

## ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

В январе 2016 г. исполнилось 80 лет **Эрланду Георгиевичу Коломыцу** – замечательному ученому-географу, одному из современных теоретиков физической географии и геоэкологии, постоянному автору нашего журнала. Он выпускник Географического факультета МГУ 1960 г., известен как ландшафтовед широкого профиля, а также как специалист в областях географической экологии и снеговедения. Им опубликовано более 150 работ, из них – 15 авторских и 8 коллективных монографий. Свою научную деятельность Э.Г. Коломыц начал в Арктике в 1957–1958 гг. в период Международного Геофизического Года. Еще студентом 4 курса кафедры географии полярных стран он опубликовал первые печатные работы под эгидой академика К.К. Маркова и профессора А.И. Попова. Свою любовь к Крайнему Северу и снегу сохранил на долгие годы. Более 20 с лишним лет он работал в горах Забайкалья, в Западной и Восточной Сибири, на Полярном Урале, в Приамурье, на Сахалине, Камчатке, Колыме, Курилах а также в высокогорье Большого Кавказа. Результаты этих многолетних исследований внесли существенный вклад в развитие отечественной гляциологии – в теорию эволюции снежного покрова и метаморфизма снега, морфологическую классификацию снега. Его монографии “Кристалломорфологический атлас снега” (1984), “Методы кристалломорфологического анализа структуры снега” (1987) и “Теория эволюции в структурном снеговедении” (2013) были переведены на английский язык.

В течение последних 30 лет Э.Г. Коломыц активно занимается проблемами ландшафтной экологии, эмпирического моделировании геосистем и эколого-географического прогнозирования, что согласуется с его интересами после перехода в 1990 г. на работу в Институт экологии Волжского бассейна РАН, где он организовал лабораторию ландшафтной экологии и работает по настоящее время.

Э.Г. Коломыц – ученый-новатор, генератор идей. В 2003 г. ему было присвоено почетное звание “Заслуженный деятель науки Российской Федерации”, а в канун юбилея в октябре 2015 г. присуждена премия имени академика А.А. Григорьева за цикл работ в области физической географии и гляциологии. Редакционная коллегия нашего журнала и коллеги искренне поздравляют Э.Г. Коломыца с юбилеем, и желают ему долгих лет творчества. Ждем от юбиляра новых публикаций в нашем журнале.

УДК 551.578.4 + 911.51.7

### МЕТАМОРФИЗМ СНЕЖНОГО ПОКРОВА КАК ЭВОЛЮЦИОННЫЙ БИОСФЕРНЫЙ ПРОЦЕСС

© 2016 г. Э.Г. Коломыц

*Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, Россия  
e-mail: egk2000@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.03.2013 г.

Представлена концепция развития структуры снежного покрова, основанная на его кристалломорфологии, а также на фундаментальных законах природной симметрии и эволюционного учения. Разработаны детерминированные и стохастические эмпирические модели, описывающие сублимационно-метаморфический цикл снежного покрова как эволюционный биосферный процесс. Выявлены стадийность форм роста кристаллов и полиморфное саморазвитие снежных горизонтов. Показано, что снежный покров представляет собой природную модель для изучения ряда эволюционных процессов, которые были в геологическом и историческом прошлом и происходят ныне как в неорганической природе, так и в биотической среде.

**Ключевые слова:** снежный покров, структура, кристалломорфология, симметрия, сублимационно-метаморфический цикл, авторегуляция, эволюция, биосферный процесс.

**Введение.** Изучение процессов, происходящих в толще снега, основывается чаще всего на рассмотрении снежного покрова как *континуальной* вещественно-энергетической системы.

Снег трактуется как трехкомпонентный пористый материал, способный к пластично-вязким и хрупким деформациям. В этом плане достаточно полно изучены физико-механические свойства

снега, которые оцениваются главным образом с точки зрения переноса, превращения и сохранения энергии, с выявлением соответствий между снегом и окружающей средой. Разработаны математические модели таких процессов, особенно важные для прогнозирования снежных лавин [2, 5, 33, 34 и др.].

В соответствии с этим в большинстве случаев априори принимается, что снежный покров напрямую отображает в своих структурно-стратиграфических характеристиках свойства окружающей среды (в первую очередь зимние климатические условия). И хотя термин “эволюция снежной толщи” употребляется постоянно, он не имеет определенного смыслового содержания. Остается неясным вопрос, насколько метаморфизм отложенного снега является процессом его саморазвития, т.е. действительно эволюционным процессом, в строгом научном значении этого термина. Снежный покров есть мономинеральная горная порода [16] и тело кристаллическое, поэтому теория и методы кристаллографии должны, казалось бы, лежать в основе подходов к изучению внутреннего строения снежной толщи. Однако подавляющее большинство известных нам отечественных и зарубежных работ далеки от этого. Методы микроструктурного анализа снега обычно сводятся к гранулометрии [6, 7, 32, 34 и др.], а формы кристаллов не рассматриваются как основное структурное качество снега [35].

Морфология снежных кристаллов изучается преимущественно путем лабораторных экспериментов и наблюдений за их индивидуальным свободным ростом и формообразованием [7, 13, 36–38 и др.], что помогает интерпретировать результаты натуральных наблюдений. Однако воспроизвести в лаборатории все природное разнообразие процессов перекристаллизации снежного покрова практически невозможно.

Так или иначе инженерно-гляциологическая практика до сих пор не получила проработанной научно-методической базы прогноза целого класса лавин “длительного развития” [2], которые связаны с появлением в толще снега горизонтов “зрелой” глубинной изморози.

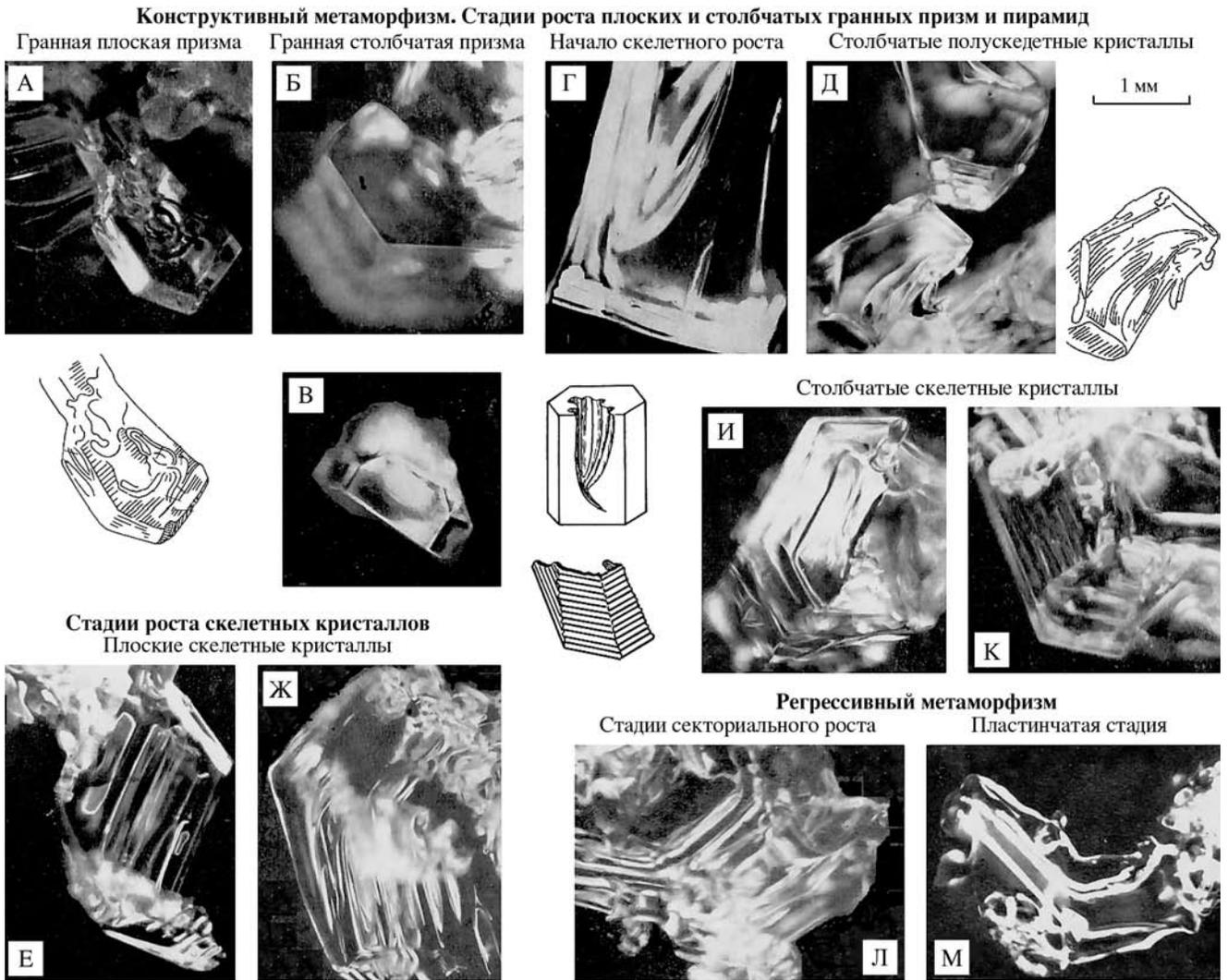
**Исходные положения концепции.** В настоящем сообщении эволюция снежного покрова рассматривается на основе его трактовки как иерархически организованной системы *дискретных кристаллических пространств*, в понимании В.И. Вернадского [3]. В основе этой системы лежит основное структурное качество снега – формы растущих кристаллов, которые находятся в тесном взаимном влиянии и одновременно испы-

тывают регулирующее воздействие извне, прежде всего со стороны атмосферы. Снежный покров представлен как *природное сообщество разнокачественных индивидов – кристаллических форм*. Такой подход позволяет провести анализ структуры и метаморфизма снега с помощью *методов кристалломорфологии* и на основе *фундаментальных законов природной симметрии*, которые широко используются в генетической минералогии и минералогической кристаллографии [8, 21, 22, 27, 28, 30].

Симметрия выступает как метод обнаружения инвариантных закономерностей в материальном мире. Этот метод в полной мере приложим к проблеме роста и формообразования кристаллов в снежном покрове. В свете известного принципа симметрии–диссимметрии Пьера Кюри [21, 22] развитие структуры снега представляет собой необратимый во времени процесс, который состоит из последовательных этапов суперпозиции (взаимного наложения) кристаллохимической (гексагональной) симметрии льда как минерала (генотипа) и диссимметрии векторного гидротермического поля снежной толщи, а также поля релаксации в ней механических напряжений. В результате формируется множество реальных (вынужденных, ложных – тригональных, ромбических, моноклинных и триклинных) кристаллических форм (фенотипов) как способа приспособления растущих кристаллов к условиям среды (рис. 1). Огромное значение принципу Кюри в возникновении и эволюции живого вещества биосферы придавал В.И. Вернадский [4].

Проблемы развития наиболее полно разработаны при изучении биотических систем, поэтому при интерпретации полученных результатов нами использованы достижения эволюционного учения [14, 15, 17, 25, 26], которые уже нашли воплощение в кристаллографии и генетической минералогии [21, 27, 30, 31 и др.]. Дело в том, что кристаллы стоят ближе к органическому миру, чем другие неорганические системы, а “... явления зарождения и роста кристаллов по своему многообразию могут быть поставлены в сравнение только с явлениями настоящей жизни” [28, с. 7]. Речь идет о таких процессах, как рост и регуляция, саморазвитие и самовоспроизведение, борьба за источники питания и естественный отбор.

**Детерминированная модель сублимационного метаморфизма снега.** На основе многолетних стационарных и маршрутных наблюдений, проведенных автором в равнинных и горных районах Сибири, Дальнего Востока и Европейской России [11, 12], установлено, что *время (возраст снежного*



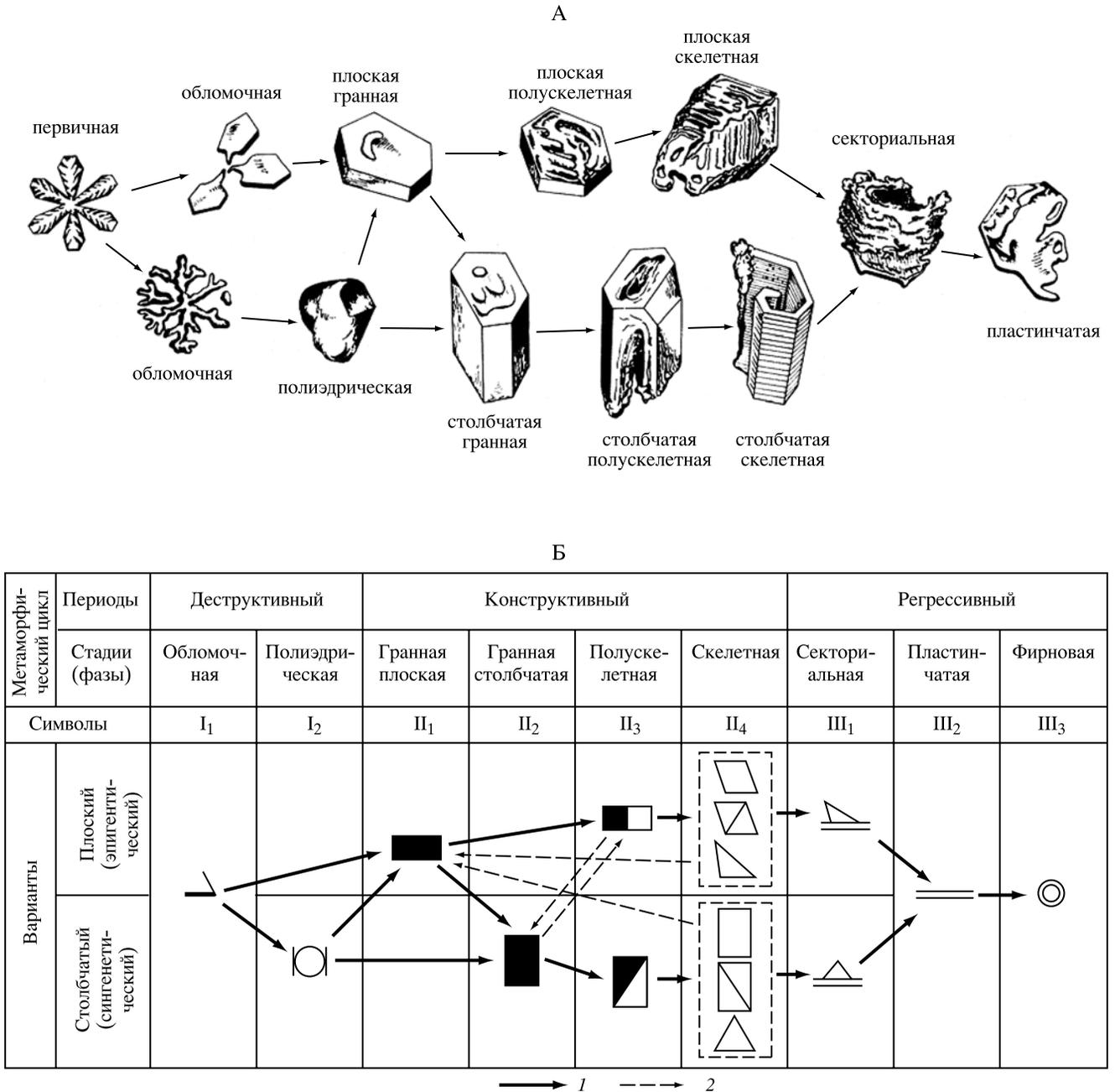
**Рис. 1.** Некоторые формы роста и разрушения снежных кристаллов, характеризующие периоды и стадии сублимационно-метаморфического цикла в снежной толще. Объяснения в тексте.

горизонта) – главный фактор, по координате которого необходимо рассматривать закономерности и результаты метаморфизма снега. Стадийный рост кристаллов на 45–60% зависит от возраста горизонта. Значительно слабее проявляется его высота над почвой (на 15–35%). Наименьшее влияние (0.5–5.5%) на рост кристаллов оказывает местоположение снежной толщи. Время делает процессы перекристаллизации снега необратимыми и вызывает рост кристаллов и смену их поколений в каждом горизонте.

Основная эволюционная единица снежного покрова – генетически единый снежный горизонт (СГ) как элементарное саморазвивающееся сообщество кристаллов различной формы. Эволюция каждого горизонта есть направленный процесс возникновения, развития и исчезновения, после-

довательно сменяющих друг друга кристаллических форм при энергетическом воздействии окружающей снег среды как необходимым условием этой эволюции. Однако истоки механизмов эволюции СГ сосредоточены в системах “кристалл-пар” и “кристалл-кристалл”.

Автором разработана эмпирическая детерминированная модель, описывающая незамкнутый сублимационно-метаморфический цикл сезонного снежного покрова и региональные (полиморфные) варианты этого цикла [11, 12]. Установлено, что сухой снежный покров стремится пройти в течение зимы (полностью или частично) направленную траекторию перекристаллизации, состоящую из трех периодов: деструктивного (подготовительного, I), конструктивного (эволюционного, II) и регрессивного (инволюционного, III).



**Рис. 2.** Сублимационно-метаморфический цикл сухого сезонного снега. А – этапы онтогенеза кристаллов в сухом снежном покрове, их стадийного роста и последующего разрушения. Варианты (программы) сублимационного онтогенеза: плоский (вверху) и столбчатый (внизу). Б – схема сублимационно-метаморфического цикла в его полиморфных вариантах: 1 – переходы основной (элементарной) цепи преобразований форм кристаллов и снежных горизонтов; 2 – переходы возрастного усложнения структуры горизонтов и смещения их с одного варианта (программы) метаморфизма на другую.

Эти периоды включают девять стадий роста и последующего разрушения кристаллов (рис. 2). Каждой стадии отвечает свой класс кристаллических форм, а доминирующему классу – своя фаза развития горизонта. Статистический анализ показал, что морфологическое усложнение СГ вызвано отбором кристаллов в процессе их роста.

Группы частиц переходят из одного класса форм в другой одновременно, поэтому горизонт постепенно обогащается различными формами.

**Деструктивный метаморфизм** снега аналогичен процессу выветривания горных пород. Распад первичных кристаллов и превращение их в бесформенные “зерна” вызваны резкими изме-

нениями условий их существования после отложения снега. Этот период наиболее продолжителен в районах с мягкими (океаническими) зимами. В резко континентальных зимних условиях “зернистая” (полиэдрическая) стадия практически выпадает, а обломочная сокращается во времени, поскольку деструктивный метаморфизм эффективен лишь при слабо градиентном термическом поле снежной толщи, с присущей ему шаровой симметрией. При деструкции кристаллы стремятся к предельному упрощению формы (округлению), а горизонты – к минимуму многообразия первичных форм.

Степень перекристаллизации снега (развитие глубинной изморози) определяется *конструктивным метаморфизмом*, который занимает в континентальных районах большую часть зимы. На начальных стадиях роста граней ( $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ) кристаллы имеют еще сравнительно малые размеры (средний радиус от 0.3–0.5 до 0.8–1.0 мм), поэтому преобладает тенденция к простоте и совершенству формы (рис. 1А, Б) – по принципу Гиббса–Кюри–Вульфа [20]. Однако мера структурного разнообразия (негэнтропия) СГ увеличивается от 0 до 1.3–1.5 бит. Этот процесс идет с нарастающей скоростью (рис. 3). В начале конструктивного метаморфизма кристаллы образуют сравнительно однородные классы форм, подчиняющиеся законам нормального распределения. Продолжительность этих стадий резко возрастает, а скорость роста кристаллов уменьшается в направлении от нижних горизонтов снега к верхним.

Появление и развитие скелетных кристаллов (ажурных, пустотелых, огрубленно-ступенчатых) – первый качественный скачок в метаморфическом цикле (стадии  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$ , см. рис. 2). Преобладающей становится приспособительная тенденция роста (по принципу максимальной скорости завершения процесса кристаллизации), которая дает большое разнообразие скелетных форм. Развиваются “… структуры, растущие в условиях “погони” за веществом в ущерб заполнению пространства” [31, с. 27]. Скорость метаморфизма резко возрастает. Кристаллы достигают в среднем радиусе 2.0–3.5 мм. Благодаря структурному отбору [17] гранные формы интенсивно превращаются в полускелетные, а затем и скелетные. Число кристаллов в единице объема уменьшается, а мера сложности СГ в скелетной фазе достигает максимума – 2.5–3.0 бит и более.

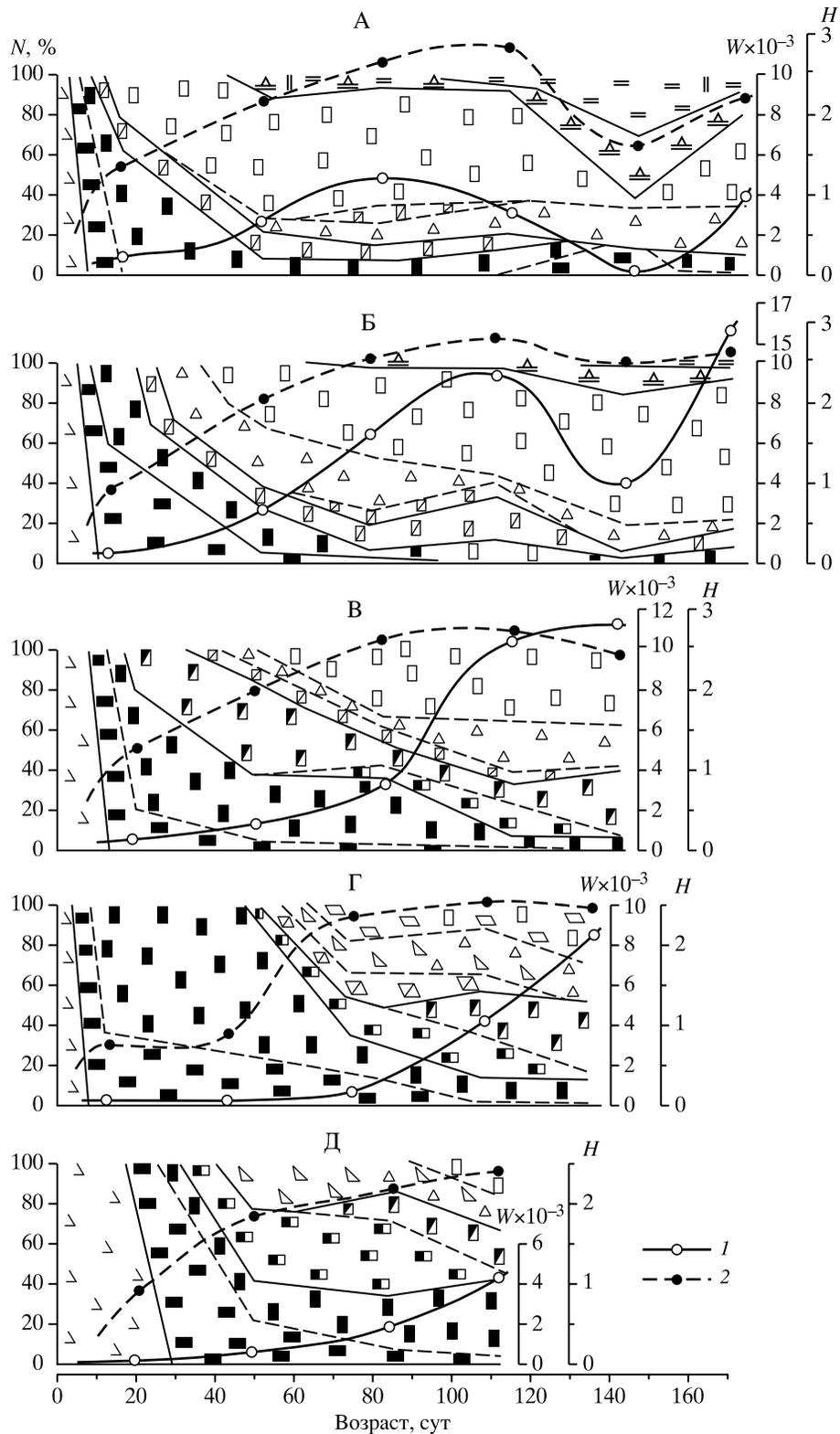
Такое морфологическое усложнение горизонта обусловлено механизмами адаптации кристаллов к диссимметричной среде, обеспечивающими их дальнейший рост в соответствии с принципом Кюри. Сначала образуются пирамидальные

усложнения на гранях кристаллов (рис. 1В). Затем возникают и расширяются незамкнутые полости (каверны, рис. 1Г, Д), что означает постепенное вхождение парообразной среды в состав кристаллов [24]. Одновременно идет массовое снижение их реальной симметрии, вплоть до моноклинной планальной (рис. 1Е, Ж) и триклинной примитивной (рис. 1И, К). Соответственно, идет увеличение процентного содержания этих форм по всем снежным горизонтам, хотя и с разной скоростью (табл. 1). Все это характеризует “углубление специализации” индивидов, по терминологии [17], т.е. повышение избирательности точек их дальнейшего роста (от гранного роста к реберному).

Скелетный рост может идти двумя различными путями, что дает два основных региональных варианта конструктивного метаморфизма снега (см. рис. 2) и, соответственно, по *два типа форм кристаллов* полускелетного и скелетного классов. Первый, столбчатый, вариант (нижняя цепь переходов на рис. 2) характеризуется прохождением кристаллов через стадии:  $I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow \Pi_1 \rightarrow \Pi_2^C \rightarrow \Pi_3^C \rightarrow \Pi_4^C$ . Он свойствен районам с умеренно континентальными и мягкими зимами. Однако при достаточно быстром нарастании снега такие формы могут развиваться в нижних и средних горизонтах и при достаточно суровых зимах (см. рис. 3).

Второй, плоский, вариант скелетного роста (см. рис. 2, верхняя цепь преобразования) имеет стадийную последовательность:  $I_1 \rightarrow \Pi_1 \rightarrow \Pi_3^П \rightarrow \Pi_4^П$ . При этом варианте отсутствуют полиэдрическая и гранная столбчатая стадии, что существенно ускоряет процесс “созревания” глубинной изморози. Скелетные кристаллы образуются в результате роста низких ступеней на базисной плоскости или косоугольного наращивания их под углом к главной оси. Призмы приобретают вид косых многогранников, а пирамиды становятся резко асимметричными или тоже косоугольными (см. рис. 1Е, Ж). Такие кристаллы развиваются преимущественно в верхних горизонтах, с их нестационарным температурным полем, однако в условиях резко континентальной зимы могут охватывать всю снежную толщу. Столбчатый и плоский варианты (программы) перекристаллизации снега – это не что иное, как проявление *адапционного полиморфизма* эволюционных процессов, по терминологии [17].

Скелетные формы кристаллов во многих случаях являются формами “ступенчатой, или криволинейной симметрии” [22], в которых с наибольшей степенью выражено воздействие диссимметричной среды (см. рис. 1Ж, Л). Изгибание грани при



**Рис. 3.** Возрастные изменения параметров структуры горизонтов снежной толщи в таежно-болотном природном комплексе Кондо-Сосьвинского междуречья (средняя тайга Западной Сибири) зимой 1968/69 г.

*Параметры:*  $N$  – процентное соотношение средних объемов кристаллов различных классов и типов форм;  $l$  – средний объем кристаллов ( $W \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$ );  $2$  – мера сложности горизонта, или негэнтропия ( $H$  в битах информации). Высота горизонта над поверхностью почвы, см (А – 0, Б – 10, В – 30, Г – 40, Д – 60). Обозначения форм кристаллов те же, что и на рис. 2Б.

**Таблица 1.** Хребет Мяо-Чан (Нижнее Приамурье). Низкогорный пихтово-еловый лес на юго-восточном макросклоне. Изменения кристалломорфологических и симметричных параметров в различных горизонтах снега в течение зимы 1976/77 гг.

Дата	Возраст, сут.	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура, град.	Компрессия, кг/м <sup>2</sup>	Доля классов форм кристаллов, %						Распределение форм кристаллов по подгруппам симметрии, %				
					II <sub>1</sub>	II <sub>2</sub>	II <sub>3</sub>	II <sub>4</sub>	III <sub>1</sub>	III <sub>2</sub>	ГГ	ТГ	Р	Мк	Тк
Припочвенный горизонт 0–2 см															
4/ХП	42	–	–	–	77	12	8	3	0	18	20	20	37	5	
21/І	90	234	–2.7	159.8	46	11	22	12	9	3	9	28	43	17	
21/Ш	149	308	–3.1	251.0	44	13	7	18	18	1	3	25	55	16	
Горизонт на высоте 13–15 см															
4/ХП	37	–	–	–	85	10	5	0	0	20	27	22	30	2	
21/І	85	227	–4.5	134.9	38	13	41	8	0	6	8	27	40	19	
21/Ш	144	291	–4.7	220.4	39	19	31	11	0	2	6	28	49	15	
Горизонт на высоте 32–34 см															
4/ХП	34	–	–	–	80	20	0	0	0	15	25	25	30	5	
21/І	82	258	–6.3	80.7	61	25	14	0	0	6	9	34	46	5	
21/Ш	141	297	–6.2	159.6	53	25	21	1	0	3	12	38	43	4	
Горизонт на высоте 45–47 см															
4/ХП	32	–	–	–	90	10	0	0	0	10	20	30	35	5	
21/І	80	231	–7.7	45.0	62	22	16	0	0	3	6	32	50	9	
21/Ш	139	280	–7.3	111.8	54	18	26	2	0	4	5	41	45	5	
Горизонт на высоте 60–63 см															
21/І	57	226	–9.7	13.6	68	21	11	0	0	3	3	23	61	10	
21/Ш	116	255	–8.8	69.3	66	19	15	0	0	4	10	43	38	5	

*Примечание.* Подгруппы симметрии: ГГ – гексагональная; ТГ – тригональная; Р – ромбическая; Мк – моноклиная; Тк – триклиная.

искаженном росте связано с односторонней кристаллизацией, направленной навстречу потоку питательного вещества [8]. Формы “криволинейной симметрии” (гомологии) широко распространены среди живых организмов. Можно сказать, что по своим внешним признакам криволинейные и кривореберные скелетные формы гораздо более изоморфны телам живой природы, нежели другие кристаллические образования с классической (прямолинейной) симметрией.

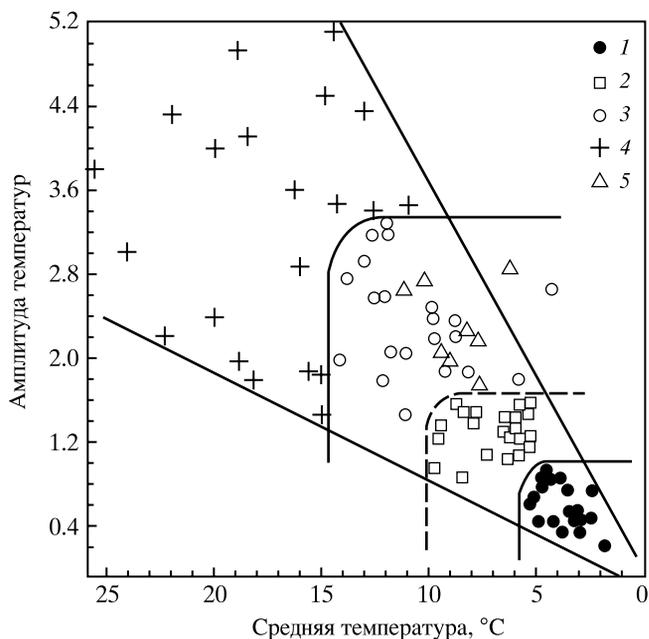
**Регрессивный метаморфизм** как заключительный этап сублимационно-метаморфического цикла есть “движение” кристаллических индивидов и снежных горизонтов вспять, по линии упрощения их структуры и приближения к состоянию с наибольшей энтропией. Это второй качественный скачок в метаморфическом цикле. Появляются секториальные выросты по ребрам кристаллов, затем последние расщепляются и распадаются на отдельные чешуйчатые пластинки (рис. 1Л,

М). Постепенно пластинки также исчезают, и горизонт переходит в *стадию сублимационной фирнизации*. Снег становится мучнистым и состоит исключительно из мельчайших зернистых частиц. Процесс идет при относительно неизменных внешних условиях, поэтому может быть назван “старением” снега. Наступает состояние, аналогичное гиперморфозу живых организмов, – переразвитию индивидуума, которое свойственно очень быстрой эволюции [26], что и наблюдается в припочвенных слоях снежной толщи (см. рис. 3А). На протяжении секториальной и пластинчатой стадий средний радиус частиц уменьшается до 1.2–0.8 мм. Состав форм в горизонте резко обедняется (исчезают многие скелетные и гранные формы), мера сложности горизонта снижается до 1.5 бит и менее. В конечных индивидах уже не остается следов и приближенной симметрии, полностью преодоленной асимметрией неупорядоченной среды.

Регрессивный метаморфизм вызван, по-видимому, двумя причинами. С одной стороны, приспособление растущего кристалла к среде и специализация его механизмов роста достигают своего предела и оказываются в неразрешимом противоречии с его внутренним стремлением к совершенству формы. В процессе скелетного роста среда настолько внедряется в состав кристалла и так активно “распоряжается” его ростом [24], что кристалл, в конце концов, теряет свою индивидуальность как целостное образование: “... при максимальной специализации организм идет навстречу вымиранию” [26, с. 404], поскольку более специализированные формы менее адаптированы к изменениям во внешней среде [15]. С другой стороны, в нижних горизонтах при возрастающей нагрузке лежащими выше слоями (см. табл. 1, графу “компрессия”) развиваются хрупкие деформации кристаллов – одна из главных причин старения и разрушения минеральных индивидов. Аналогичные процессы уже давно подмечены в мире минералов. “Химические и физические изменения минерала, способные привести его к полному уничтожению, – вот что старит минерал и подводит его к гибели” [9, с. 165–166].

Описанная эволюционная модель снежного покрова не требует прохождения множества “форма кристалла”, “снежный горизонт” и “снежная толща” обязательно через все периоды и стадии (фазы) перекристаллизации снега в любых зимних условиях. Речь идет об инвариантном процессе сублимационного метаморфизма как основной тенденции эволюции сухого снежного покрова. Вариантность и скорость реализации этого процесса осуществляются в соответствии с параметрами термического поля в снежной толще (рис. 4).

**Модели авторегуляции метаморфизма в снежных горизонтах.** Эволюция снежного покрова имеет не только однозначно детерминированные, но и вероятностные закономерности, что выражено наличием в нем процессов *авторегуляции метаморфизма*. Известный постулат эволюционной биологии гласит: “Всякое развитие есть, по меньшей мере, авторегуляция” [25, с. 45]. Необходимо различать два типа регулирования динамики снежных горизонтов: 1) *саморегуляцию* (“движение” горизонтов по одной из исходно “заданных”, метеоусловиями зимы программ развития и последующее возрастное наращивание их структуры); 2) *регулирование их извне* под влиянием атмосферных возмущений (потеплений или похолоданий, снегопадов, метелевых явлений и др.). В основе саморегуляции лежит стадийное развитие кристаллических



**Рис. 4.** Температурные условия различных вариантов роста кристаллов в снежном покрове (по данным стационарных наблюдений зимой 1968/69 г.).

*Столбчатые варианты:* 1 – интенсивный, 2 – умеренный, 3 – медленный, 4 – плоский и смешанный варианты, 5 – вариант неустойчивого режима, при частых возмущениях гидротермического поля в снегу.

форм при внутренних взаимодействиях в СГ (см. выше). Внешние же сигналы переводят снежный горизонт с одной программы развития на другую и тем самым не только ускоряют или, наоборот, замедляют общую скорость метаморфизма, но и приводят нередко к иным структурным результатам, чем “задавалось” вначале. Первое явление есть *направленный и упорядоченный во времени эволюционный процесс*, второе – *процесс регулирующий, ненаправленный и неупорядоченный во времени*.

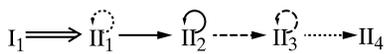
Механизмы авторегуляции снежных горизонтов могут быть прослежены в переходах каждого из них из одной фазы в другую, т.е. при сопоставлении структурных изменений, происшедших в течение данного периода (шага) времени. Такие переходы носят *принципиально вероятностный характер*, что обусловлено неравномерностью роста различных кристаллов одного и того же возраста. Процессы авторегуляции метаморфизма СГ вскрываются с помощью матриц и графов вероятностей переходов одних кристаллических классов и типов в другие на протяжении данной серии временных шагов. Приведем пример изменений процентного содержания форм кристаллов в некотором горизонте на протяжении первого шага (34 сут.) после его возникновения:

	$I_1$	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$
а) исходное состояние .....	100	0	0	0	0
б) состояние в конце шага.....	0	24	42	17	17

Используя метод, предложенный в работе [29], составим стохастическую матрицу переходов рассматриваемого шага:

↓	$I_1$	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$
$I_1$	0	0	0	0	0
$\Pi_1$	1.00	0.24	0	0	0
$\Pi_2$	0	0.76	0.55	0	0
$\Pi_3$	0	0	0.45	0.50	0
$\Pi_4$	0	0	0	0.50	0

Соответствующий кинематический граф переходов имеет вид:

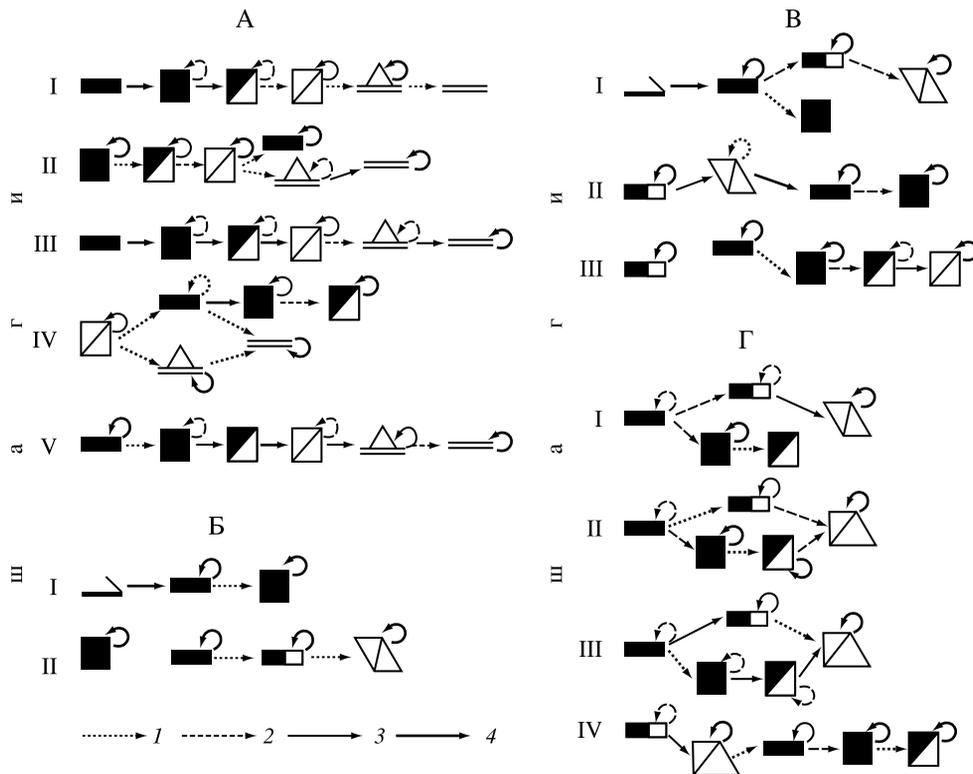


Здесь частоты переходов равны:

0.01–0.25(----->), 0.26–0.50(---->), 0.51–0.75(--->), 0.76–1.00 (--->).

**Процесс саморегуляции** наблюдается при длительном сохранении начальной программы метаморфизма. В нижних слоях снежной толщи сообщество кристаллов на протяжении одного–двух первых шагов (месяцев) проходит практически всю элементарную цепь преобразований по столбчатому алгоритму, нередко достигая уже ко второму шагу фазы с преобладанием  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$  форм (рис. 5А). “Центр тяжести” переходов сосредоточен на скелетных индивидах. Дальнейшие преобразования СГ связаны с *возрастным наращиванием* мощности классов форм кристаллов, процесс которого носит *колебательный, циклический характер*.

Каждый цикл начинается с разрыва элементарной цепи после стадий гранных призм или между ними. В процессе интенсивного скелетного роста исчерпываются все наиболее развитые гранные кристаллы. Наступает “дефицит эволюционного материала” [17], подготовленного для перехода в новую стадию, что вызывает разрыв цепи. Дефицит нейтрализуется за счет появления



**Рис. 5.** Стохастические структурные модели авторегуляции сублимационного метаморфизма в горизонтах снежной толщи. *Модели саморегуляции (саморазвития):* А – полная столбчатая программа; прослеживаются линейный цикл преобразований форм кристаллов и два цикла возрастного усложнения структуры горизонта; Б – неполная плоская программа (столбчатые гранные индивиды скелетных форм не дают). *Модели регуляции метаморфизма извне:* В – полигенетическая программа с одним необратимым возмущением, переходом от плоского алгоритма к столбчатому; Г – полигенетическая программа с одновременным плоским и столбчатым ростом кристаллов; плоский скелетный рост начинается раньше и идет быстрее, чем столбчатый. *Вероятности (частоты) переходов одних классов форм в другие:* 1 – 0.01–0.25; 2 – 0.26–0.50; 3 – 0.51–0.75; 4 – 0.76–1.00. 1 шаг  $\approx$  25–35 дней. Остальные обозначения см. на рис. 2Б.

**Таблица 2.** Пример матриц трансформации кристаллических форм: реально наблюдаемой в некотором горизонте снежной толщи (А) и согласно марковскому процессу (Б). Продолжительность шага – 25–35 дней

А							Б						
↓	■	■	▧	▧	⌒	≡	↓	■	■	▧	▧	⌒	≡
■	0	0	0	0	0	0	■	0	0	0	0	0	0
■	1.00	0.49	0	0	0	0	■	1.00	0.49	0	0	0	0
▧	0	0.51	0.38	0	0	0	▧	0	0.51	0.38	0	0	0
▧	0	0	0.62	0.86	0	0	▧	0	0	0.62	0.86	0	0
⌒	0	0	0	0.14	0.80	0	⌒	0	0	0	0.14	0.80	0
≡	0	0	0	0	0.20	1.00	≡	0	0	0	0	0.20	1.00
<i>I шаг</i>													
↓	■	■	▧	▧	⌒	≡	↓	■	■	▧	▧	⌒	≡
■	0	0	0	0	0	0	■	0	0	0	0	0	0
■	0	0.88	0	0	0	0	■	1.49	0.24	0	0	0	0
▧	0	0.12	0.71	0	0	0	▧	0.51	0.44	0.14	0	0	0
▧	0	0	0.29	0.80	0	0	▧	0	0.32	0.77	0.74	0	0
⌒	0	0	0	0.11	0.40	0	⌒	0	0	0.09	0.23	0.64	0
≡	0	0	0	0	0.60	1.00	≡	0	0	0	0.33	0.36	1.00
<i>II шаг</i>													
↓	■	■	▧	▧	⌒	≡	↓	■	■	▧	▧	⌒	≡
■	0.75	0	0	0	0	0	■	0	0	0	0	0	0
■	0.25	0.28	0	0	0	0	■	0	0.49	0	0	0	0
▧	0	0.72	0	0	0	0	▧	0	0.51	0	0	0	0
▧	0	0	1.00	0.42	0	0	▧	0.26	0.20	0.12	0.10	0	0
⌒	0	0	0	0.58	0.62	0	⌒	0.26	0.27	0.18	0.14	0.03	0
≡	0	0	0	0	0.32	1.00	≡	0.47	0.53	0.70	0.74	0.97	1.00
<i>III шаг</i>													

*Примечание.* Стрелками показано направление переходов. Обозначения форм кристаллов см. на рис. 1Б.

и развития новой (второй) возрастной генерации кристаллических сообществ, начиная с плоских гранных призм, частично замещающих скелетные и пластинчатые формы (второй и четвертый шаги на рис. 5А). Это и есть *стабилизирующий отбор*.

“Волна” дефицита кристаллов в каждом цикле проходит по всей элементарной цепи, вызывая серию соответствующих реакций в каждом ее звене. Цикл заканчивается восстановлением элементарной цепи и возобновлением интенсивного скелетного роста (третий и пятый шаги на рис. 5А). При каждом цикле наращивания форм кристаллов горизонт как бы возвращается к начальным этапам конструктивного метаморфизма. Периодическое “омоложение” кристаллических сообществ в СГ, обусловленное исключительно его саморазвитием, может существенно менять механические свойства снега даже при неизменных внешних условиях.

Таким образом, возрастное усложнение структуры горизонта есть форма его саморегулирования, направленного на *стабилизацию структуры в пределах прогрессивного развития*, к полному или временному предотвращению наступления регрессивного метаморфизма, ведущего к уничтожению скелетных частиц как наиболее высокоорганизованных.

Эффект стабилизации структуры снежного горизонта отчетливо прослеживается при сравнении реальных шагов его эволюции с шагами расчетной “марковской машины”, где все относительные частоты переходов заданы по первому шагу [19]. При марковском регулировании горизонты должны прийти к концу зимы в такие состояния, когда встречаемости конечных форм кристаллов и вероятности перехода в эти формы становятся почти одинаковыми и близкими к 1. В действительности же благодаря эффекту стабилизации они обычно не достигают подобных

состояний (табл. 2). Чем интенсивнее рост кристаллов, тем раньше стабилизируется структура горизонта и тем больше разница в частотах переходов между реальным и марковским процессами авторегуляции метаморфизма. Эта разница и есть та поправочная мера, которую, по-видимому, следует вводить при прогнозировании структуры снежного горизонта на каждый следующий временной шаг.

Плоскому варианту метаморфизма свойствен рост скелетных кристаллов непосредственно из плоских гранных призм, поэтому уже через месяц может появиться значительное количество скелетных форм (рис. 5Б). Столбчатые гранные формы растут медленно, постепенно теряют базу своего развития и деградируют. Преобладают длительная стабилизация форм и слабая интенсивность переходов, благодаря чему элементарная цепь графа сохраняется в течение нескольких шагов.

**Регуляция метаморфизма снега извне** осуществляется атмосферными сигналами, которые вызывают перестройку текущей программы преобразований СГ, с плоской на столбчатую или наоборот. Идет непрерывный процесс адаптации развивающегося кристаллического сообщества к изменчивой окружающей среде (*адаптивный отбор*).

Наиболее частый тип возмущений свойствен слоям, которые долго находились вблизи снежной поверхности и испытывали сильное выхолаживание и резкие колебания температуры, а затем были погребены под новыми слоями снега и оказались в более умеренных термических условиях. Аналогичный эффект может дать длительное устойчивое потепление. В рассматриваемом примере такое воздействие фиксируется на втором шаге переходов (рис. 5В). Резкое возмущение метаморфического алгоритма вызывает распад и последующее исчезновение плоской цепи развития. Число скошенных скелетных форм резко сокращается, “центр тяжести” переходов смещается на гранные столбчатые призмы, которые уже обнаруживают признаки скелетизации. Однако горизонт, будучи “отброшенным” возмущающим сигналом на две фазы назад (от скелетной до гранной столбчатой), может до конца зимы так и не достигнуть состояния “зрелой” глубинной изморози.

В верхних горизонтах нередко реализуются смешанные варианты метаморфизма с одновременным развитием как плоских, так и столбчатых форм кристаллов. Плоская цепь переходов обычно опережает столбчатую (первый шаг, рис. 5Г). В дальнейшем при достижении и столбчатыми кристаллами скелетной стадии роста обе цепи смыка-

ются. Пульсирующие “волны” дефицита гранных частиц, готовых к скелетизации, проходят поочередно по каждой цепи, вызывая соответствующие ослабления и усиления частот переходов. При общем повышении температуры в конце зимы плоская цепь обычно распадается и “центр тяжести” переходов смещается на столбчатую ветвь, с одновременным общим замедлением сублимационных процессов (четвертый шаг, рис. 5Г).

В целом перевод снежного горизонта со столбчатой программы роста кристаллов на плоскую ускоряет процесс “созревания” глубинной изморози, а обратное смещение алгоритма с плоского на столбчатый ведет к замедлению этого процесса. Необходимо вводить соответствующие поправки в траекторию саморазвития кристаллических сообществ на эффект атмосферных возмущений при прогнозировании структуры тех или иных горизонтов снежной толщи, что позволит определить более реальное время перехода их в лавиноопасное состояние.

**Обсуждение результатов.** Ведущим фактором эволюции в природе служат противоречия, возникающие в процессе взаимодействия компонентов рассматриваемой системы и окружающей среды. Скорость эволюции, интенсивность перестройки природных систем зависят от степени этого несоответствия [17], что и подтверждается процессами реального кристаллообразования, в том числе и в снежном покрове. Налицо проявление одного из фундаментальных законов естествознания – *принципа самодвижения открытых материальных систем*.

Как известно, “краеугольный камень” дарвинизма – положение о том, что “... направление эволюции определяется не прямым влиянием внешних условий, а сложными противоречиями, разрешающимися в процессе естественного отбора, т.е. взаимодействиями между особями внутри популяции, между популяциями, а также с абиотической средой” [10, с. 42]. То же самое можно сказать и об эволюционных процессах в толще снега. Скелетные индивиды возникают как результат внутренних взаимодействий в толще снега – постоянного обострения и разрешения противоречий между стремлением растущего кристалла к созданию совершенной постройки, с одной стороны, и условиями окружающей его среды, к которым он вынужден приспосабливаться в процессе своего роста, – с другой [23]. Это придает сублимационному метаморфизму снега определенные черты независимости – инвариантности. “Независимость – это такое же фундаментальное явление природы, как наличие взаимозависимости”

[1, с. 10). Внешняя среда играет роль стрелочного механизма, переключающего траекторию метаморфического цикла снега на ту или иную программу (вариант) развития (см. рис. 4).

Адаптация – не материальная основа и не главная движущая сила эволюции, а только регулирующий механизм процессов саморазвития, лежащих в основе всякой эволюции [25]. Горизонты снежной толщи как *полиморфные гляциосистемы* обладают высокой структурной пластичностью. Устойчивость их структуры (гомеостаз) в каждый момент времени сочетается с эволюционной мобильностью (гомеорезом), которая обеспечивает их поступательное движение, несмотря на колебания метеорологических условий и изменения режима снегонакопления.

В цепи линейных преобразований:  $I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow II_1 \rightarrow II_2 \rightarrow II_3 \rightarrow II_4$ , – кристаллы имеют со средой положительные обратные связи, которые вызывают самоусиление конструктивного метаморфизма, т.е. придают ему экспоненциальный характер. При достижении скелетной фазы положительные обратные связи в горизонте периодически сменяются на отрицательные, которые стабилизируют достигнутое состояние. Такие связи осуществляет возрастное самоусложнение структуры горизонтов.

Системам с отрицательной обратной связью свойственны колебательные режимы [18]. Если горизонт уже перешел к регрессивному метаморфизму, то циклы возрастного наращивания структуры стремятся вернуть его обратно в скелетное фазовое состояние. Горизонт как бы осциллирует вокруг состояния гомеостаза, удаляясь от него и приближаясь к нему – то с одной, то с другой стороны. Если же отрицательная обратная связь появляется до наступления скелетной фазы, то такие осцилляции имеют вид возвратных колебаний с постепенным приближением горизонта к своему устойчивому состоянию после каждого цикла.

Описанные колебательные процессы, происходящие в толще снега, по своей форме напоминают известные в эволюционной биологии *популяционные волны*, или “волны жизни”, которые “являются поставщиками эволюционного материала (в нашем случае – новой возрастной генерации кристаллов – Э.К.) под действие относительно интенсивного отбора” [17, с. 70]. Такие “волны” способствуют продлению периода конструктивного метаморфизма в снежном горизонте путем периодического наращивания его структуры. Возрастное увеличение разнообразия форм в сообществе обусловлено фактором “эволюцион-

ного времени” [15], поэтому “зная направление отбора, изучая закономерности эволюции ..., мы можем с той или иной степени точности предсказать направление эволюции данной группы” [17, с. 199]. В этом суть теории прогнозного направления структурного снеговедения.

“Закономерности эволюции определяются взаимодействием сил внутри данной системы; ...организация системы с ее внутренними силами вводит массовые случайные явления в русло закономерных, строго направленных процессов. Это положение получило огромное значение в современной физике” [25, с. 85]. Оно, несомненно, должно найти достойное место в теории структурного снеговедения. Можно утверждать, что *внешняя среда – фактор полиморфизма имманентных эволюционных процессов в толще снега*. Она обуславливает пространственную и временную неравномерность сублимационного метаморфизма и соответствующее многообразие природных структур снежной толщи.

**Закключение.** Общее методологическое значение эволюционного подхода к изучению снежного покрова как *сложно организованного кристаллического сообщества* состоит в том, что представления о метаморфизме снега удастся привести в соответствие с положениями о развитии систем как об их “самодвижении” от простого к сложному на основе их внутренних процессов. Проведенный анализ и синтез показали, что развитие снежных структур по своей форме подчинено тем же фундаментальным закономерностям, которые свойственны биотическим системам. Это открывает широкие перспективы использования основных положений теории эволюции, разработанных биологическими науками и уже нашедших эффективное применение в генетической минералогии, при изучении структуры и метаморфизма снежного покрова. “Биология и минералогия ... есть две науки о наиболее высокоорганизованной материи, существующей в форме систем с высочайшей степенью самоорганизованности, саморазвития, автономности” [31, с. 5]. Это позволяет “утверждать существование *биоминеральных гомологий* (курсив автора – Э.К.) на морфологическом, функциональном, онтогенетическом, филогенетическом, парагенетическом уровнях” [там же, с. 15].

Интересной представляется еще одна аналогия эволюционного снеговедения с эволюционной экологией. Фазовую траекторию снежного горизонта можно рассматривать как *сукцессию кристаллических сообществ*, которая характеризует стратегию их самоорганизации [39]. При этом

“меняющееся в зависимости от внешних возмущений и физических градиентов положение в сукцессионной последовательности определяется его эволюционной стратегией (дарвиновский отбор, конкурентное исключение)” [14, с. 191].

Проявление всеобщего закона эволюции как процесса саморазвития географических систем убедительно показали В.М. Дэвис и Л. Кинг в геоморфологических циклах эрозии и развития рельефа, В.В. Докучаев в процессах почвообразования, А.Е. Ферсман – в генезисе минералов, Б.Б. Полюнов – в стадийности выветривания горных пород, наконец, В.Н. Сукачев – в сукцессионной динамике биогеоценозов. Совершенно очевидно, этот же закон отчетливо проявляется и в сублимационно-метаморфических преобразованиях сезонного снежного покрова.

Правомерно полагать, что концепция эволюционного снеговедения способна войти в научно-методический арсенал не только ландшафтной индикации и разработки прогнозов снежных лавин. Вполне определенно просматривается более широкий методологический аспект концепции – а именно в области изучения *биосферных процессов*, многие закономерности которых могут чрезвычайно ярко проявиться в кристалломорфологии и метаморфизме снежной толщи. Снежный покров по существу представляет собой весьма благоприятную и притом “быстротекущую” природную модель для изучения целого ряда эволюционных процессов, которые были в геологическом и историческом прошлом и происходят ныне как в неорганической природе, так и в биотической среде. В этом состоит, по мнению автора, общенаучное значение эволюционного снеговедения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берг Р.Л., Ляпунов А.А. Предисловие к книге И.И. Шмальгаузена “Кибернетические вопросы биологии”. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1968. С. 5–13.
2. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 280 с.
3. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 374 с.
4. Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера. М.: Наука, 1994. 671 с.
5. Войтковский К.Ф. Лавиноведение. М.: Изд-во МГУ, 1989. 157 с.
6. Голубев В.Н., Фролов А.Д. Модель структуры и механических свойств сухого зернистого снега // Матер. гляциологич. исследований. 2006. Вып. 100. С. 19–24.
7. Голубев В.Н., Петрушина М.Н., Фролов Д.М. Закономерности формирования стратиграфии снежного покрова // Лед и снег. 2010. № 1 (109). С. 58–72.
8. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львовск. ун-та, 1961. 284 с.
9. Жабин А.Г. Жизнь минералов. М.: Сов. Россия, 1976. 221 с.
10. Завадский К.М., Георгиевский А.Б. К оценке эволюционных взглядов Л.С. Берга // Берг Л.С. Труды по теории эволюции. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. С. 7–42.
11. Коломыц Э.Г. Структура снега и ландшафтная индикация. М.: Наука, 1976. 206 с.
12. Коломыц Э.Г. Методы кристалломорфологического анализа структуры снега. М.: Наука, 1977. 199 с.
13. Куваева Г.М. О росте кристаллов в снежном покрове // Матер. гляциологич. исследований. Хроника, обсуждения. 1965. Вып. 11. М.: Изд-во АН СССР, С. 271–274.
14. Одум Ю. Экология. Т. 2 / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 376 с.
15. Пианка Э. Эволюционная экология / Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 399 с.
16. Рихтер Г. Д. Снежный покров // Советская география. Итоги и задачи. М.: Географгиз, 1960. С. 310–319.
17. Тимофеев-Ресовский Н.В., Воронцов Н.Н., Яблоков А.В. Краткий очерк теории эволюции. М.: Наука, 1977. 301 с.
18. Уоддингтон К.Х. Основные биологические концепции // На пути к теоретической биологии. Т. I. М.: Мир, 1970. С. 5–15.
19. Харбух Дж., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии / Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 319 с.
20. Хонигман Б. Рост и форма кристаллов. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 224 с.
21. Шафрановский И.И. Лекции по кристалломорфологии. М.: Высш. шк., 1968. 174 с.
22. Шафрановский И.И. Симметрия в природе. Л.: Недра, 1968. 184 с.
23. Шефталь Н.Н., Бузынин А.Н. К моделированию процессов роста кристаллов // Рост кристаллов. Т. X. М.: Наука, 1974. С. 25–36.
24. Шефталь Н.Н., Коломыц Э.Г. Эволюция конечных форм роста кристаллов в зависимости от входящей среды в их состав // Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae. 1973. Т. 33. № 3–4. Р. 335–351.
25. Шмальгаузен И.И. Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1968. 223 с.

26. Шмальгаузен И.И. Проблемы дарвинизма. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1969. 493 с.
27. Шубников А.В., Копцик В.А. Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972. 340 с.
28. Шубников А.В., Парвов В.Ф. Зарождение и рост кристаллов. М.: Наука, 1969. 210 с.
29. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 432 с.
30. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. 291 с.
31. Юшкин Н.П. Биоминеральные взаимодействия // XLII чтения им. В.И. Вернадского. М.: Наука, 2002. 59 с.
32. Adams E.E., Jepsen St. M., and Close B. A bonding process between grains in mechanically disaggregated snow // *Annals of Glaciology*. 2008. Vol. 48. P. 6–12.
33. Bartelt P.B. and Lehning M. A physical SNOWPACK model for Avalanch Warning Service. Pt I: Numerical Model // *Cold Region Science and Technology*. 2002. Vol. 35. P. 123–145.
34. Brun E., David P., Sudul M., and Brunot G.A. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting // *Journ. of Glaciology*. 1992. Vol. 38. No. 128. P. 13–22.
35. Fierz Ch., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., and Sokratov S. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground (UNESCO, IHP–VII, Technical Documents in Hydrology, No. 83). Paris, IACS, 2009. 67 p.
36. Kobayashi T. On the variation of ice crystal habit with temperature // *Inst. Low Temperat. Sci. Phys. Sci*. 1966. No. 781. P. 95–104.
37. Nakaya U. Snow crystals: natural and artificial. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1954. 288 p.
38. Pinzer B.R., Schneebeli M., and Kaempfer T.U. Vapor flux and recrystallization during dry snow metamorphism under a steady temperature gradient as observed by time-lapse micro-tomography // *The Cryosphere*. 2012. Vol. 6. P. 1141–1155.
39. Valiela I. Food specificity and community succession: Preliminary ornithological evidence for a general framework // *Gen. Syst*. 1971. Vol. 16. P. 77–84.

## Snow Cover Metamorphism as Evolutionary Biosphere Process

E.G. Kolomyts

*Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences, Togliatti, Russia  
e-mail: egk2000@mail.ru*

The concept of development of snow cover structure based on its crystal morphology, as well as the fundamental laws of natural symmetry is presented. Deterministic and stochastic empirical models describing the sublimation-metamorphic cycle of snow cover as an evolutionary biosphere process have been developed. The stadiality of forms of crystal growth and polymorphic self-development of snow horizons were identified. It is shown that snow cover is a natural model for the study of a number of evolutionary processes which were in the geological and historical past and occur today as in inorganic nature, so and in the biotic environment.

**Keywords:** snow cover, structure, crystal morphology, symmetry, sublimation-metamorphic cycle, auto-regulation, evolution, biosphere process.

doi: 10.15356/0373-2444-2016-2-61-74