выравнивание толщины водяной пленки. По мнению авторов, этот механизм обусловлен энергетическим взаимодействием воды с минеральными частицами грунта [11].

Одновременно с этим из тающего СЛ высвобождается воздух, пузырьки которого обособляются в ледяных кристаллах при фазовом превращении воды в лед, как это происходит и при обычном замерзании воды. Но, так как зимой температура грунтов в слое сезонного теплового возмущения с глубиной повышается, подсос воды и водяного пара (влажного воздуха) сопровождается выделением тепла. За счет этого грунт в основании стебелькового льда может длительное время не промерзнуть, несмотря на близость

к фронту промерзания. И наоборот, процесс промерзания заметно ускоряется, если в силу ряда причин (например, истощения запасов грунтовой влаги) подток воды замедляется или прекращается вовсе, что, в свою очередь, приводит к ослаблению процесса переноса тепла.

При определенных соотношениях отрицательных (как правило, незначительных) температур наружного воздуха, морфогенетического (многослойного или однослойного) и механического (лава, шлаки, песок или пепел) состава пород ППЧ, а также их влагемкости и интенсивности подтока влаги снизу (на склонах — сбоку, в ямах — снизу, с боков и сверху) образование стебельков может происходить довольно длительное время. Это особенно характерно для юга Камчатки, где отмечаются частые колебания температуры наружного воздуха около 0 °С.

Кстати, к сказанному стоит добавить, что именно пепловые грунты ППЧ вследствие их высокой пористости обладают, пожалуй, наиболее высоким уровнем содержания влаги (см. табл. 1, табл. 2) среди всех грунтов региона, так как именно по поровому пространству пленочная и капиллярная вода устремляется вверх при остывании грунтов под воздействием отрицательных температур наружного воздуха.

Таким образом, колебания температуры наружного воздуха существенно влияют как на глубинное перемещение «нулевой завесы» (фронта нулевых температур), так и на условия миграции воды к основанию растущих стебельков. И, как следствие, — на интенсивность стебелькового льдообразования. В свою очередь, перемещение фронта промерзания вглубь грунтового разреза приводит к замерзанию частичек грунта и их вовлечению в структуру растущего СЛ.

Так происходит криогенное разрушение структурных связей между частицами природного грунта ППЧ и обогащение толщи СЛ мелкоземом в зоне стебелькового образования. Характерно, что СЛ на открытых местах долго не сохраняется благодаря интенсивному морозному выветриванию и сублимации льда [5, 9].

Что же касается условий образования СЛ в целом, то это происходит, как уже говорилось, при обнажении талого слоя грунта геологического разреза в период установления устойчивых отрицательных температур наружного воздуха при ее сравнительно невысоких отрицательных (минус 2÷5 °С) значениях [8, 9]. В частности, авторами во время проведения натурных наблюдений в вертикальной стенке строительного котлована была срезана 4-сантиметровая корка ранее замороженного грунта. А затем в защищенной стенке было сделано горизонтальное углубление (понор) сечением 40×40 см и длиной 1,5 м. Последующие визуальные наблюдения за ходом процесса, проводимые при наружной температуре воздуха минус 3÷4 °С, показали, что температура грунта зависела от удаленности от фронта охлаждения в направлении от дневной поверхности вглубь понора: вблизи границы раздела с воздушной средой она составляла около минус 2 °С, на расстоянии 70 см — плюс 0,6 °С, на глубине 1,0 м и более она стабильно удерживалась на отметке плюс 1,7 °С (см. табл. 2). Таким образом, температура грунта вблизи «корней» стебельков во время эксперимента постоянно была, как и следовало ожидать, положительной.

Уже в течение первых двух часов на поверхности понора возникают как отдельные стебельки льда, так и их «популяции» (сростки). Спустя 12 часов образовывался СЛ высотой 6–7 см (см. рис. 2). Причем ле-

Таблица 2

Водно-физические свойства пепловых грунтов почвенно-пирокластического чехла в пункте проведения эксперимента по выращиванию стебелькового льда						
Глубина отбора пробы, м	Температура, °С	Влажность, д. ед.	Плотность, г/см ³	Коэффициент пористости, д. ед.	Степень влажности, д. ед.	Потеря массы при прокалив., %
0,00	-4,0	1,41	1,09	4,30	0,73	–
0,04	+0,2	1,15	1,09	3,26	0,76	–
0,25	+1,3	1,08	1,07	9,53	0,28	–
0,50	+2,6	1,05	1,13	3,20	0,75	–
0,75	+3,7	1,31	1,13	3,79	0,81	–
1,00	+3,7	1,07	1,07	3,20	0,27	–
0,00	-4,0	1,41	1,04÷1,09	4,30	0,73	–
0,05	+0,9	1,29		4,00	0,72	–
0,12	+1,8	1,38		4,20	0,74	–
0,23	+2,6	1,14		3,70	0,69	22
0,30	+3,7	1,53		4,50	0,76	–
0,42	+4,3	2,36		6,30	0,84	–
0,55	+5,1	1,53		4,50	0,76	23
0,58	+5,3	1,22		3,80	0,72	–
0,80	+5,4	1,58		4,60	0,77	–
0,90	+5,4	1,58		4,60	0,77	–
1,00	+5,5	1,67	2,90	–	21	



дяной покров почти никогда не был сплошным, ибо среди относительно плотно сосредоточенных стебельков нередко располагались «пустые» ячейки, в пределах которых рост стебельков не был отмечен, очевидно из-за дефицита влаги. При этом стебельки новообразованного СЛ оказались ориентированными строго перпендикулярно плоскости среза грунта, то есть на горизонтальных стенках — вертикально, а на вертикальных — горизонтально. Кстати, особо стоит отметить, что на стене самого котлована, промороженного ранее более чем на 5 см вглубь, образования стебельков не происходило.

По мере дальнейшего роста стебельков ввысь и в ширину их «корни» спаиваются, поэтому основание колоний СЛ представляет собой аморфный лед с шестовато-призматической структурой. При этом в толщу образовавшегося СЛ повсеместно происходило вовлечение мелкозема, «впаянного» в лед. Сами же новообразованные кристаллы льда имеют четко выраженный «шелковистый» отблеск.

Что же касается механических (прочностных) свойств новообразованного стебелькового льда, то он обнаруживает весьма заметную хрупкость. Тем не менее при скалывании он часто отделяется совместно с тонким слоем талого грунта, прикрепленного к основанию стебельков.

Процесс образования стебельков происходит за счет подсоса влаги, содержащейся в ППЧ, и при этом мало зависит от состава подстилающих пород. К факторам, стимулирующим этот процесс, относятся избыточная увлажненность грунтов и близость подземных вод. Что и понятно, ибо в этом случае на образование СЛ расходуется не только влага, содержащаяся в верхних горизонтах ППЧ, но и вода, которая подтягивается из обводненных нижних слоев почвенно-пирокластических отложений за счет подъема расположенной между ними капиллярной воды. Вот отчего, кстати, интенсивное образование СЛ отмечается вблизи открытых русел мелких водотоков, поверхностных стоков воды и даже термальных вод. Причем в условиях значительного насыщения влагой грунтов стебельковый лед формируется даже на более плотных подпочвенных отложениях, особенно при наличии гравитационной воды в зоне возможного питания растущих кристаллов льда.

Таким образом, процесс образования СЛ сопровождается сложнейшими преобразованиями структу-

ры и текстуры грунта и самого льда. Об этом, в частности, свидетельствуют данные таблицы 2, характеризующие изменения объема, пористости, влажности стебелькового льда и т.д. в зависимости от глубины опробования и температуры грунта. Впрочем, полученные данные весьма ограничены и потому позволяют выявить лишь некоторые особенности происходящих процессов. Для более детального изучения СЛ требуется проведение более углубленных исследований с одновременным привлечением точных специальных и лабораторных методов работ и на гораздо более обширном экспериментальном материале.

Выводы

На открытых поверхностях почвенно-пирокластических чехлов вулканических районов Камчатки в ранневесенние и позднеосенние периоды замерзания и оттаивания формируется стебельковый лед, представляющий собой «колонии» сросшихся ледяных кристаллов (столбиков) удлиненной формы. Их происхождение обусловлено подсосыванием пленочной и капиллярной грунтовой воды к фронту промерзания с последующей сегрегацией на ее поверхности охлажденных частичек грунта и ледяных образований предшествующих фаз кристаллизации.

Процессы, сопровождающие образование и разрушение стебелькового льда, являются одними из ведущих факторов происхождения таких феноменальных инженерно-геологических особенностей вулканогенных грунтов, как способность к сильному размоканию, чрезмерному пучению, течению при солифлюкции, интенсивному переходу содержащейся в них капиллярной и пленочной воды в различные агрегатные состояния и, отсюда, к повышенной дезинтеграции грунтов.

Изучение стебелькового льда и процессов, связанных с его формированием и таянием, представляет большой практический интерес в связи с широким вовлечением ареалов распространения почвенно-пирокластических чехлов в сферу хозяйственного освоения и создает предпосылки для максимальной оптимизации работы строительной индустрии в областях современного активного вулканизма Камчатки, Курильских и Командорских островов и других регионов Земли с распространением аналогичных вулканогенных грунтов. ❄

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологический словарь. Том 2. М.: Недра, 1973. 456 с.
2. *Гуценко И.И.* Пеплы Северной Камчатки и условия их образования. М.: Наука, 1965. 144 с.
3. *Маршин Е.К.* Вулканы и жизнь. М.: Мысль, 1980. 196 с.
4. *Мелекесцев И.В., Краевая Т.С., Брайцева О.А.* Почвенно-пирокластический чехол и его значение для тефрохронологии на Камчатке. Вулканические фации Камчатки. М.: Наука, 1969. С. 61–71.
5. Мерзлотоведение / под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1981. 239 с.
6. Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. 604 с.
7. *Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р.* Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 536 с.
8. *Попов А.И.* Мерзлотные явления в земной коре. М.: Изд-во МГУ, 1967.
9. *Сергеев Е.М.* Инженерная геология. М.: Изд-во МГУ, 1978. 384 с.
10. *Тараканов А.И.* Характеристика инженерно-геологических особенностей грунтов областей современного вулканизма в целях сейсмического микрорайонирования (на примере юго-восточных районов Камчатки): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 1981. 23 с.
11. *Тараканов А.И.* Энергетика природных сред и явлений. 2015. 565 с.