

УДК 551.578.46(571.56)

## Геохимия снежного покрова таёжных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии

© 2014 г. В.Н. Макаров

Институт мерзлотоведения СО РАН, Якутск

makarov@mpi.ysn.ru

Статья принята к печати 15 ноября 2013 г.

Геохимия, криосфера, ландшафты, снежный покров, Якутия.  
Cryosphere, geochemistry, landscapes, snow cover, Yakutia.

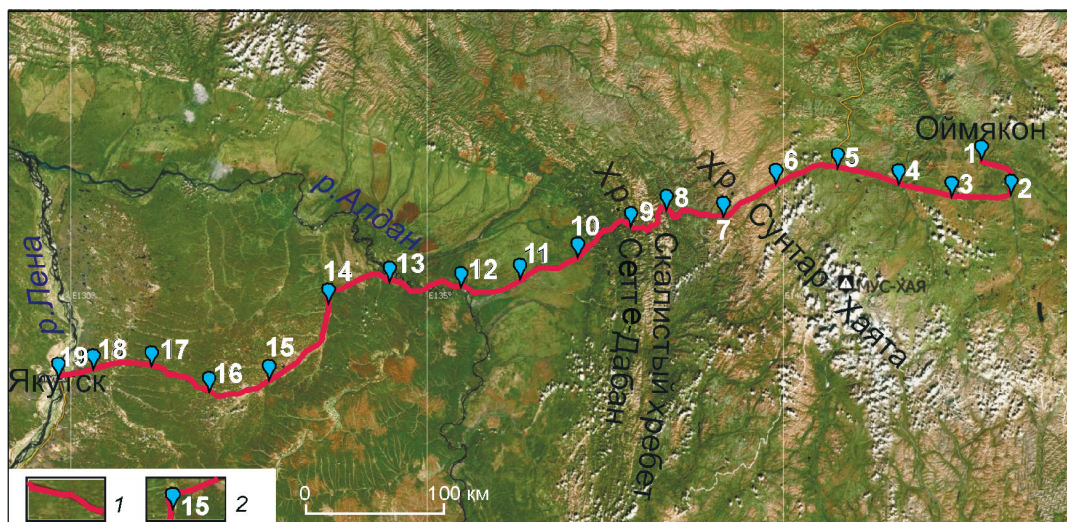
Исследован снежный покров в разных типах ландшафтов Якутии. Установлено, что химический состав снега таёжных и горных мерзлотных ландшафтов хлоридно-гидрокарбонатный или гидрокарбонатный натриево-кальциевый с небольшим содержанием сульфатов. Преобладающее влияние на формирование химического состава снега оказывают соли континентального происхождения, преимущественно соединения углерода. В ландшафтах горных пустынь, где преобладает региональный перенос, наряду с углеродом, значительная роль в атмосферных выпадениях холодного времени года принадлежит аммонийным соединениям азота. Суммарное поступление растворимых и нерастворимых форм макрокомпонентов в снежный покров снижается при переходе от равнин к горным территориям, но распределение микроэлементов в снежном покрове не подчиняется высотной зональности. Максимальное содержание тяжёлых металлов (Mn, Cu, Pb, Cd), F и Sr в снежном покрове отмечено в ландшафтах горных редколесий и горных тундр. Над зонами разломов наблюдается интенсивная миграция в подошвенные слои снега химических элементов, типоморфных для рудной минерализации: S, F, Cu и Cd.

Снежный покров в Восточной Сибири очень чувствителен к изменениям климата. Ожидается, что в XXI в. температура в этом регионе превысит глобальное среднее значение, а в связи с общим усилением гидрологического цикла увеличится и количество осадков. Изучение химического состава снежного покрова позволяет получить качественные и количественные характеристики сухих и влажных выпадений из атмосферы в холодный сезон [1]. Снег — удобный индикатор химического загрязнения атмосферного воздуха и атмосферных осадков, а также последующего гидро- и литохимического загрязнения ландшафтов. В 2010–2012 гг. для уточнения различных характеристик снежного покрова, лучшего понимания роли снежного покрова в климатической системе Субарктики, более надёжной оценки количества снега в криосфере и изучения его химического состава были проведены снегосъёмки в мерзлотных ландшафтах Якутии, где химический состав снежного покрова ранее не изучался. Основная цель исследования — изучение химического состава снежного покрова широтно-зональных и высотно-поясных мерзлотных ландшафтов Центральной и Восточной Якутии. Тайга, постоянные антициклоны, рекордно низкая влажность, редкие очаги техногенеза создали в Якутии чистый, сухой и прозрачный воздух, идеальный для изучения геохимии снежного покрова фоновых районов.

### Методика исследований

Маршрут, протяжённостью 800 км, начинался к востоку от г. Якутск, пролегал вдоль федеральной автотрассы «Колыма», пересекал таёжные и горные мерзлотные ландшафты и заканчивался в Оймяконе — самом холодном населённом пункте на Земле. В 1926 г. академиком С.В. Обручевым в Оймяконе была вычислена температура, равная  $-71,2^{\circ}\text{C}$ . В районе трассы маршрута находятся две станции многолетних метеорологических наблюдений (ГМС): Якутск и Оймякон. Трасса маршрутных наблюдений пересекает восточную часть Центрально-Якутской таёжной низменной равнины, южную часть Верхоянской цепи Верхояно-Колымской горно-складчатой области и Яно-Индибирского гольцового тундрово-таёжного нагорья, а также районы распространения широтно-зональных (среднетаёжный) и высотно-поясных (горно-пустынный, горно-тундровый и горно-редколесный) типов мерзлотных ландшафтов [7]. Перепад высот в местах отбора проб снега по маршруту составил 1101 м — от 90 м до 1191 м (рис. 1). Пункт наблюдений с максимальной абсолютной отметкой (2440 м) находился в стороне от маршрута — в районе гор Мус-Хая (Ледяная гора).

Расстояние между пунктами наблюдений по маршруту составляло 50 км. Участки наблюдений располагались в типичном ландшафте, на расстоянии 150–200 м от автодороги. Общее число пунк-



**Рис. 1.** Схема маршрута Якутск – Оймякон:  
 1 – маршрут исследований; 2 – пункты наблюдений  
**Fig. 1.** Survey route, Yakutsk to Oymyakon.  
 1 – route studies; 2 – observation points

тов наблюдений – 58. В каждом пункте проводилось 5–6 измерений толщины снежного покрова и определений его плотности с использованием цилиндрического пробоотборника с поперечным сечением  $0,005 \text{ м}^2$ ; измерялась также температура воздуха и снега (на поверхности и на почве). Для химического анализа на пыль и ионы отбирались пробы на всю толщину снежного покрова. Химический анализ проб снеговой воды выполнен в лаборатории геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения СО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU 0001.518584) аналитиками Л.Ю. Бойцовой, Р.М. Петуховой и О.В. Шепелевой.

### Результаты и обсуждение

Ландшафтно-маршрутные исследования ежегодно проводились в марте. Метеорологические показатели холодных сезонов 2010–2012 гг. соответствуют норме в многолетнем ряду [8]. Средняя температура воздуха по маршруту в начале марта (2010 г.) составила  $-31,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в двадцатых числах месяца (2012 г.) – минус  $13,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура снега на поверхности почвы была относительно постоянной и заметно повышалась к концу марта в относительно низкогорных среднетаёжных ландшафтах: с  $-19,9 \text{ }^\circ\text{C}$  (2010 г.) до  $-12,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (2012 г.). Минимальная температура снега на поверхности почвы наблюдалась преимущественно в ландшафтах горных редколесий, максимальная ( $-11,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) – в начале марта в ландшафтах горных пустынь, что объясняется температурной инверсией, а в низ-

когорных ландшафтах – весенним потеплением. В табл. 1 приведены полученные нами данные о температуре воздуха и снега на поверхности почвы, а также показания температуры воздуха на ГМС Якутск и Оймякон в эти дни.

На большей части региона снежный покров залегает 220–250 дней в году, в горных районах его продолжительность достигает 260–280 дней. Толщина снежного покрова вследствие антициклонального режима погоды сравнительно невелика. В среднетаёжных ландшафтах – 29–45 см, в ландшафтах горных пустынь (выше 1000 м) она уменьшается до 22–32 см (табл. 2). По данным ГМС Оймякон, толщина снега с начала марта и до середины апреля 2010 г. оставалась постоянной. В 2011 и 2012 г. на ГМС Оймякон (с середины марта) и на ГМС Якутск толщина снежного покрова устойчиво снижалась и осадков практически не наблюдалось. Отмечаются некоторые особенности залегания снега, связанные с ландшафтной поясностью. В горно-таёжных ландшафтах, на верхней границе лесов, средняя толщина снежного покрова составляет 41 см. В расположенных выше горных ландшафтах (редколесья, тундры, пустыни) она уменьшается до 27–29 см. Вероятно, к верхней границе леса сносится большое количество снега с безлесных горных пространств. Подобная ситуация отмечалась ранее М.И. Ивероновой [2].

Снежный покров в регионе весьма рыхлый. Снег выпадает очень сухой и мало уплотняется в течение зимы. К началу снеготаяния его плот-

Таблица 1. Средние значения температуры воздуха и снега на почве  $T_{cp}$ , °С\*

Мерзлотные ландшафты (абс. отметки, м)	5–8.03.2010 г.	11–14.03.2011 г.	20–23.03.2012 г.
Среднетаёжные (100–400)	28,7/19,9	21,5/11,8	11,0/12,2
Горно-таёжные (400–600)	29,6/17,5	16,6/13,6	14,1/14,4
Горные редколесья (600–800)	38,0/18,7	26,3/20,1	13,0/19,5
Горные тундры (800–1000)	32,6/21,5	20,6/15,6	15,4/14,6
Горные пустыни (1000–1200)	27,9/11,8	25,4/15,8	13,3/14,6
ГМС Якутск (101)	23,6/Нет свед.	22,4/Нет свед.	23,2/Нет свед.
ГМС Оймякон (741)	31,9/Нет свед.	31,9/Нет свед.	32,4/Нет свед.
Среднее	31,4/17,9	22,1/15,4	13,4/15,1
Диапазон колебаний	13,5–30,2/11,8–24,2	11,4–21,6/2,9–21,4	1,9–23,8/5,6–22,9

\*В числителе – температура воздуха, в знаменателе – температура снега на поверхности почвы.

Таблица 2. Средняя толщина снежного покрова, см

Мерзлотные ландшафты (абс. отметки, м)	5–8.03.2010 г.	11–14.03.2011 г.	20–23.03.2012 г.	Среднее
Среднетаёжные (100–400)	29	43	45	39
Горно-таёжные (400–600)	26	40	57	41
Горные редколесья (600–800)	17	35	29	27
Горные тундры (800–1000)	23	28	38	28
Горные пустыни (1000–1200)	32	32	22	29
ГМС Якутск (101)	21	32	36	30
ГМС Оймякон (741)	22	37	23	27
Среднее по маршруту	25	36	38	33

Таблица 3. Усреднённые характеристики снежного покрова; число проб  $n = 58$ 

Мерзлотные ландшафты (абс. отметки, м)	Толщина снега, см	Плотность снега, г/см <sup>3</sup>	Концентрация пыли, мг/л
Среднетаёжные (100–400)	39	0,160	11
Горно-таёжные (400–600)	41	0,154	6
Горные редколесья (600–800)	27	0,152	8
Горные тундры (800–1000)	28	0,138	6
Горные пустыни (1000–1200)	29	0,139	6

ность колеблется от 0,160 г/см<sup>3</sup> в среднетаёжных до 0,138–0,154 г/см<sup>3</sup> в горных ландшафтах. Концентрация пылевых частиц в снежном покрове сравнительно однородна: в горных ландшафтах – 0,006–0,008 г/л и возрастает до 0,011 г/л в относительно населённых среднетаёжных ландшафтах. Наблюдается тенденция уменьшения концентрации пыли с увеличением высоты (табл. 3).

В 2010–2012 гг. отмечался постоянный рост снегозапаса в мерзлотных ландшафтах, его величина возросла почти на 60% по сравнению со

средними многолетними данными, что в значительной степени повлияло на водность рек в период половодья (табл. 4). Исключение составили ландшафты горных пустынь, где снегозапас сократился. Последнее, вероятно, связано с изменением циркуляции воздушных масс и большим влиянием ветров северо-восточного направления в 2012 г. (ГМС Оймякон), что привело к повышению концентрации хлоридов в снежном покрове этих ландшафтов до 3,20 мг/л при средних их значениях в 2010–2011 гг. 0,88 мг/л.

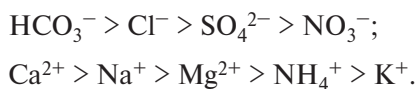
Таблица 4. Изменение влагозапаса снежного покрова, мм

Мерзлотные ландшафты (абс. отметки, м)	2010 г.	2011 г.	2012 г.	Среднее
Среднетаёжные (100–400)	46,4	68,8	80,5	65
Горно-таёжные (400–600)	42,3	64,8	115	74
Горные редколесья (600–800)	23,5	53,2	45,8	41
Горные тундры (800–1000)	35,6	38,6	53,8	43
Горные пустыни (1000–1200)	55,7	45,2	35,4	45
Среднее	41	54	66	54
Коэффициент стока в половодье (р. Индигирка, станция Юрты)	0,31	0,75	0,68	0,39*

\*Приведены среднееголетние значения.

Центрально-Якутская низменность зимой находится под сильным воздействием сибирского антициклона. Преобладает безветренная штилевая погода, при которой земная поверхность сильно выхолаживается. В восточной, более гористой части исследуемой площади ощущается приток влажного воздуха с Тихого океана, поэтому там возможно повышение температуры до  $-20^{\circ}\text{C}$ . Определённую роль играет и то обстоятельство, что, согласно многолетним наблюдениям, на западных и юго-западных склонах, перехватывающих влагонесущие воздушные массы, выпадает больше осадков и толщина снежного покрова достигает здесь 33 мм при средних для холодного времени года 22 мм [4]. По данным, полученным в 2010–2012 гг., на западном и восточном склонах хр. Сетте-Дабан толщина снежного покрова резко не изменялась (табл. 5). В то же время тепляющее действие потока океанского воздуха на склоны западной экспозиции вызывает повышение температуры снега на поверхности почвы на  $4,3^{\circ}\text{C}$  по сравнению с восточными склонами. На западном склоне в снежном покрове наблюдается рост концентраций гидрокарбонатов и хлоридов.

По величине минерализации снеговые воды в районе исследований ультрапресные, с диапазоном изменения в пределах одного порядка –  $8,4\text{--}26,5$  мг/л. Для снежного покрова всех типов мерзлотных ландшафтов, за исключением высокогорных ландшафтов горных пустынь, характерно идентичное соотношение макрокомпонентов:



По соотношению главных ионов химический состав снежного покрова типичен для горных рай-

Таблица 5. Изменение физических и химических показателей снега на западном и восточном склонах хр. Сетте-Дабан (2010–2012 гг.)\*

Показатели	Западный склон, $n = 9$	Вершина, $n = 3$	Восточный склон, $n = 9$
Абс. отметки, м	550–947	1130	797–1070
Температура снега на почве, $^{\circ}\text{C}$	$-12,4$	$-19,3$	$-16,7$
Толщина снега, см	30	27	30
Диапазон изменения толщины снега, см	24–38	20–32	24–35
Плотность снега, г/см <sup>3</sup>	0,160	0,174	0,156
Водный эквивалент, мм	48	47	47
Пыль, мг/л	19	14	24
pH	6,09	6,00	5,77
Минерализация, мг/л	15,07	10,75	14,13
$\text{HCO}_3^-$ , мг/л	11,0	8,17	8,1
$\text{SO}_4$ , мг/л	1,74	1,05	1,63
Cl, мг/л	1,54	1,30	1,35
F, мг/л	0,013	0,013	0,013

\* $n$  – число проб.

онов и подчиняется общей гидрохимической закономерности, в соответствии с которой первый анион пресных и ультрапресных вод –  $\text{HCO}_3^-$ . По химическому составу снеговые воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые. И только в горных ландшафтах тундр и пустынь (выше 800 м), где возрастает относительная концентрация хлоридов, снег становится хлоридно-гидрокарбонатным. Ещё выше, в ландшафтах горных пустынь с абсолютными отметками более 2000 м, минерализация снега снижается до  $2,8$  мг/л. Это обстоятельство может быть связано с резким уменьшением содержания аэрозолей с высотой: в горах на абсолютных отметках 2000–3000 м их примерно в 30 раз меньше, чем над равнинами.

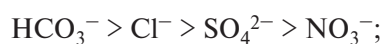
Преобладающее влияние на формирование химического состава снежного покрова и в равнинных, и в горных мерзлотных ландшафтах оказывают соли континентального происхождения. Об этом свидетельствует высокое содержание гидрокарбонатов кальция ( $45\text{--}54\%$ -экв.). Соли морского происхождения составляют всего 18% общего количества солей в снеге. В восточной части маршрута, вблизи зоны влияния Тихого океана, в 250–300 км от Охотского моря, на северных и северо-западных склонах гор Сунтар-Хаята доля морских солей постепенно увеличивается до 22%.

Таблица 6. Химический состав снежного покрова мерзлотных ландшафтов

Мерзлотные ландшафты (абс. отметки, м)	Минерализация, мг/л	pH	Химический состав (формула Курлова)
Среднетаёжные (100–400)	12,4	6,06	$\frac{\text{HCO}_3^- 69 \text{ Cl}^- 17 \text{ SO}_4^{2-} 11 \text{ NO}_3^- 3}{\text{Ca}^{2+} 48 \text{ Na}^+ 25 \text{ Mg}^{2+} 16 \text{ NH}_4^- 7 \text{ K}^+ 4}$
Горно-таёжные (400–600)	11,3	5,73	$\frac{\text{HCO}_3^- 68 \text{ Cl}^- 18 \text{ SO}_4^{2-} 9 \text{ NO}_3^- 5}{\text{Ca}^{2+} 50 \text{ Na}^+ 24 \text{ Mg}^{2+} 15 \text{ NH}_4^- 6 \text{ K}^+ 5}$
Горные редколесья (600–800)	13,8	6,22	$\frac{\text{HCO}_3^- 69 \text{ Cl}^- 14 \text{ SO}_4^{2-} 12 \text{ NO}_3^- 5}{\text{Ca}^{2+} 54 \text{ Na}^+ 20 \text{ Mg}^{2+} 16 \text{ NH}_4^- 6 \text{ K}^+ 4}$
Горные тундры (800–1000)	12,6	5,95	$\frac{\text{HCO}_3^- 66 \text{ Cl}^- 19 \text{ SO}_4^{2-} 11 \text{ NO}_3^- 4}{\text{Ca}^{2+} 45 \text{ Na}^+ 23 \text{ Mg}^{2+} 21 \text{ NH}_4^- 8 \text{ K}^+ 3}$
Горные пустыни (1000–1200)	11,2	5,82	$\frac{\text{HCO}_3^- 64 \text{ Cl}^- 22 \text{ SO}_4^{2-} 11 \text{ NO}_3^- 3}{\text{Ca}^{2+} 47 \text{ Na}^+ 22 \text{ Mg}^{2+} 14 \text{ NH}_4^- 13 \text{ K}^+ 4}$
Горные пустыни (2440–2700)	2,3–3,4	4,7–6,3	$\frac{\text{HCO}_3^- 81 \text{ Cl}^- 12 \text{ SO}_4^{2-} 4 \text{ NO}_3^- 3}{\text{NH}_4^- 37 \text{ Ca}^{2+} 24 \text{ Na}^+ 22 \text{ K}^+ 12 \text{ Mg}^{2+} 5}$

Это связано с выносом сравнительно тёплого и влажного воздуха со стороны Тихого океана – «восточный процесс», как его называют якутские синоптики, характерный для середины зимы [3]. Относительное содержание сульфат-иона в снежном покрове равнинных и горных ландшафтов не превышает 12%-экв. (0,28–2,2 мг/л), что отражает низкий уровень техногенного влияния в регионе. Величина pH в снежном покрове всех типов ландшафтов колеблется в пределах 5,73–6,22, что отвечает фоновым атмосферным осадкам. В загрязнённых техногенных районах Якутии для снега характерны щелочные значения pH [6].

С повышением высотности роль соединений азота в химическом составе снега (преимущественно его аммонийной формы) повышается, но снижается минерализация и повышается кислотность снеговых вод. На высотах более 2000 м химический состав снега становится гидрокарбонатным, смешанным по катионам с преобладанием аммония:



Основные характеристики химического состава снежного покрова мерзлотных ландшафтов (минерализация, pH, химический состав) приведены в табл. 6.

Изменение химического состава снежного покрова по маршруту отражает высотную поясность, в соответствии с которой с ростом абсолютных отметок снижается концентрация макрокомпонентов «континентального» происхождения –  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и возрастает содержание соедине-

ний азота, ионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Cl}^-$ . Исключение из данной закономерности – появление положительной аномалии большинства ионов, за исключением хлоридов, в ландшафтах горных редколесий на высотах 600–800 м (рис. 2).

Мы рассчитали объём или плотность накопления химических компонентов в снежном покрове  $Q$  по формуле [1]:

$$Q = 10^{-2}cP, \text{ т/км}^2,$$

где  $c$  – концентрация компонента, мг/л;  $P$  – запас влаги, г/см<sup>2</sup>.

Объём поступления растворимых и нерастворимых форм компонентов в снежный покров закономерно меняется с увеличением высоты местности, т.е. при переходе от равнин к горным

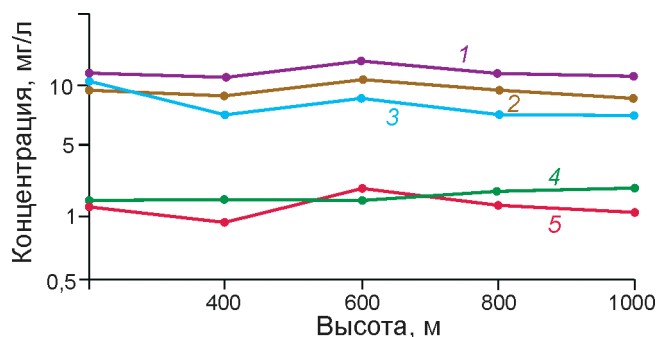


Рис. 2. Изменение с высотой концентрации в снежном покрове:

1 –  $\text{HCO}_3^-$ ; 2 – пылевых частиц; 3 – суммы ионов; 4 –  $\text{Cl}^-$ ; 5 –  $\text{SO}_4^{2-}$

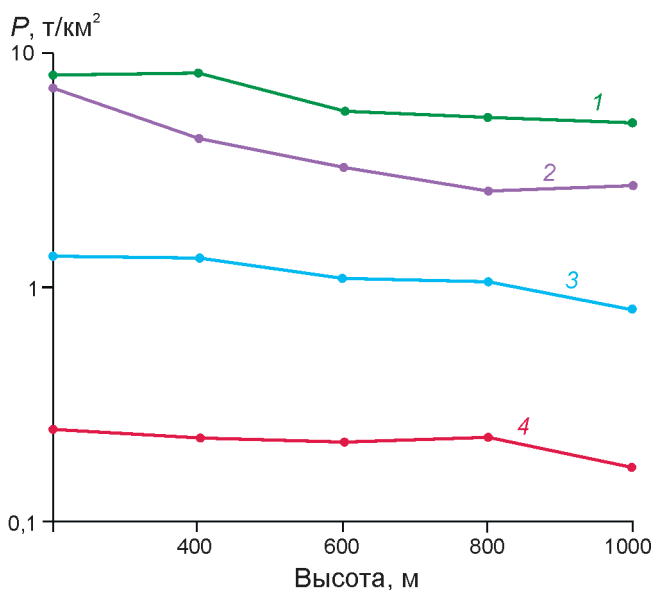
Fig. 2. Variation concentrations in snow cover with altitude.

1 –  $\text{HCO}_3^-$ ; 2 – dust particles; 3 – total ions; 4 –  $\text{Cl}^-$ ; 5 –  $\text{SO}_4^{2-}$

Таблица 7. Плотность поступления растворимых и нерастворимых форм вещества в снежный покров, т/км<sup>2</sup> (в знаменателе – в %)

Мерзлотные ландшафты (абс. отметки, м)	Форма вещества в снежном покрове		
	пыль, т/км <sup>2</sup>	сумма ионов, т/км <sup>2</sup>	всего, т/км <sup>2</sup>
Среднетаёжные (100–400)	7,15/47	8,06/53	15,21
Горно-таёжные (400–600)	4,44/35	8,36/65	12,80
Горные редколесья (600–800)	3,28/37	5,66/63	8,94
Горные тундры (800–1000)	2,58/32	5,42/68	8,00
Горные пустыни (1000–1200)	2,70/35	5,04/65	7,74

территориям. Суммарная плотность поступления компонентов в снежный покров (пыль+ионы) уменьшается с повышением высотности с 15,2 т/км<sup>2</sup> в среднетаёжных ландшафтах до 7,7–8,0 т/км<sup>2</sup> в ландшафтах горных тундр и горных пустынь. В среднетаёжных ландшафтах поступление растворимых и нерастворимых форм компонентов в снежный покров примерно одинаково из-за большей запылённости, обусловленной антропогенным воздействием, но во всех типах горных ландшафтов преобладают растворимые (ионные) формы над пылевыми (нерастворимыми) в соотношении примерно 2:1 (табл. 7).



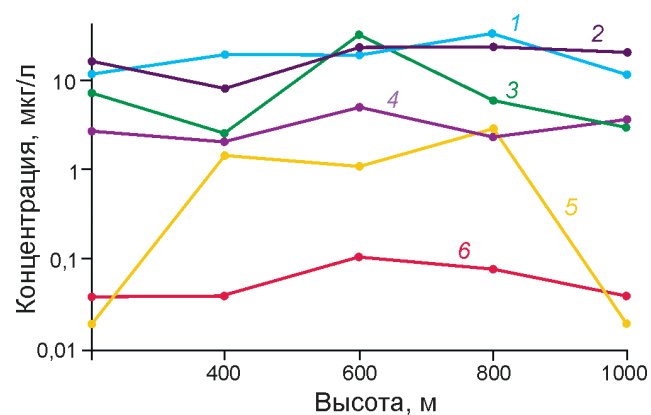
**Рис. 3.** Изменение с высотой плотности накопления ( $P$ , т/км<sup>2</sup>) в снежном покрове суммы ионов (1), пылевых частиц (2), карбонатов в пересчёте на С (3) и сульфатов в пересчёте на S (4)  
**Fig. 3.** Variation of accumulation density ( $P$ , т/км<sup>2</sup>) of total ions (1), dust particles (2), carbonates expressed as carbon C (3) and sulfates expressed as sulfur S (4) in snow cover with altitude

При анализе распределении плотности поступления компонентов в снежный покров чётко выражены элементы гидрохимической зональности, несмотря на огромную динамичность атмосферы и на то, что в формировании осадков, наряду с зональными факторами, очень большая роль принадлежит азональным факторам (рис. 3). Среднее содержание микроэлементов в снежном покрове колеблется от 0,09 (Pb) до 11 (F, P, Ba) мкг/л. В порядке убывания концентрации микроэлементы можно сгруппировать в следующий ряд:

F, P, Ba > Sr, Mn > Cu, Zn > Ni, Cr > Pb > Co, As, Cd.

Отметим, что в большинстве проб содержания Co, As и Cd ниже чувствительности анализа: Co (< 0,5), As (< 5) и Cd (< 0,15) мкг/л.

В отличие от макрокомпонентов, распределение микроэлементов в снежном покрове отклоняется от высотной зональности, в соответствии с которой с высотой должна понижаться их концентрация. Максимальное содержание тяжёлых металлов (Mn, Cu, Pb, Cd), F и Sr характерно для ландшафтов горных редколесий и горных тундр с абсолютными отметками 600–1000 м (рис. 4). Отклонение от высотной зональности распределения химических элементов в снежном покрове связано с формированием положительной аномалии микроэлементов (Mn, Cu, Pb, Cd, F, Sr) в ландшафтах горных редколесий и горных тундр, где маршрутными исследованиями пересечена Сетте-Дабанская тектоническая структура, к которой приурочена одноименная металлогеническая зона стратиформного медного и свинцово-цинкового оруденения.



**Рис. 4.** Концентрация тяжёлых металлов, фтора и стронция в снежном покрове мерзлотных ландшафтов: 1 – F; 2 – Mn; 3 – Sr; 4 – Cu; 5 – Pb; 6 – Cd  
**Fig. 4.** Concentrations of heavy metals, fluorine and strontium in snow cover in permafrost landscapes: 1 – F; 2 – Mn; 3 – Sr; 4 – Cu; 5 – Pb; 6 – Cd

Таблица 8. Изменение геохимических показателей в подошвенной части снега (0–10 см) над зонами разломов и на фоновых участках

Параметры	Ландшафты горных редколесий и горных тундр	
	зона разлома	фоновые участки
Электропроводность, mS/см	3,87	2,62
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л	4,17	1,21
F <sup>-</sup> , мг/л	0,033	0,013

Таблица 9. Потоки микроэлементов в напочвенную часть снега (0–10 см) из подстилающего субстрата над разломами Сетте-Дабанской металлогенической зоны, кг/км<sup>2</sup>

Параметры распределения	S	F	Cu	Cd
Среднее	101	1,08	0,25	0,017
Минимальное	68	2,22	0,18	0,001
Максимальное	137	0,43	0,34	0,081

Возникновение геохимической аномалии обусловлено потоками элементов, типоморфных для рудной минерализации (S, F, Cu и Cd), в подошвенную часть снега над зонами разломов. На таких участках содержание в снеге над горными породами, например сульфатов и F, в 2–3 раза выше, чем на фоновых участках; примерно на 50% повышается электропроводность (табл. 8). Объёмы поступления микроэлементов в подошвенную часть снежного покрова в пределах Сетте-Дабанской металлогенической зоны колеблются от 0,0n для Cd до 10n–100n кг/км<sup>2</sup> для S (табл. 9). Экспериментальными и натурными исследованиями, выполненными ранее, установлены особенности миграции химических элементов в системе снежный покров – подстилающий субстрат, периодически меняющей своё направление на протяжении холодного времени года [6]. В пределах активных тектонических нарушений, рудных зон и районов техногенного воздействия, т.е. на участках высокой геохимической неоднородности, наблюдается максимальная концентрация химических элементов за счёт их миграции из подстилающего субстрата в подошвенные слои снежного покрова [5].

### Заключение

Снежный покров в районах распространения широтно-зональных (среднетаёжный) и высотно-поясных (горно-редколесный, горно-тундровый и горно-пустынный) типов мерзлотных ландшафтов по химическому составу гидрокарбонатный или хлоридно-гидрокарбонатный на-

триево-кальциевый, с небольшим содержанием сульфатов, что связано с низким уровнем техногенного загрязнения в регионе. Преобладающее влияние на формирование химического состава снежного покрова в равнинных и горных мерзлотных ландшафтах оказывают соли континентального происхождения – преимущественно соединения углерода. В ландшафтах горных пустынь (высоты более 1000 м), где преобладает региональный перенос, наряду с углеродом, значительную роль в холодное время года играют соединения азота, в основном аммонийные.

Суммарная плотность поступления растворимых и нерастворимых форм компонентов в снежный покров закономерно уменьшается с изменением высоты местности – при переходе от равнин к горным территориям. Поступление растворимых и нерастворимых форм компонентов в снежный покров примерно одинаково в среднетаёжных ландшафтах из-за большей запылённости, обусловленной антропогенным воздействием. Во всех высотно-поясных горных ландшафтах растворимые (ионные) формы преобладают над нерастворимыми. Среднее содержание микроэлементов в снежном покрове колеблется от 0,09 (Pb) до 11 (F, P, Ba) мкг/л.

В распределении микроэлементов наблюдается отклонение от высотной зональности, связанное с формированием положительной аномалии (Mn, Cu, Pb, Cd, F, Sr) в снежном покрове ландшафтов горных редколесий и горных тундр в пределах Сетте-Дабанской тектонической структу-

ры. К этой структуре приурочена одноименная металлогеническая зона стратиформного медного и свинцово-цинкового оруденения. Формирование геохимической аномалии обусловлено потоками типоморфных элементов в подошвенную часть снега над зонами разломов. Над зонами разломов наблюдается интенсивная миграция в снег элементов, типоморфных для рудной минерализации: S, F, Cu и Cd. Содержание в напочвенных слоях снега над разломами, например сульфатов и фтора, в 2–3 раза выше, чем на фоновых участках.

### Литература

1. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 182 с.
2. *Иверонова М.И.* Испарение со снежного покрова на хребте Терской-Алатау зимой 1958/59 г. // Метеорология и гидрология. 1961. № 2. С. 24–25.
3. *Казурова Н.С.* Синоптические процессы Якутии в различные сезоны и их краткая характеристика. Общие сведения // Вопросы географии Якутии. 1961. Вып. 1. С. 19–26.
4. *Клюкин Н.К.* Климатический очерк Северо-Востока СССР. М.: Гидрометеоиздат, 1960. 118 с.
5. *Макаров В.Н.* Фтор в снежном покрове Лено-Вилюйского междуречья // Наука и образование. 2003. № 3 (31). С. 65–69.
6. *Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И.* Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: изд. Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. 152 с.
7. Мерзлотные ландшафты Якутии. (Пояснительная записка к «Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР» масштаба 1:2 500 000) / А.Н. Федоров, Т.А. Ботулу, С.П. Варламов и др. Новосибирск: изд. ГУГК, 1989. 170 с.
8. *Скачков Ю.Б.* Тенденции изменения экстремальных значений температуры воздуха в г. Якутске // Наука и образование. 2012. № 3 (66). С. 39–41.

### Summary

The work is devoted to results of study the chemical composition of snow in mountain taiga and permafrost landscapes of Yakutia. We studied snow cover in different mountain-belt types of landscapes. The composition and calculated volumes of chemical elements and compounds are studied in snow. The chemical composition of snow in mountain taiga and permafrost landscape has remained relatively constant (hydrocarbonate chloride-bicarbonate or sodium-calcium, low sulfate content). The dominant influence on the chemical composition of snow at plains and mountain permafrost landscapes has a continental origin, mainly carbon compounds. In mountain desert, where there is predominantly regional transfer, along with the carbon significant role in atmospheric precipitation in cold season belongs to the nitrogen compounds, mainly ammonium. The total density of the entry of soluble and insoluble components in the form of snow decreases regularly with change of altitude. The distribution of trace elements in the snow cover is not a subject to altitudinal zonation. The maximum content of heavy metals (Mn, Cu, Pb, Cd), F, and Sr in the snow cover is observed in the landscapes of mountain woodlands and mountain tundra, where the route crossed research Sette-Daban metallogenic zone of stratiform Cu and Pb-Zn mineralization.