

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ЛЬДУ
И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 551.578.41: 551.578.46: 551.578.483

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(11-24)

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ
КАК ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Н.А. Казаков

*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский фил.,
693023, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25, Россия; kazakovna@fegi.ru*

Представлены результаты экспериментов по определению электрических характеристик снежного покрова, проводившихся на Южном Сахалине. Эксперименты показали, что электрический заряд ледяного кристалла зависит от его структуры, а заряд снежного слоя – от его структуры и текстуры. По мере увеличения размера и совершенствования формы ледяного кристалла и текстуры снежного слоя заряд снежного слоя увеличивается. Максимальные значения электрических зарядов ледяных кристаллов в слоях вторично-идiomорфного снега составляют от 0.0018 нКл (кристаллы гранного класса форм) до 0.008 нКл (кристаллы скелетного класса форм). Значения удельных электрических зарядов снежных слоев составляют от 0.001 нКл у слоев свежеснежного и обломочного снега до 0.17 нКл у слоев вторично-идiomорфного снега, сложенных кристаллами гранного, скелетного и секториального классов форм. В искусственном электрическом поле ледяные кристаллы, помещенные между двумя плоскими электродами, выстраиваются в вертикальные кластеры, подобные кластерам, формирующим столбчатую и волокнистую текстуру снежного слоя. Это свидетельствует о том, что на кристаллах происходит разделение поверхностных зарядов, а сам ледяной кристалл представляет собой диэлектрический диполь. Снежный покров в естественном залегании может описываться как плоский диэлектрический волновод в электрическом поле системы “атмосфера–литосфера”, т. е. как электродинамическая система.

Структура снега, текстура снежного слоя, электрический заряд

SNOW COVER AS AN ELECTRODYNAMIC SYSTEM

N.A. Kazakov

*Sakhalin Department of Far-Eastern Geological Institute, FEB RAS,
25, Gorkogo street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia; kazakovna@fegi.ru*

The electrical properties of snow in Southern Sakhalin have been experimentally studied. The experiments demonstrate that the electric charge of an ice crystal depends on its structure and that of a snow layer as a whole depends on its structure and texture. The charge of snow layer increases as ice crystals grow in size and the texture of ice layer develops. The highest charges of crystals in the layers of secondary-idiomorphic ice range from 0.0018 nK for faceted crystals to 0.008 nK for skeleton type of crystals shape. The specific electric charge varies from 0.001 nK for new precipitation snow to 0.17 nK for layers of secondary idiomorphic snow composed of faceted, skeleton and sectorial crystals. Ice crystals placed between two flat electrodes in the artificial electric field form vertical clusters similar to those forming the columnar and fiber texture of snow layers. They act as dielectric dipoles and surface charge separators. The snow cover in its natural bedding can be described as a flat dielectric waveguide in the electric field of the “atmosphere–lithosphere” system, i.e. as an electrodynamic system.

Snow structure, texture of snow layer, electric charge

ВВЕДЕНИЕ

Один из важных нерешенных вопросов снеговедения – о природе сил, обеспечивающих связь между ледяными кристаллами в снежном покрове в его естественном залегании.

Обычно снежная толща описывается как сыпучая среда или сплошное тело, а механические

свойства снега рассматриваются как функция его внутреннего трения, сцепления, наличия спаек между кристаллами и т. д. [Войтковский, 1977; Москалев, 1977; Гляциологический словарь, 1984; Динамика..., 1985; Божинский, Лосев, 1987; Голубев, Фролов, 2006]. Однако указанные свойства снеж-

ной толщи – производные фундаментальных физических сил, определяющих характер взаимодействия между ледяными кристаллами – элементарными системы “снежная толща”.

Без определения природы физических сил невозможны построение физических моделей снежной толщи, прогноз лавин и активное воздействие на снежный покров, поскольку именно силами связи между ледяными кристаллами обуславливаются механические свойства снежной толщи и обеспечивается ее устойчивость на склоне.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СНЕЖНОЙ ТОЛЩИ КАК ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Электрические явления в снежном покрове. Электрические явления в снежном покрове часто наблюдаются визуально. В сильных электрических полях кристаллы льда растут в виде вытянутых вдоль поля тонких нитей [Maeno, 2004]. Ледяные кристаллы электризуются во время метелей [Дюнин, 1983; Schmidt, Dent, 1993; Schmidt et al., 1999]. При взвихривании снежной пыли возникает объемный заряд величиной до 10^{-8} Кл/м³ [Дюнин, 1983]. В полярных и высокогорных областях при метелях напряженность электрического поля достигает 100 В/см [Дюнин, 1983].

Движение лавин в горах в безлунные ночи иногда сопровождается зеленовато-желтым свечением [Тушинский, 1949]. По свидетельству В.В. Генсировского, на берегу Татарского пролива (Южный Сахалин) в феврале 1970 г. во время метели, сопровождавшейся массовым сходом лавин, наблюдались многочисленные вспышки желтоватого цвета, подобные вспышкам, возникающим при коротком замыкании электрических проводов.

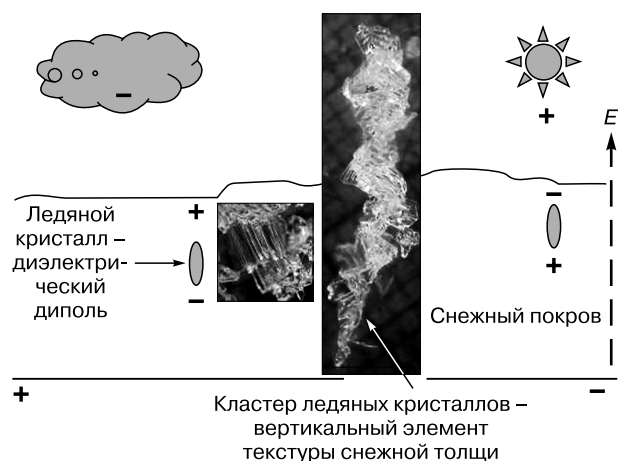


Рис. 1. Снежный покров как слой диэлектрика в электрическом поле (E) системы “атмосфера–литосфера”.

Электрические свойства льда. Лед, кристаллами которого сложена снежная толща, – полярный диэлектрик (ориентационная поляризация), обладающий выраженными электрическими свойствами [Онсегер, 1973; Эйзенберг, Кауцман, 1975; Богородский, Гаврило, 1980; Богородский и др., 1983; Шибков и др., 2000; Фатеев, 2003; Фролов, 2005; Шавлов, 2008; Маено, 2004]. Кроме того, лед – протонный полупроводник, носителями заряда в котором служат протоны в водородных связях [Онсегер, 1973; Эйзенберг, Кауцман, 1975; Маено, 2004]. Протонная проводимость льда возрастает с ростом температуры по экспоненциальному закону (так же как в германии или кремнии), а поверхность раздела лед–вода выпрямляет переменный ток подобно p–n-переходу в полупроводниковом диоде. Лед обладает также свойствами пьезоэлектрика, сегнетоэлектрика и пироэлектрика [Маскаренас, 1973; Эйзенберг, Кауцман, 1975; Маено, 2004].

Таким образом, имеются все основания объяснить механизм возникновения связей между ледяными кристаллами в снежной толще электрическими силами. Именно электромолекулярными силами объясняется образование связанной воды на поверхности грунтовых частиц и связь между самими частицами в рыхлых грунтах [Цытович, 1983; Физические свойства..., 1984; Осипов, 2012]. Избыточные дипольные моменты возникают при поляризации кристаллов-диэлектриков в горных породах [Искусственная активизация..., 1989]. Нет оснований полагать, что снежная толща в этом отношении отличается от других горных пород.

Снежный покров как диэлектрик. Снежный покров в естественном залегании можно описать как слой диэлектрика в конденсаторе, роль обкладок которого играют атмосфера и литосфера (рис. 1) [Казак, 1997, 2011в; Kazakov, 2001].

Ключевое значение в формировании электрических зарядов на поверхности ледяных кристаллов имеет возникающий на их поверхности квазижидкий слой, механизм образования и характеристики которого обсуждались в ряде работ [Гляциологический словарь, 1984; Берри и др., 1986; Маено, 2004]. Квазижидкий слой играет основную роль в обеспечении связности ледяных кристаллов в снежной толще и в процессах ее перекристаллизации (см., например, [Гляциологический словарь, 1984]). Квазижидкий слой возникает на поверхности ледяных кристаллов при температуре выше -6.2 °C [Maeno, 2004]. Такие температуры наблюдаются в сезонном снежном покрове на глубине более 30 см от поверхности снега при любой температуре воздуха.

Отметим, что в облаках при температуре ниже -22 °C электризация ледяных кристаллов не наблюдается [Гальперин и др., 1990]. Полевые ис-

следования, проводившиеся автором на о. Сахалин, в Хибинах, на Западном Кавказе и в Забайкалье (1979–2014 гг.), показали, что при температуре внутри снежной толщи ниже -20°C скорость перекристаллизации ледяных кристаллов замедляется практически до полного прекращения (по крайней мере перестает регистрироваться в наблюдениях). С этими результатами вполне согласуются данные экспериментов [Kaempfer, Schneebeli, 2007].

Электрические свойства снежной толщи и ее механические характеристики. Изменчивость механических характеристик снежного покрова велика даже в гомогенном снежном слое (как в пространстве слоя, так и во времени). Так, в течение суток значения вязкости, ползучести, временного сопротивления сдвигу и разрыву и сцепления на контактах между слоями могут измениться в несколько раз даже при незначительном изменении температуры воздуха (в пределах 5°C).

Автор полагает, что именно электрическими силами связи между ледяными кристаллами определяются механические характеристики снежной толщи, по крайней мере на стадии ее конструктивного метаморфизма. На этой стадии электрические силы могут играть главную роль в обеспечении связи между элементами системы “гомогенный снежный слой”.

В рамках представлений о снежной толще как об электродинамической системе причинами изменчивости ее механических характеристик могут служить периодические и аperiodические флуктуации внешних электромагнитных полей (атмосферных и теллурических), вызывающие изменения геометрии и напряженности электрических полей ледяных кристаллов в снежной толще.

Определяя природу сил связи между ледяными кристаллами как электрическую, мы получаем возможность объяснить:

– феномен самоорганизации упорядоченной структуры снежного слоя (отображаемой в его текстуре) – следствием изменения его электрических характеристик (рис. 2);

– некоторые особенности сублимационного метаморфизма снежной толщи (изменения формы и размера ледяного кристалла по мере перекристаллизации) на стадии конструктивного метаморфизма – проявлением электрических сил;

– причины временной и пространственной изменчивости механических характеристик снежной толщи (вязкость, ползучесть, сопротивление сдвигу и разрыву) – следствием изменения ее электрических характеристик.

Величина электрических зарядов ледяных кристаллов. Важной задачей при построении модели снежной толщи как электродинамической системы является определение величины электри-

ческого заряда ледяного кристалла (q), позволяющей рассчитать величину сил связи между кристаллами. По мнению А.К. Дюнина [1983], максимальное значение q не может превышать 0.2 нКл/мг вследствие потерь заряда за счет коронных разрядов. В этом случае для кристалла массой 1 мг (радиусом до 1 мм) q не может превышать 0.2 нКл.

Однако в работе [Гальперин и др., 1990] приводятся более высокие значения q – до 0.24 нКл для кристаллов радиусом 1 мм. Там же указано на отсутствие простой зависимости между размером ледяной частицы и ее зарядом. С этим утверждением можно согласиться, поскольку заряд кристалла должен зависеть и от его формы [Шаскольская, 1983].

По мнению автора, реальная величина q на стадии конструктивного метаморфизма снежной толщи может существенно превышать приведенные значения по следующим причинам:

– по мере совершенствования симметрии кристалла (т.е. совершенствования его формы) возрастает напряженность внутрикристаллического электрического поля;

– лед обладает слабыми пьезо- и пироэлектрическими свойствами;

– вероятно усиление q кристалла при изменении химического состава снега [Иванов, 1987] за счет увеличения количества носителей q ;

– истекание q с поверхности кристалла вследствие коронных разрядов должно компенсироваться за счет автоколебательных процессов в снежной толще и пьезо- и пироэлектрических эффектов в ледяных кристаллах [Шаскольская, 1983; Казаков, Древило, 1990; Казаков, 1997; Маено, 2004];

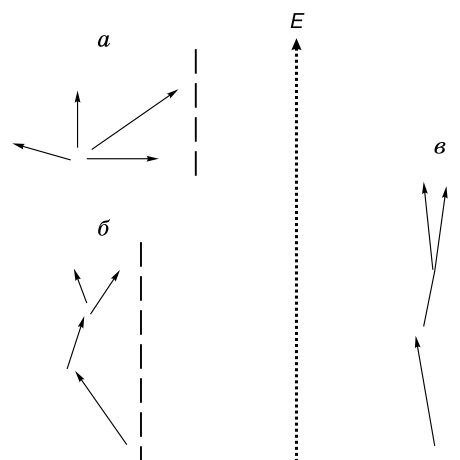


Рис. 2. Изменение вектора вертикальной ориентации кластеров ледяных кристаллов в ходе эволюции снежной толщи.

Текстура снежного слоя: *a* – монолитная, *б* – столбчатая, *в* – волокнистая.

– поверхностная и объемная плотности электрического заряда снежного слоя должны усиливаться за счет кооперативных эффектов в снежной толще [Казак, 1997, 2011в].

По этим причинам приведенные в [Дюнин, 1983] значения электрического заряда в снегу представляются заниженными и могут рассматриваться лишь как оценочные.

Поскольку вектор напряженности электрического поля системы “атмосфера–литосфера” нормален к земной поверхности, наибольшие значения плотности поверхностного заряда ледяных

кристаллов в снежной толще должны отмечаться на их верхних и нижних гранях и ребрах.

Суммарный заряд гомогенного снежного слоя должен разделяться (слой диэлектрика в конденсаторе, обкладками которого служат атмосфера и литосфера), а его поверхностная плотность заряда должна достигать наибольших значений на контактах с соседними слоями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования вопроса о возможности описания снежного покрова в естественном зале-

Таблица 1. Классификация снега

1. Тип снега и класс формы ледяного кристалла (по Э.Г. Коломыцу)			3. Твердость первично-идиоморфного снега		
Класс формы ледяного кристалла	Тип снега	Тип и период метаморфизма			
1.1. Первично-идиоморфный				Мягкий	
*	Свежевыпавший			Очень мягкий	
	Обломочный			Твердый	
	Коррозионно-полиэдрический		4. Текстура вторично-идиоморфного снега		
●	Режеляционно-полиэдрический	Режеляционный		Столбчатая	
	Сублимационно-полиэдрический	Округление		Волокнистая	
1.2. Вторично-идиоморфный		Сублимационный метаморфизм		Монолитная	
	Гранный плоский	Конструктивный	5. Влажность снега		
	Гранный столбчатый			Сухой	
	Полускелетный плоский			Влажный	
	Полускелетный столбчатый			Мокрый	
	Скелетный плоский			Очень мокрый	
	Скелетный столбчатый			Пропитанный водой	
	Секториальный	Регрессивный	6. Подстилающая поверхность		
	Пластинчатый			Кедровый стланик, кустарник	
Примечание. Структура свежевыпавшего и лежалого снега определяется по [The International Classification for Seasonal Snow on the Ground, 2009].				Курильский бамбук	
				Трава	
				Поверхность скольжения лавины	
			7. Корки и включения		
	Режеляционная корка		Ледяная корка	см	Смерзшийся снег
	Рассосавшаяся режеляционная корка				Нерасчлененные кластеры

Таблица 2. Масса ледяных кристаллов и их максимальные электрические заряды (Южный Сахалин, 2011 г.)

№ п/п	Глубина слоя, см	Дата измерения	Структура*	Текстура слоя	Возраст, сутки	Плотность снега в слое, г/см ³	Средние размеры кристалла, мм			Макс. длина кристалла, мм	Сред. объем кристалла, мм ³	Кол-во кристаллов в пробе	Суммарная масса, мг	Сред. масса кристалла, мг	Макс. заряд кристалла, нКл
							длина	ширина	толщина						
1	29–51	11.03.2011	Скелетный столбчатый	Волокнистая	97	0.32	2.0	1.1	0.6	2.7	1.320	15	0.10	0.0067	0.0013
2	21–25	11.03.2011	Полускелетный столбчатый		99	0.34	2.0	1.0	0.4	3.2	0.800	30	0.12	0.004	0.0008
3	31–51	11.03.2011	Скелетный столбчатый		55	0.32	3.0	1.7	0.8	3.7	4.080	5	0.14	0.028	0.0056
4	31–51	11.03.2011	Скелетный плоский		55	0.32	3.0	2.1	0.5	6.0	3.150	10	0.24	0.024	0.0048
5	17–25	11.03.2011	Гранный столбчатый		81	0.32	1.0	0.1	0.3	0.6	0.015	60	0.54	0.009	0.0018
6	65–70	11.03.2011	Секториальный		50	0.26	4.0	0.2	0.6	4.0	0.504	4	0.12	0.03	0.006
7	65–70	11.03.2011	Скелетный плоский		50	0.26	3.0	0.2	0.6	4.0	0.378	8	0.32	0.04	0.008
8	8–17	25.03.2011	Секториальный		124	0.31	2.0	1.8	0.5	2.1	1.800	6	0.18	0.03	0.006
9	8–17	25.03.2011	»	Столбчатая	124	0.31	2.0	2.2	0.6	2.4	2.640	3	0.06	0.02	0.004
10	8–17	25.03.2011	»		124	0.31	3.0	3.0	0.5	3.0	4.500	1	0.02	0.02	0.004
11	8–17	25.03.2011	Скелетный столбчатый		124	0.31	3.0	2.5	0.6	2.5	4.500	1	0.04	0.04	0.008
12	8–17	25.03.2011	То же		124	0.31	4.0	3.0	0.5	4.0	6.000	1	0.04	0.04	0.008
13	8–17	25.03.2011	Секториальный		124	0.31	2.0	2.0	0.8	2.2	3.198	1	0.02	0.02	0.004
14	8–17	25.03.2011	Скелетный столбчатый		124	0.31	3.0	2.0	2.0	2.8	12.000	1	0.04	0.04	0.008

* Класс форм кристалла по Э.Г. Коломыву [1977].

гании как электродинамической системы в 2004–2010 гг. на Южном Сахалине автором были проведены эксперименты по измерению электрических характеристик снежной толщи.

Экспериментальные измерения массы ледяных кристаллов вторично-идиоморфного снега. Для исследования зависимости величины электрического заряда ледяного кристалла от его массы зимой 2010/11 г. на Южном Сахалине проводились полевые измерения массы ледяных кристаллов вторично-идиоморфного снега разных классов форм (табл. 1).

Взвешивались кристаллы скелетного и секториального классов диаметром 3 мм и более. Средняя масса и объем кристаллов (без учета полостей в кристалле) гранного и полускелетного классов форм размером менее 2.5 мм определялись по выборке из 10–100 кристаллов.

Максимальная масса кристаллов составила: у скелетного класса форм размером 3–4 мм (возрастом более 50 сут) – 0.46 мг, секториального класса форм разного размера (возрастом 50 сут) – 0.03 мг, гранного класса форм размером около 1 мм (возрастом 80 сут) – 0.009 мг.

Исследования [Казаков, 2011б] показали, что значения массы ледяных кристаллов вторично-идиоморфного снега на стадии конструктивного метаморфизма лежат в интервале от 0.0022 до 0.46 мг (табл. 2).

Рассчитаем максимальную величину электрических зарядов ледяных кристаллов в зависимости от их массы [Дюнин, 1983]:

$$q = q'm, \quad (1)$$

где $q' = 0.2$ – максимальный удельный электрический заряд ледяного кристалла, нКл/мг; q – максимальный электрический заряд ледяного кристалла, нКл; m – масса ледяного кристалла, мг.

Рассчитанные из выражения (1) значения q кристаллов гранного и полускелетного классов форм составляют от 0.0008–0.0018 нКл, кристаллов скелетного класса форм – до 0.008 нКл (см. табл. 2).

Экспериментальные измерения удельного электрического заряда снежного слоя в естественном залегании. Для определения удельного электрического заряда снежного слоя в естественном залегании в 2004–2010 гг. на Южном Сахалине автором измерялись емкость и разность потенциалов снежных слоев с разной структурой и текстурой.

В снежные слои с разной структурой параллельно подстилающей поверхности помещались два плоских медных электрода площадью по 10 см² (рис. 3), на которые подавался постоянный электрический ток (<0.001 А). Расстояние между электродами – 2–6 см, разность потенциалов между электродами – 10⁴ В. Снег свежесвыпавший и перекристаллизованный (гранного, полускелетно-



Рис. 3. Измерение электрической емкости снежного слоя (Южный Сахалин, фото Н.А. Казакова).

го и скелетного классов форм). Для каждого типа снега выполнено от 10 до 30 серий измерений. Одновременно определялись стратификация снежной толщи, структура, текстура, толщина, температура и плотность снежных слоев. Структура снега описывалась по Э.Г. Коломыцу [Коломыц, 1977; Международная классификация..., 2012; Sokratov, Kazakov, 2012].

При обработке результатов наблюдений сравнивались значения электрических характеристик снежного покрова, полученные в равных условиях, обусловленных: облачностью; температурой воздуха; структурой, текстурой, плотностью и температурой снежного слоя (табл. 3).

Поскольку снежный слой между двумя плоскими электродами можно описать как конденсатор, через измеренные значения емкости и разности потенциалов рассчитывался удельный заряд снежного слоя [Физический... словарь, 1985]

$$Q = UF, \quad (2)$$

где U – разность потенциалов на электродах; F – емкость конденсатора.

Напряженность электрического поля снежного слоя рассчитывалась как [Физический... словарь, 1985]

$$E = U/L, \quad (3)$$

где L – толщина слоя между обкладками конденсатора.

Из осредненных результатов полевых измерений электрических характеристик снежной толщи в естественном залегании следует (см. табл. 3): Q снежного слоя зависит от его структуры (размера и формы ледяных кристаллов) и текстуры, т. е. от стадии перекристаллизации; значения Q слоев свежеснежного и обломочного снега составляют 0.001 нКл, а слоев, сложенных кристаллами гранного, скелетного и секториального классов форм, – до 0.17 нКл; в ходе эволюции снежного слоя изменение Q происходит по мере увеличения размера ледяного кристалла и совершенствования его формы; максимальные значения Q слоев, сложенных ледяными кристаллами гранного класса форм, составляют 0.0018 нКл, кристаллами скелетного класса форм – 0.008 нКл; зависимость Q в слоях, сложенных кристаллами одного класса форм, от плотности снежного слоя не установлена; более устойчивые значения Q снежного слоя наблюдались у вторично-идиоморфного снега, менее устойчивые – у первично-идиоморфного и изоморфного снега; более устойчивые значения Q снежного слоя наблюдались при отсутствии облачности.

Таблица 3. Средние значения удельного электрического заряда снежного слоя (Южный Сахалин, 2004–2006 гг.)

Тип снега	Структура*	Облачность			
		0 баллов		10 баллов	
		F , В/м	Q , нКл	F , В/м	Q , нКл
Свежеснежный	–	–	–	0.01–0.06	0.001–0.07
Обломочный (лежалый)	–	–	–	0.03–0.04	0.001
Сублимационно-полиэдрический	–	0.04	0.014	0.05–0.12	0.002
Режеляционно-полиэдрический	–	0.03–0.08	0.03–0.08	0.02–0.10	0.01–0.13
Вторично-идиоморфный	Гранный	0.05–0.07	0.04–0.05	0.30–0.39	0.12–0.15
Вторично-идиоморфный	Полускелетный	0.17–0.19	0.07–0.14	0.05–0.09	0.02–0.09
Вторично-идиоморфный	Скелетный	0.17–0.25	0.10–0.14	0.05–0.12	0.01–0.10
Вторично-идиоморфный	Секториальный	0.01–0.15	0.02–0.09	0.01–0.03	0.14–0.17

* Класс форм ледяных кристаллов по Э.Г. Коломыцу [1977].

Экспериментальные исследования электризации ледяных кристаллов в искусственном электрическом поле. Зимой 2010/11 г. на Южном Сахалине автором проводились экспериментальные исследования электризации ледяных кристаллов, взятых из слоев снега в естественном залегании и помещенных в искусственное электрическое поле. Цель эксперимента – оценка вероятности проявления электрических эффектов в снежном покрове на макроскопическом уровне.

Эксперимент проводился над ледяными кристаллами свежевыпавшего снега (иглы и звездочки) [Международная классификация..., 2012] и перекристаллизованного снега (гранного, полускелетного и скелетного классов форм [Коломыц, 1977]).

Электрическое поле возбуждалось с помощью электрофорной машины, заряды от которой передавались на расположенные параллельно плоские медные или алюминиевые электроды, расстояние между которыми составляло в разных сериях эксперимента от 2 до 6 см (рис. 4).

Между электродами помещался слой ледяных кристаллов толщиной от 1 до 2 см (рис. 5). Разность потенциалов между пластинами составляла от 10 000 до 30 000 В при силе тока не более 0.0018 А.

Изменения, происходящие в слое ледяных кристаллов, помещенных в искусственное электрическое поле, после подачи напряжения на электроды можно разделить на три стадии (рис. 6): 1) через 1–2 с происходило взвихривание ледяных



Рис. 4. Установка для экспериментов по электризации ледяных кристаллов в искусственном электрическом поле (фото Н.А. Казакова).

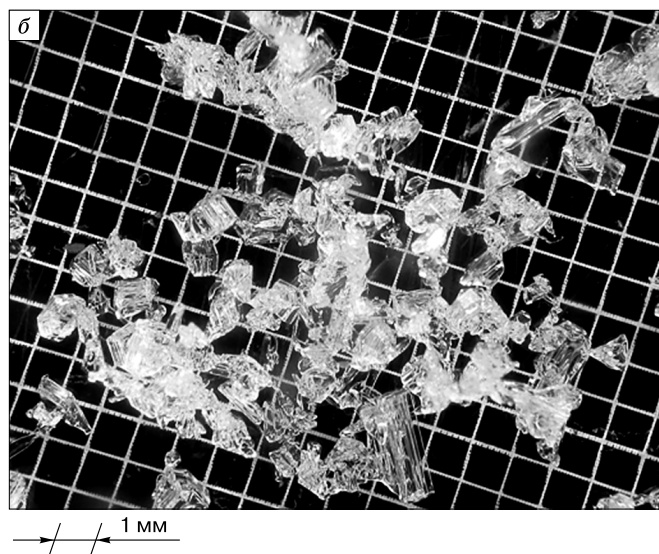
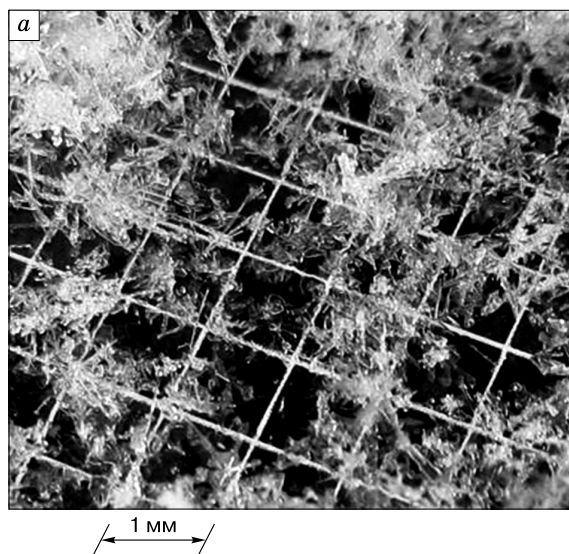


Рис. 5. Ледяные кристаллы, помещаемые в искусственное электрическое поле:

а – кристаллы свежевыпавшего снега; *б* – кристаллы скелетного снега из слоя снега возрастом 65 суток. Фото Н.А. Казакова.

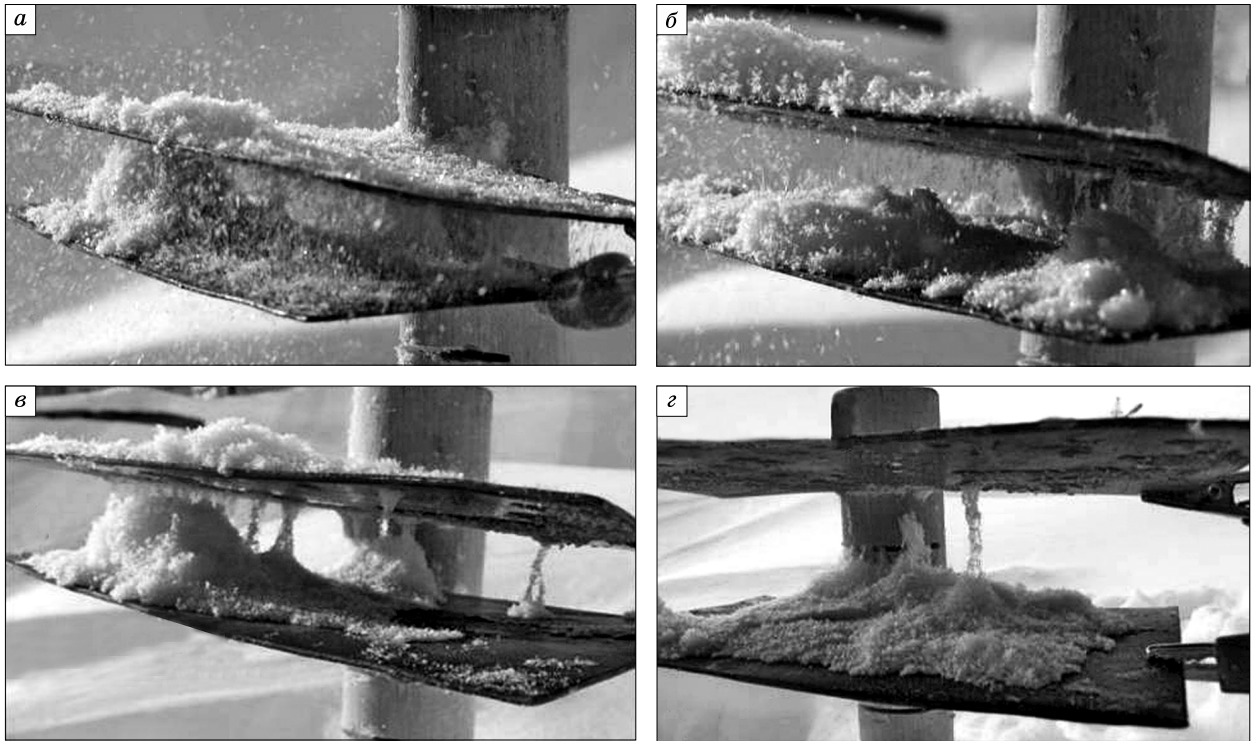


Рис. 6. Электризация ледяных кристаллов в искусственном электрическом поле (фото Н.А. Казакова).
 Последовательные стадии самоорганизации кластеров ледяных кристаллов: а – через 1–2 с; б – 2–3 с; в – 3–4 с; г – 4–5 с.

кристаллов, часть из которых выносилась за пределы электродов; 2) через 2–3 с происходило формирование кластеров ледяных кристаллов между верхним и нижним электродами; 3) через 3–4 с кластеры ледяных кристаллов переставали расти.

После того как напряжение на электроды переставало подаваться, разрушения кластеров ледяных кристаллов не происходило.



Рис. 7. Кластеры ледяных кристаллов вторично-идiomорфного снега, искусственно выращенные в электрическом поле (фото Н.А. Казакова).

Результаты эксперимента показали, что ледяные кристаллы, помещенные между двумя плоскими электродами, при подаче на них электрического напряжения выстраиваются в вертикальные кластеры, подобные тем, которые наблюдаются в снежном слое с волокнистой текстурой (рис. 6–9).

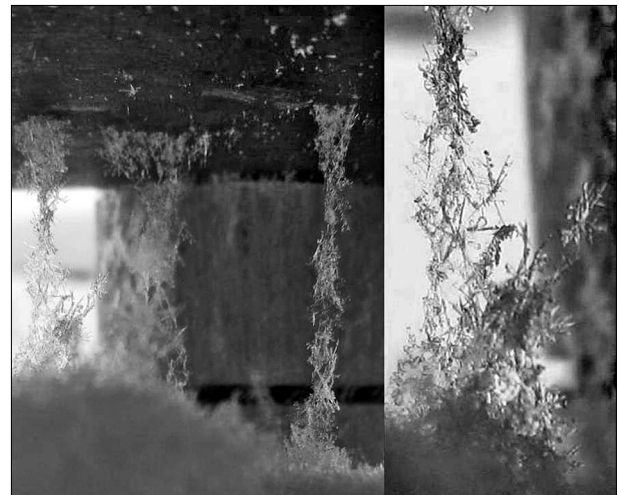


Рис. 8. Кластеры ледяных кристаллов свежевыпавшего снега, искусственно выращенные в электрическом поле (фото Н.А. Казакова).

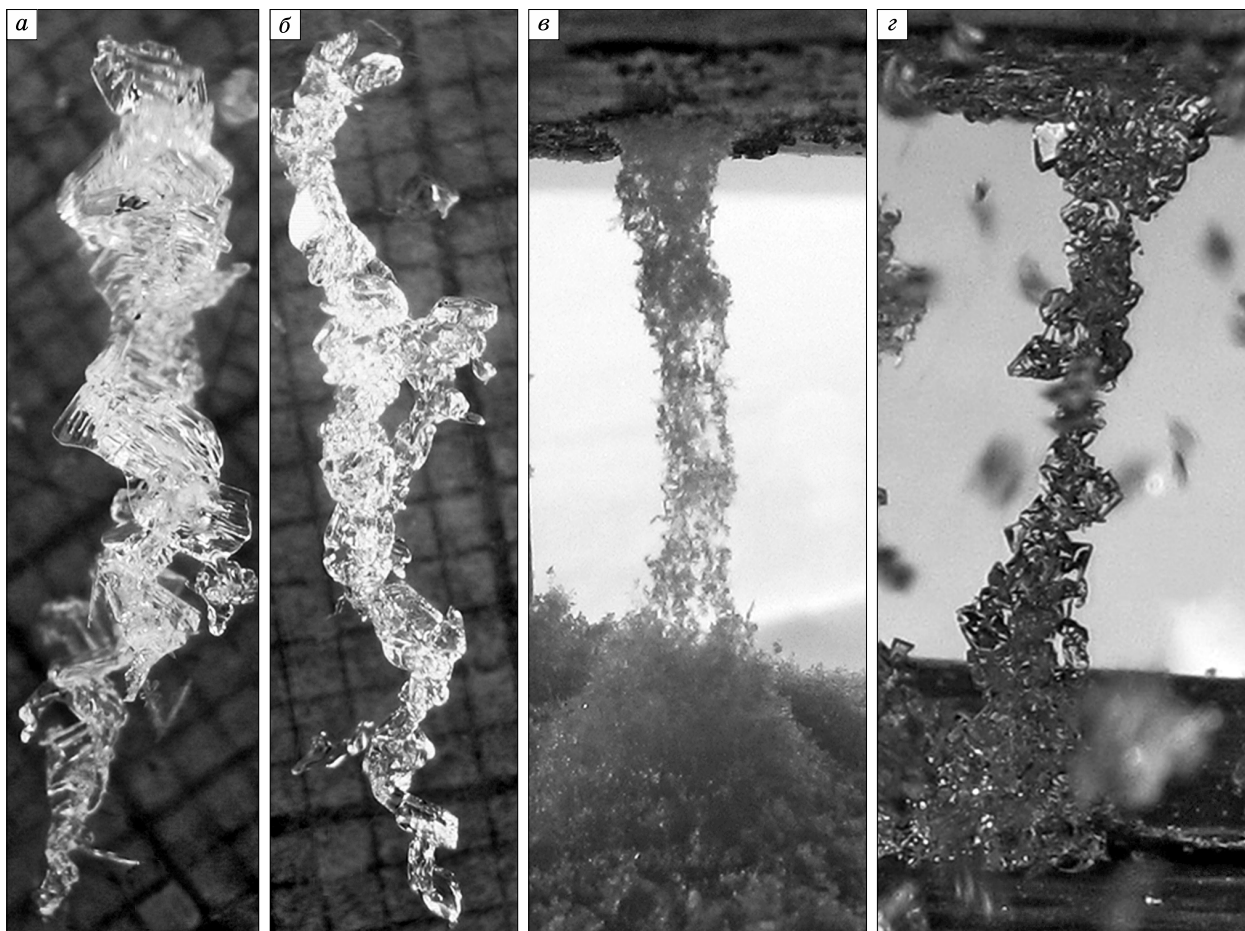


Рис. 9. Кластеры ледяных кристаллов стадии конструктивного метаморфизма:

a, б – кластеры из слоев скелетного снега с волокнистой текстурой (Южный Сахалин); *в, z* – кластеры кристаллов гранного (*в*) и скелетного (*z*) классов форм из слоев снега возрастом 60–65 суток, искусственно выращенные в электрическом поле. Фото Н.А. Казакова.

Наиболее устойчивые кластеры образовывались из кристаллов скелетного класса форм и свежеевыпавшего снега.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Задача настоящего исследования – попытаться оценить принципиальную возможность функционирования снежной толщи как электродинамической системы. Результаты экспериментов позволяют утверждать, что силы электрического взаимодействия между ледяными кристаллами в снежной толще играют важную роль в обеспечении ее механических характеристик и в перекристаллизации снежной толщи. Представление о снежном покрове как об электродинамической системе позволяет объяснить ряд эффектов, наблюдаемых в снежном покрове, но не получивших убедительного объяснения в рамках классических представлений, сложившихся в снеговедении. Например, отсутствие прямой зависимости между

типом снега и некоторыми его механическими характеристиками; определенные особенности перекристаллизации снежной толщи.

Механические характеристики снежной толщи. В рамках электродинамической модели снежной толщи взаимосвязь между ледяными кристаллами объясняется силами электрического взаимодействия.

Соответственно, электрическими силами обусловлены некоторые характеристики снега: сцепление, вязкость, сопротивление сдвигу и разрыву и (в меньшей степени) – сопротивление сжатию (более зависящее от механических характеристик ледяного каркаса снежной толщи).

1. Наблюдаемое по мере роста ледяных кристаллов и совершенствования их формы увеличение коэффициентов сдвиговой и компрессионной вязкости снега [Войтковский, 1977] можно объяснить увеличением заряда и напряженности электрического поля ледяных кристаллов в ходе их эво-

люции, т. е. увеличением сил связи между отдельными кристаллами. Полевые наблюдения, проводившиеся автором на о. Сахалине (1979–2016 гг.) и в Хибинах (1985–1988, 2016 гг.), показали, что в ходе эволюции снежной толщи увеличиваются сцепление, сдвиговая и компрессионная вязкость снежного слоя, но уменьшается его прочность на растяжение. По мнению автора, причина заключается в том, что поверхностная плотность электрических зарядов максимальна на верхних и нижних гранях ледяных кристаллов и минимальна на боковых.

2. Высокие значения углов внутреннего трения снега некоторых типов [Войтковский, 1977; Гляциологический словарь, 1984], существенно превышающие аналогичные значения у некоторых рыхлых грунтов [Динамика..., 1985] (часто использующихся как аналог снежного покрова при моделировании лавинного процесса) убедительно объясняются силами электрического взаимодействия между ледяными кристаллами.

3. По мере перекристаллизации снежной толщи уменьшается ее прочность на растяжение (разрыв) при одновременном увеличении сопротивления сдвигу (т. е. сцепления внутри слоя). По наблюдениям автора (о. Сахалин, Хибины, Забайкалье, 1979–2016 гг.), такие эффекты часто отмечаются в снежных слоях, сложенных скелетными кристаллами с длиной ребра базисного основания 1.5 мм и более.

Электрические силы (соответственно, силы связи между ледяными кристаллами) достигают наибольших величин на верхних и нижних гранях и на ребрах кристаллов: там, где поверхностная плотность электрических зарядов и напряженность электрического поля больше, чем на боковых гранях кристаллов. По мере роста кристаллов и совершенствования их формы их электрические свойства становятся все более выраженными. Вследствие роста поляризованности кристалла и деформации его электрического поля увеличивается разница между значениями напряженности его электрических полей на боковых гранях и вершинах (базисных плоскостях). Следовательно, должна увеличиваться разность значений сопротивления сдвигу, разрыву и сжатию для различных направлений приложения нагрузки к снежному слою.

4. Разрыв связей между ледяными кристаллами при разрушении слоя приводит к высвобождению потенциальной энергии (энергии связи) и переходу ее из электрической формы в механическую (акустическую) и тепловую. В последнем случае этим можно объяснить механизм образования жидкой пленки на контакте снежного покрова и поверхности твердого тела, скользящего по снегу, приводящей к эффектам, возникающим на контактах поверхность–снег. Например, коэф-

фициенты трения по снегу полимерных поверхностей–диэлектриков значительно ниже, чем у металлических проводников [Снег, 1986]. По мнению автора, это объясняется вышеуказанными особенностями взаимодействия электрических сил на контактах диэлектрик–диэлектрик и диэлектрик–металл.

5. Электрические эффекты на контактах между ледяными кристаллами в снежном покрове должны приводить к постоянным режеляционным явлениям в снежной толще и, в свою очередь, к возникновению и росту спаек на контактах между кристаллами, образованию кластеров ледяных кристаллов, формирующих текстуру снежного слоя.

Перекристаллизация снежной толщи. Перекристаллизацию снежной толщи и образование кластеров ледяных кристаллов (см. рис. 9, а, б) можно объяснить электрическими явлениями. Поскольку величина электрического заряда ледяного кристалла увеличивается по мере совершенствования его формы и роста размера, образование кластеров ледяных кристаллов должно чаще отмечаться в снежных слоях, сложенных кристаллами скелетного класса форм. Действительно, образование кластеров ледяных кристаллов в слоях снега, сложенных кристаллами скелетного класса форм (длина ребра базисного основания кристалла более 1.5 мм), – нередкое явление в горах центральной части о. Сахалина в январе–марте, когда температуры воздуха низкие (–15...–30 °С), а значения потенциала электрического поля атмосферы устойчивые [Зыкова, 1951].

Как указывалось выше, квазижидкий слой возникает на поверхности ледяных кристаллов при температурах выше –6.2 °С. Стратиграфические наблюдения в снежной толще, выполненные автором в 1979–2016 гг. (о. Сахалин, Хибины, Западный Кавказ, Забайкалье), показали, что скорость перекристаллизации снежного слоя максимальна при температурах внутри него от –2 до –5 °С. Так, при температуре внутри снежной толщи –2...–6 °С и температуре воздуха –16 °С появление кристаллов скелетного класса форм и увеличение их размеров до 2 мм отмечается через 28–35 сут после формирования слоя. При температуре внутри снежной толщи –7.0...–9.5 °С и температуре воздуха –22 °С появление скелетных кристаллов размером до 2 мм отмечается через 90–100 сут после формирования слоя.

На о. Сахалин кластеры ледяных кристаллов в слоях скелетного снега возникают в январе–марте при антициклональной погоде, когда устойчивы значения потенциала электрического поля атмосферы. При циклоническом типе погоды поляризованность электрического поля атмосферы постоянно меняется и скорость перекристаллизации снежной толщи сильно замедляется. Так, зимой

1997/98 г. на Южном Сахалине кристаллы скелетного класса форм впервые отмечены 6 февраля. Средняя температура воздуха составила -20°C . Зима характеризовалась постоянной сменой облачной и ясной погоды, но почти без снегопадов. При такой смене облачности часто меняется полярность в системе “атмосфера–литосфера”, что с точки зрения предлагаемой модели должно приводить к сильному замедлению скорости перекристаллизации снежной толщи. В зимы с ясным небосклоном и близкими значениями температуры воздуха появление скелетных кристаллов обычно отмечается на Южном Сахалине в конце декабря.

При устойчивых значениях полярности в системе “атмосфера–литосфера” снежная толща может длительное время пребывать в устойчивом состоянии, даже при ее сильной перекристаллизации. Так, по наблюдениям автора (Хибины, Западный Кавказ, о. Сахалин, Забайкалье, 1980–2016 гг.), лавиноопасные слои с низкой плотностью ($0.25\text{--}0.28\text{ г/см}^3$), сложенные кристаллами скелетного класса, могут оставаться устойчивыми к внешнему воздействию и не формировать лавины в течение 2–3 месяцев.

Суточные вариации электромагнитного поля и образование лавин. Важные качества электрического поля снежного слоя – его пространственная непрерывность и скомпенсированность поля внутренних напряжений. Флуктуации электромагнитного поля системы “атмосфера–литосфера” должны приводить к флуктуациям электрического поля снежной толщи и колебаниям значений механических характеристик снежной толщи. Резкое изменение характеристик электрического поля снежного слоя, сопровождающееся резким изменением значений сопротивления сдвигу и разрыву и вязкости снега, может вызывать механические деформации снежного слоя и лавинообразное его разрушение.

Следовательно, прочностные характеристики снежной толщи должны изменяться в течение суток в соответствии с суточными вариациями градиента потенциала электрического поля атмосферы. Действительно, при прочих равных условиях снежный пласт в лавиносборе наиболее хрупок в утренние (6–9) и вечерние (18–22) часы: на них приходится наибольшее число случаев схода лавин. Так, в Восточно-Сахалинских горах (Чамгинский перевал) в декабре–апреле (когда степень перекристаллизации снежной толщи максимальна) в эти часы формируется около 80 % лавин.

Можно предположить, что максимум градиента электрического поля атмосферы в указанные часы приводит к увеличению степени поляризации ледяных кристаллов. При этом резко возрастает поверхностная плотность электрического заряда на верхних и нижних гранях ледяных кристаллов при одновременном ее уменьшении на

боковых гранях. Соответствующее ослабление сил связи между соседними кристаллами делает снежный пласт восприимчивым к внешнему воздействию, направленному на разрыв связности пласта в направлении, параллельном простиранию слоя.

В периоды минимумов напряженности электрического поля атмосферы (4–6, 11–14 и 23 часа по местному времени) [Зыкова, 1951; Семенченко, 2002] ослабляются силы связи во всей снежной толще, что также делает ее неустойчивой по отношению к внешнему воздействию.

Суточные вариации электромагнитного поля и прочностных характеристик снежной толщи. Прочностные характеристики снежной толщи на стадии конструктивного метаморфизма должны рассматриваться как переменные величины, а использование результатов дискретных измерений механических характеристик снежной толщи для расчета ее устойчивости на склоне некорректно, так как результаты не отражают действительного состояния снежного покрова в последующий период. Полевые наблюдения за прочностными характеристиками снежной толщи подтверждают справедливость этого утверждения.

Из-за разной суммарной напряженности электрического поля (т. е. разной величины сил связи между кристаллами) в образцах разного размера значения механических характеристик снега, полученные на искусственно подготовленных образцах, могут существенно отличаться от характеристик снега в его естественном залегании.

В полной мере зависимость механических характеристик снега от его электрических свойств должна проявляться у сухого вторично-идиоморфного снега в естественном залегании на склонах – в тех условиях, где снежная толща развивается как неравновесная система.

Самоорганизация упорядоченной структуры снежного слоя. В лавиноведении измерение механических характеристик снежного покрова для оценки устойчивости снежной толщи на склоне в основном проводится методами, заимствованными из грунтоведения. Однако, в отличие от грунтов, снежной толще присущ ряд особенностей, выделяющих ее из ряда природных объектов. Прежде всего, это высокая скорость метаморфизма снежного покрова, существенно превосходящая скорость метаморфизма других осадочных горных пород, что обуславливает способность снежной толщи к самоорганизации упорядоченных структур (отображаемых в текстуре снежной толщи) и их функционирование в качестве единой информационной и энергетической системы [Казаков, 1998, 2007, 2011a].

В системе “снежный слой” на стадии конструктивного метаморфизма снежной толщи электрические силы способны обеспечить механизм функционирования каналов передачи ин-

формации, что позволяет объяснить механизм возникновения обратной связи между ее элементами (ледяными кристаллами): одно из необходимых условий для самоорганизации упорядоченной структуры снежного слоя [Казиков, 1998, 2011a].

В процессе эволюции таких систем происходит самоорганизация упорядоченных структур, в том числе снежных слоев с развитыми вертикальными элементами текстуры. Такая упорядоченная пространственно неоднородная структура [Казиков, 1998, 2007; Ebeling, 1976] связана в единую систему суммарным электромагнитным полем ледяных кристаллов, которое выступает в роли информационного поля, связывающего снежный слой в единую систему и задающего режим ее функционирования.

В этом случае разрушение структурной связности слоя и изменение прочностных характеристик снежной толщи может происходить при изменении полярности электрического поля системы “атмосфера–земная поверхность” во время образования облачности, при суточных вариациях его напряженности и циклических изменениях межпланетного магнитного поля [Казначеев, Михайлова, 1985].

В свою очередь, изменение параметров электромагнитного поля снежной толщи должно приводить к изменению ее прочностных свойств.

Представление о снежной толще как об электродинамической системе позволяет построить систему неконтактной оценки ее прочностных свойств. Электромагнитное поле снежной толщи допустимо рассматривать как фантомную структуру [Гаряев, 1994], которая является комплексной характеристикой, отражающей совокупность значений физических и механических параметров снежной толщи.

Динамика электромагнитного поля снежной толщи (фантомной структуры) должна отражать динамику процессов, происходящих внутри нее. Изменение параметров электромагнитного поля снежной толщи позволяет судить об изменении ее прочностных свойств, что способствует разработке методологии неконтактной оценки прочностных характеристик снежного покрова и краткосрочного прогноза лавин. Непрерывная регистрация изменений напряженности и полярности электромагнитного поля снежной толщи дает возможность оценить степень устойчивости снежного пласта на склоне и вероятность лавинообразования.

Воздействуя на электромагнитное поле снежного пласта искусственным электромагнитным полем можно изменять скорость его перекристаллизации и регулировать значения его механических характеристик, изменяя динамику лавинных процессов. Такое воздействие может носить пери-

одический или апериодический характер [Казиков, Древило, 1990]. Управляющими параметрами системы выступают частота и полярность искусственного электромагнитного поля.

Разумеется, недопустимо сводить к одной модели все многообразие сил и процессов, действующих в снежном покрове. Предложенная схема – только один из аспектов функционирования самоорганизующейся системы, каковой является снежный покров на определенных стадиях своего развития.

ВЫВОДЫ

1. Снежный покров в естественном залегании можно описать как электродинамическую систему, а снежный слой – как плоский диэлектрический волновод.

2. Электрический заряд снежного слоя зависит от его структуры и текстуры, т. е. от стадии его перекристаллизации. По мере увеличения размера и совершенствования формы ледяного кристалла и текстуры снежного слоя заряд снежного слоя увеличивается. Большие значения электрических зарядов снежного слоя наблюдаются у вторично-идiomорфного снега, меньшие – у первично-идiomорфного и изоморфного.

3. В искусственном электрическом поле ледяные кристаллы выстраиваются в вертикальные кластеры, подобные кластерам, формирующим столбчатую и волокнистую текстуру снежного слоя.

4. Представление о снежном покрове как об электродинамической системе позволяет объяснить следующее.

– Отсутствие прямых зависимостей между типом снега и его сцеплением, сопротивлением сдвигу, разрыву и сжатию, вязкостью, твердостью. Поскольку эти характеристики обуславливаются силами электрического взаимодействия, их значения должны постоянно изменяться во времени.

– Увеличение коэффициентов сдвиговой и компрессионной вязкости снега по мере роста ледяных кристаллов и совершенствования их формы, возможно, происходит по той причине, что в ходе их метаморфизма увеличиваются заряд и напряженность электрического поля ледяных кристаллов и силы связи между кристаллами.

– Уменьшение прочности снега на растяжение (разрыв) при одновременном увеличении сопротивления сдвигу (т. е. сцепления внутри слоя) по мере метаморфизма снежной толщи, часто наблюдаемое в слоях вторично-идiomорфного снега, сложенного кристаллами скелетного класса форм, можно объяснить тем, что силы связи между ледяными кристаллами должны достигать наибольших величин на верхних и нижних гранях и на ребрах кристаллов: здесь максимальны поверхностная плотность электрических зарядов и на-

пряженность электрического поля, величина которых на боковых гранях кристаллов гораздо меньше.

– Слои в снежной толще, по которым происходит обрушение лавин, не всегда имеют низкие плотность и сопротивление сжатию, поскольку по мере роста кристаллов и совершенствования их формы увеличивается их электрический заряд, а вследствие увеличения поляризованности кристалла и деформации его электрического поля растет разница между значениями напряженности электрических полей кристаллов на их боковых гранях и вершинах (базисных плоскостях). Соответственно, увеличивается разность значений сопротивления сдвигу, разрыву и сжатию в различных направлениях приложения нагрузки к снежному слою; при этом слой может разрушаться вследствие ослабления электрического поля слоя.

– Временная изменчивость механических характеристик снежной толщи как электродинамической системы высока. Поэтому прочностные характеристики снежной толщи на стадии конструктивного метаморфизма должны рассматриваться не как постоянные величины, а как переменные.

Литература

- Берри Б.Л., Григоров Н.О., Качурин Л.Г., Псаломщиков В.Ф., Степанюк И.А.** Электромагнитные процессы при кристаллизации воды и разрушении льда // Проблемы инженерной гляциологии. Новосибирск, Наука, 1986, с. 24–32.
- Богородский В.В.** Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии / В.В. Богородский, В.П. Гаврило. Л., Гидрометеоздат, 1980, 384 с.
- Богородский В.** Радиогляциология / В. Богородский, Ч. Бенели, П. Гудмансен. Л., Гидрометеоздат, 1983, 312 с.
- Божинский А.Н.** Основы лавиноведения / А.Н. Божинский, К.С. Лосев. Л., Гидрометеоздат, 1987, 280 с.
- Войтковский К.Ф.** Механические свойства снега / К.Ф. Войтковский. М., Наука, 1977, 126 с.
- Гальперин С.М., Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Степанов В.Д.** Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при воздействиях (Самолетные исследования) // Вопросы атмосферного электричества. Л., Гидрометеоздат, 1990, с. 76–102.
- Гаряев П.П.** Волновой геном / П.П. Гаряев. М., Общественная польза, 1994, 280 с.
- Гляциологический словарь.** Л., Гидрометеоздат, 1984, 528 с.
- Голубев В.Н., Фролов А.Д.** Модель структуры и механических свойств сухого зернистого снега // Материалы гляциол. исслед., 2006, вып. 100, с. 207–212.
- Динамика масс снега и льда (сборник):** Пер. с англ. и ред. А.Н. Кренке. Л., Гидрометеоздат, 1985, 456 с.
- Дюнин А.К.** В царстве снега / А.К. Дюнин. Новосибирск, Наука, 1983, 160 с.
- Зыкова В.В.** Градиент электрического потенциала атмосферы в г. Южно-Сахалинске за 1933–1946 гг. / В.В. Зыкова. Южно-Сахалинск, ЮС НИ, 1951, 17 с.
- Иванов А.В.** Теория криогенных и гляциогенных гидрохимических процессов // Итоги науки и техники. Гляциология. М., ВИНТИ, 1987, т. 5, 236 с.
- Искусственная активизация оползней /** Коллектив. авт. Г.П. Постоев, И.Ф. Ерыш, В.Н. Саломатин и др. М., Недра, 1989, 134 с.
- Казаков Н.А.** Электродинамика снежной толщи: образование и движение лавин // Материалы гляциол. исслед., 1997, вып. 82, с. 161–164.
- Казаков Н.А.** Лавинный процесс как процесс самоорганизации упорядоченных структур // Материалы гляциол. исслед., 1998, вып. 84, с. 155–158.
- Казаков Н.А.** Текстура снежной толщи как детерминированный фрактал // Материалы гляциол. исслед., 2007, вып. 101, с. 183–187.
- Казаков Н.А.** Самоорганизация упорядоченных структур в снежном покрове // Тезисы докл. Междунар. симпозиума “Физика, химия и механика снега”. Южно-Сахалинск, Компания КАНО, 2011а, с. 184–186.
- Казаков Н.А.** Экспериментальные исследования веса ледяных кристаллов в снежном покрове // Там же, 2011в, с. 68–70.
- Казаков Н.А.** Экспериментальные исследования электрических характеристик снежного покрова // Там же, 2011в, с. 73–75.
- Казаков Н.А., Древило Н.Р.** Автоколебания снежного пласта в лавиносборе, волноводы в снежной толще и механизм образования пластовых лавин // Материалы гляциол. исслед., 1990, вып. 70, с. 49–57.
- Казначеев В.П.** Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей / В.П. Казначеев, Л.П. Михайлова. Новосибирск, Наука, 1985, 200 с.
- Коломыц Э.Г.** Методы кристалломорфологического анализа структуры снега / Э.Г. Коломыц. М., Наука, 1977, 200 с.
- Маскаренас С.** Аккумуляция заряда и поляризация в кристаллах льда // Физика льда (сб. докл. междунар. симп. по физике льда, Мюнхен). Л., Гидрометеоздат, 1973, с. 114–116.
- Международная классификация для сезонновыпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова).** Русское издание // Материалы гляциол. исслед., 2012, вып. 2, 80 с.
- Москалев Ю.Д.** Динамика снежных лавин и снеголавинные расчеты // Тр. САРНИГМИ. Л., Гидрометеоздат, 1977, вып. 36/117, 232 с.
- Онсагер Л.** Протонные полупроводники // Физика льда (сб. докл. междунар. симп. по физике льда, Мюнхен). Л., Гидрометеоздат, 1973, с. 86–90.
- Осипов В.И.** Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах / В.И. Осипов. М., ООО “Самполиграфист”, 2012, 73 с.
- Семенченко Б.А.** Физическая метеорология / Б.А. Семенченко. М., Аспект Пресс, 2002, 414 с.
- Снег:** Справ. / Под ред. Д.М. Грея, Д.Х. Мэйла. Л., Гидрометеоздат, 1986, 752 с.
- Тушинский Г.К.** Лавины. Возникновение и защита от них / Г.К. Тушинский. М., Географгиз, 1949, 56 с.
- Фатеев И.Г.** Влияние сверхвысокочастотного электрического поля на порог взрывной неустойчивости льда // Журн. техн. физики, 2003, т. 73, вып. 4, с. 43–48.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) /** Под ред. Н.Б. Дортмана. М., Недра, 1984, 455 с.

Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. М., Сов. энциклопедия, 1985, 944 с.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов. Пущино, ПНЦ РАН, 2005, 607 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. М., Высш. шк., 1983, 288 с.

Шавлов А.В. Механизм межфазной электризации при испарении и конденсационном росте льда и воды // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 52–59.

Шаскольская М.П. Кристаллография / М.П. Шаскольская. М., Высш. шк., 1983, 376 с.

Шибков А.А., Желтов М.А., Королев А.А. Собственное электромагнитное излучение растущего льда // Природа, 2000, № 9, с. 105–112.

Эйзенберг Д. Структура и свойства воды / Д. Эйзенберг, В. Кауцман. Л., Гидрометеиздат, 1975, 280 с.

Ebeling W. Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen / W. Ebeling. Leipzig, Teubner-Verlag, 1976, 194 p.

Kaempfer T.U., Schneebeli M. Observation of isothermal metamorphism of new snow and interpretation as a sintering process // J. Geophys. Research: Atmospheres, 2007, vol. 112 (24), art. no. D24101, DOI: 10.1029/2007JD009047.

Kazakov N.A. The electric fields in the snow cover and avalanche formation // Proc. of the Second Intern. Conf. "Avalanches and related subject". Kirovsk, Russia, OAO Apatit, 2001, p. 37–38.

Maeno N. Science about Ice / N. Maeno. Sapporo, Hokkaido Univ. Press, 2004, 234 p. (in Japan).

Schmidt S., Dent D. A theoretical prediction of the effects of electrostatic forces on saltating snow particles // Ann. Glaciol., 1993, vol. 18, p. 234–238.

Schmidt D., Schmidt R., Dent J. Electrostatic force in blowing snow // Boundary-Layer Meteorol., 1999, vol. 93, p. 29–45.

Sokratov S., Kazakov N. Dry snow metamorphism expressed by crystal shape // Ann. Glaciol., 2012, vol. 58 (61), p. 51–56.

The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP–VII Technical Documents in Hydrology No. 83, IACS Contribution No. 1. UNESCO, Paris, 2009, 80 p.

*Поступила в редакцию
2 июня 2015 г.*