

Геохимические аспекты весеннего разрушения снежного покрова на Центрально-Якутском комплексном геокриологическом стационаре «Туймаада»

В.Н. Макаров, С.А. Маркова

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
makarov@mpi.ysn.ru

Аннотация. Анализируются результаты геохимического мониторинга снежного покрова на геокриологическом стационаре «Туймаада». Изучены параметры трансформации снега (температура, высота, плотность, влагозапас) и особенности миграции влаги и вещества при разрушении снежного покрова в весенний период. Рассчитан объём накопления химических компонентов в снежном покрове. Характер изменения плотности солевого состава снежного покрова позволяет выделить три фазы процесса вымывания химических компонентов. Установлено, что в весенний период максимальная потеря снежным покровом растворимых компонентов наблюдается для ионов Cl^- и соединений азота, которыми обогащаются последние порции талой воды. Соотношение теряемого запаса химических элементов имеет вид: $Cl > N > S > Ca > C$. К концу апреля, непосредственно к сходу снежного покрова, 30–70 % ионов были вымыты из снега. В то же время водный эквивалент в снеге уменьшился только на 30 %. В период разрушения и схода снежного покрова в начале мая почвенный покров остается мерзлым и основная масса влагозапаса снега перемещается в конечные водоёмы стока: городские озера и р. Лену, способствуя опреснению водоемов и водотоков.

Ключевые слова: стационар, мониторинг, снежный покров, геохимия, плотность, температура.

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-64-71

Geochemical aspects of spring destruction of snow cover at Central Yakutia complex geocryological station «Tuymaada»

V.N. Makarov, S.A. Markova

P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
makarov@mpi.ysn.ru

Abstract. The article analyzes results of geochemical monitoring of snow cover at the geocryological station «Tuymaada». Transformation parameters of snow (temperature, height, density, moisture reserve) and peculiarities of migration of moisture and matter during destruction of the snow cover in a spring period are studied. A volume of accumulation of chemical components in the snow cover is calculated. A nature of a change in the density of the salt composition of the snow cover makes it possible to distinguish three phases of a process of washing out the chemical components. It was found that in the spring period the maximum loss of soluble components by the snow cover is observed for Cl^- ions and nitrogen compounds, with which the last portions of melt water are enriched. A ratio of a lost stock of chemical elements has the form: $Cl > N > S > Ca > C$. By the end of April, immediately to melting of the snow cover, 30–70 % of the ions were washed from the snow. At the same time, the water equivalent in snow decreased only by 30 %. In the period of the destruction and melting of the snow cover in early May, the soil cover remains frozen and the bulk of snow moisture is transferred to the final drainage basins: city lakes and the Lena River, contributing to desalination of water bodies and streams.

Key words: station, monitoring, snow cover, geochemistry, density, temperature.

Введение

Изучению химического состава снежного покрова природных и техногенных ландшафтов Якутии сопредельных регионов посвящен ряд работ [1, 3, 5, 10, 12, 14 и др.]. Особый интерес представляют полевые экспериментальные исследования на станциях мониторинга.

Центрально-Якутский комплексный геоэкологический стационар «Туймаада» располагается в юго-западной части г. Якутска в 0,6 км от Института мерзлотоведения СО РАН. В геоморфологическом отношении это сергеляхская терраса р. Лены, представляющая собой почти горизонтальную поверхность с альтитудой около 110 м. Рельеф стационара отличается незначительными перепадами высот. Тем не менее, здесь имеются пологие ложбины и плоские гряды, формирование которых связывается с речной аккумуляцией слагающего их дисперсного грунта. Относительные превышения отдельных гряд над дном ложбин составляют 1,5–2 м.

Растительность на стационаре представлена чередованием сосняков паркового типа с безлесными сухими полянами и отдельными более или менее заболоченными участками. На заболоченных участках встречаются неглубокие озера и длительно существующие лужи. Вблизи них произрастают ивняки, березняки и влаголюбивые травянистые ассоциации.

Геологическое строение территории стационара определяется его положением в долине Туймаада в среднем течении р. Лены. Геологический разрез представлен в следующем виде, сверху вниз: от поверхности до 0,2–0,3 м – дерново-растительный покров; с 0,2–0,3 до 0,6 м – легкий суглинок, далее песок мелкозернистый вначале с прослоями супеси, затем растительного детрита и гальки. С глубины 20 м начинаются аллювиальные четвертичные отложения – песок мелкозернистый.

Методика

Мониторинг химического состава снежного покрова проведен в период с января по апрель 2016 г. Пробы снега отбирались на ровной луговой площадке 6х6 м, в 10 м от установки по сбору атмосферных осадков (рис. 1).

Интервал отбора проб составлял 10 дней, с 29 января до полного схода снежного покрова – 25 апреля. В пункте наблюдений измерялась высота и плотность снега, температура приземного воздуха и снега на поверхности и почве, определялся водный эквивалент снежного покрова. Для химического анализа на пыль и химический состав снеговой воды отбирались пробы с помощью снегорезчика на всю глубину снежного покрова. Снег помещался в чистый герметичный полиэтиленовый мешок. После таяния сне-



Рис. 1. Площадка мониторинга снежного покрова и установка по сбору атмосферных осадков

Fig. 1. Platform of snow cover monitoring and installation for collection of precipitation

говая вода переливалась в чистые герметичные бутылки из полипропилена или стекла. Химический анализ снеговой воды выполнен в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л.Ю.Бойцова, С.А. Потапова и О.В.Шепелева).

В образцах снега определялось содержание макрокомпонентов: SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; микроэлементов: Cs, Li, Sr, Ba, F, P; измерялась величина pH, Eh и электропроводности. Все определения компонентов проводились по методикам, включенным в Государственный реестр методик количественного химического анализа.

Результаты и обсуждение

Температура воздуха в период мониторинга изменялась в диапазоне от $-44,5^\circ\text{C}$ 6 февраля до $14,5^\circ\text{C}$ 30 апреля (рис. 2).



Рис. 2. Дневная температура воздуха на стационаре в период мониторинга

Fig. 2. Daily air temperature at Station during monitoring period

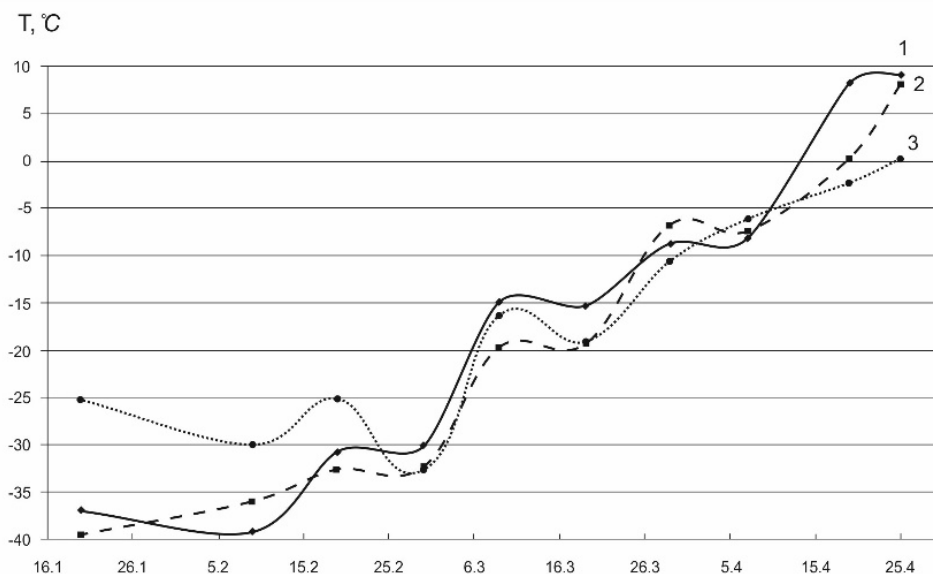


Рис. 3. Температура снега и почвы на стационаре, °C: 1 – воздух; 2 – снег на поверхности; 3 – снег на почве

Fig. 3. Temperature of snow and soil at Station, °C: 1 – air; 2 – snow on surface; 3 – snow on ground

Первое потепление с переходом температуры воздуха выше 0 °C наблюдалось 23–24 марта, когда температура воздуха поднялась до 4,5 °C. Постоянное потепление с переходом температуры воздуха в дневное время выше 0 °C (в 10 часов утра) установилось с 13 апреля. В этот же период температура снега на поверхности снежного покрова изменялась в диапазоне от –39,4 °C 20 января до 7,9 °C 25 апреля (рис. 3).

Температура снега на подошве снежного покрова в период мониторинга была несколько выше: в диапазоне от –32,7 °C 29 февраля до 0,1 °C 25 апреля. Разница температур поверхность–подошва снежного покрова была максимальна в конце января – около 14 °C, а в конце наблюдений 25 апреля составила 7,8 °C (рис. 4).

Высота снежного покрова вследствие антициклонального режима погоды сравнительно невелика – 30–31 см, соответствует таковой в

среднетаёжных ландшафтах – 29–45 см и оставалась постоянной до 20 марта. Наступившее затем повышение температуры воздуха коррелирует с устойчивым снижением толщины снежного покрова до 16 см к 24 апреля (рис. 4).

Характерная особенность снежного покрова на участке мониторинга – небольшая плотность 0,160–0,171 г/см³. Снег выпадает очень сухой и мало уплотняется в течение зимы. К началу снеготаяния его плотность составила 0,20 г/см³ и возросла до 0,286 г/см³ в конце апреля (рис. 5).

Величина влагозапаса в конце января–начале февраля составила 44–45 мм и постепенно возрастала к середине марта до максимальной величины – 61,2 мм, понижаясь затем до 47 мм ко времени активного снеготаяния – 25 апреля. Основные запасы воды в снеге сформировались в конце холодного периода (март). В период мониторинга наблюдалось постоянное

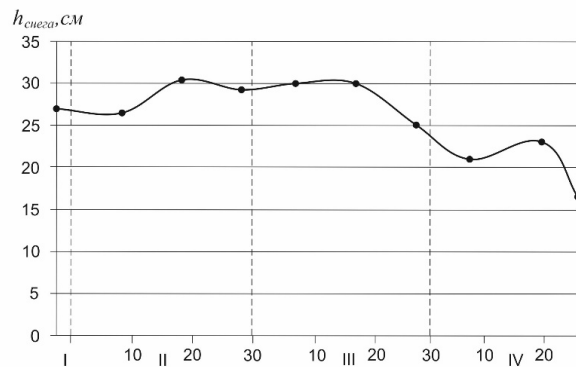


Рис. 4. Высота снежного покрова

Fig. 4. Height of snow cover

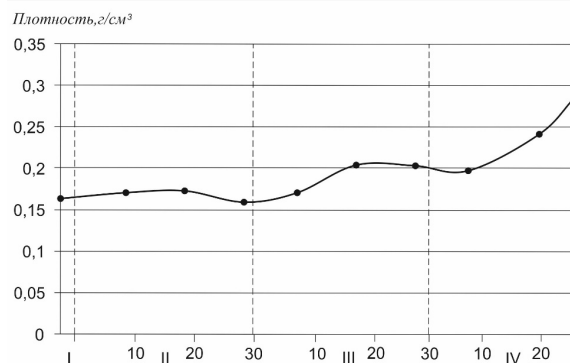


Рис. 5. Плотность снежного покрова

Fig. 5. Density of snow cover

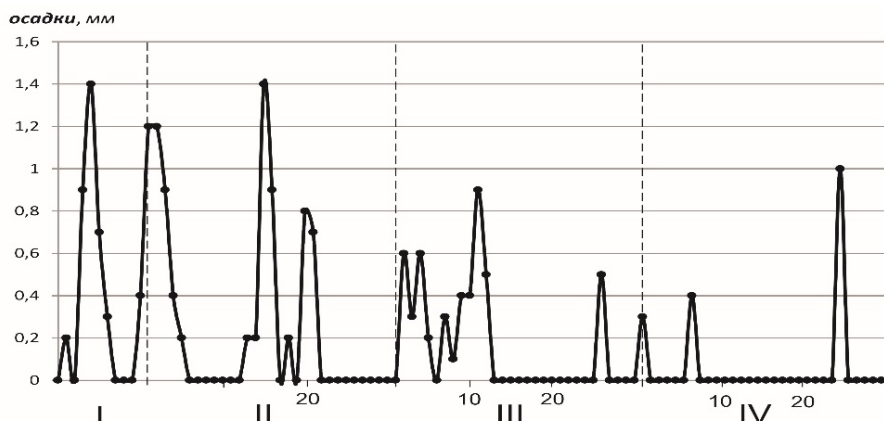


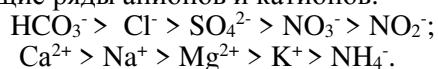
Рис. 6. Атмосферные осадки в период мониторинга

Fig. 6. Precipitation during monitoring period

уменьшение объема выпадающих атмосферных осадков, мм: февраль – 8,7, март – 5,1, апрель – всего 1,2 (рис. 6).

Влагозапас снега возрастал после выпадения осадков. Так, после продолжительного периода снегопада с 2 по 12 марта, когда выпало 4,3 мм осадков, влагозапас увеличился на 14,5 мм. Концентрация пылевых частиц в снежном покрове незначительна – 0,005–0,007 г/л, что свидетельствует о слабом загрязнении атмосферы в районе стационара. Химический состав жидкой (водно-растворимой фракции) фазы снега оставался постоянно гидрокарбонатно-кальциевым ультрапресным с диапазоном изменения минерализации за период наблюдений в пределах одного порядка 20,6–33,0 мг/л, в среднем около 25 мг/л (рис. 7).

Аномальное возрастание величины минерализации снега до 33 мг/л наблюдалось в первой половине марта после длительного снегопада. По величине концентрации макрокомпонентов для снежного покрова можно сформировать следующие ряды анионов и катионов:



Минерализация, мг/л

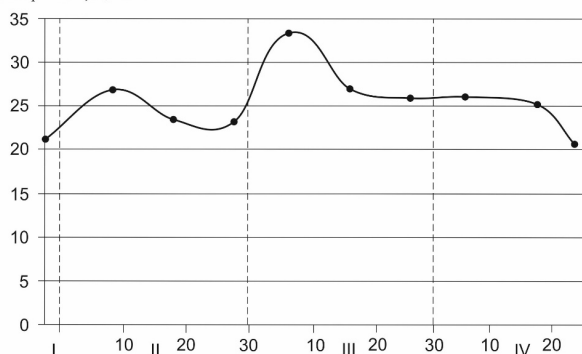
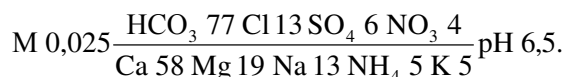


Рис. 7. Общая минерализация снежного покрова

Fig. 7. Total snow cover salinity

Соотношение главных ионов химического состава снежного покрова типично для среднетаёжных ландшафтов и подчиняется общей геохимической закономерности, в соответствии с которой первым анионом пресных и ультрапресных вод является HCO_3^- :



Содержание в жидкой фазе снежного покрова основного аниона HCO_3^- в период наблюдений оставалось практически постоянным 20,6–26,0 мг/л. Поступление хлоридов в снежный покров достигло максимальных значений в марте до 18 % (3,8 мг/л) от общего количества солей в снег за счет привноса солей морского происхождения в ходе длительного десятидневного снегопада и затем постоянно снижалось до минимальных значений в конце апреля (рис. 8).

Относительное содержание сульфат-иона в снежном покрове в среднем около 6 до 9,3 %-экв. (0,82–2,72 мг/л) и отражает существующий в настоящее время низкий уровень техногенного давления на участке мониторинга.

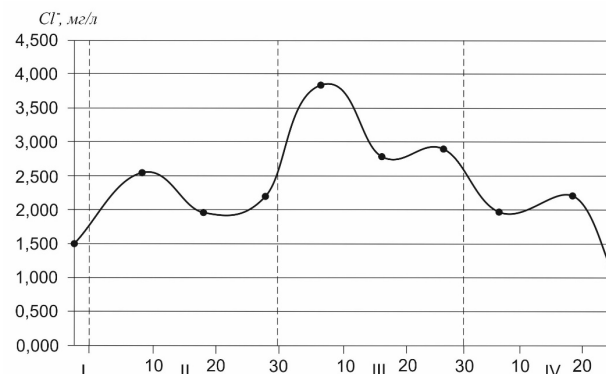


Рис. 8. Содержание Cl^- в снежном покрове

Fig. 8. Content of Cl^- in snow cover

Суммарное содержание соединений азота колеблется в пределах 0,319–0,845 мг/л (в среднем 0,614 мг/л) при практически равном атмосферном поступлении аммонийных и нитратных форм и незначительном – нитритных. Со второй половины февраля наблюдается постоянное понижение суммарного содержания соединений азота в снежном покрове (вымывание N) в период мониторинга (рис. 9).

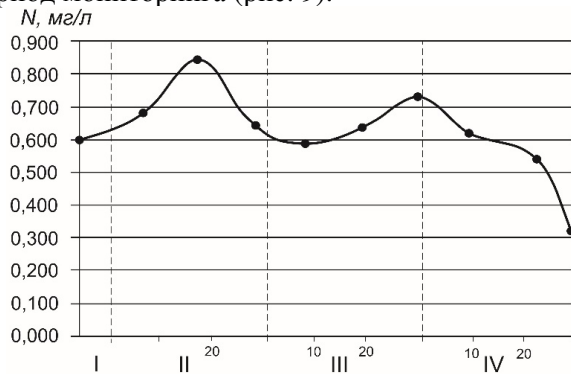


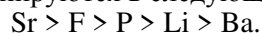
Рис. 9. Содержание соединений N в снежном покрове

Fig. 9. Content of N compounds in snow cover

В катионном составе основным ионом является кальций (4,0–5,9 мг/л). Преобладающее влияние на процессы формирования химического состава снежного покрова оказывают соли континентального происхождения. Об этом свидетельствует высокое содержание гидрокарбонатов кальция (40–74 %-экв.).

Величина кислотности снега оставалась на уровне слабокислых значений – pH=6,3–6,6, что значительно ниже, чем в загрязненных районах г. Якутска, где для снега характерны щелочные величины pH [2, 4, 6, 7].

Среднее содержание микрокомпонентов в снежном покрове колеблется от <0,005 (Ba) до 0,019 мкг/л (Sr). В порядке убывания по уровню среднего геометрического содержания микроэлементы группируются в следующий ряд:



Был рассчитан объем (плотность) накопления химических компонентов в снежном покрове (зимних выпадений из атмосферы) – Q, т/км², по формуле:

$$Q = 10^{-2} \cdot c \cdot P [1],$$

где c – концентрация компонента, мг/л и P – влагозапас, мм.

Суммарная плотность накопления химических компонентов в водно-растворимой фракции снежного покрова изменялась в период наблюдений в пределах 9,34–16,96 и в среднем равна 12,5 т/км² (таблица).

Плотность поступления в снежный покров химических элементов растет с конца января до середины марта [8]. Это фаза, когда происходит

Плотность поступления твердых и растворимых форм в снежный покров, т/км²

Density of entry of solid and soluble forms in snow cover, t/km²

Фаза компонентов Phase of components	Стационар Station	г. Якутск Yakutsk
Водно-растворимая фракция Water-soluble fraction	12,53	15,4
Твердая (пылевая) Solid (dust)	2,98	49,9
Суммарная Total	15,5	65,3

накопление влаги (возрастание влагозапаса до максимальной величины – 61,2 мм) и повышение плотности солевого состава снежного покрова до 16–17 г/м².

Активное таяние снега началось с переходом температуры воздуха в дневное время выше 0 °С (13 апреля), но уменьшение плотности солевого состава снежного покрова за счет вымывания химических элементов наблюдается гораздо раньше – с конца марта и достигает минимальных значений – 9,7 г/м² в конце апреля (рис. 10).

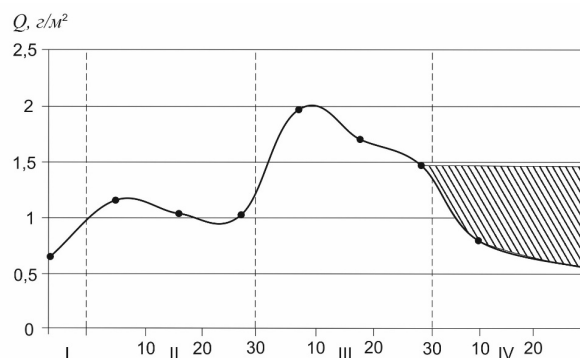


Рис. 10. Плотность солевого состава снежного покрова. Выделена область вымывания

Fig. 10. Density of salt composition of snow cover. Washed out area

В период разрушения и схода снежного покрова в конце апреля–начале мая почвенный покров остается мерзлым (рис. 11).

В целом при таянии снега соотношение теряемого запаса химических элементов имеет вид: Cl > N > S, Mg > Ca, K > C > Na. Максимальная потеря растворимых форм химических элементов снегом в весенний период характерна для ионов Cl⁻ и соединений азота, которыми обогащается талая вода перед полным разрушением снежного покрова (рис. 12).

К 25 апреля, непосредственно перед разрушением снежного покрова, 30–70 % ионов были вымыты. В то же время водный эквивалент в снеге уменьшился только на 23 %. Аналогичные данные были получены в Норвегии Йоханессеном и Хенриксеном (60–90 % вымытых ионов

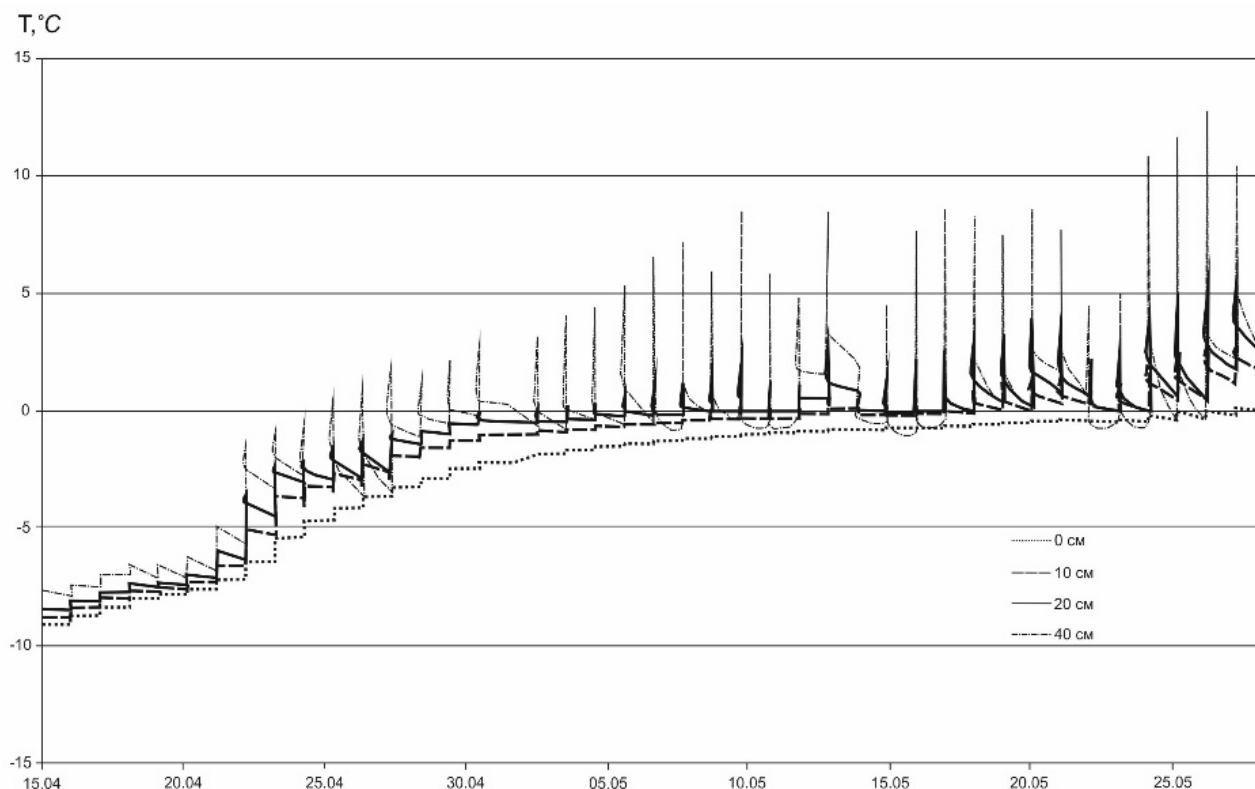


Рис. 11. Динамика температура грунта на разной глубине [2]

Fig. 11. Dynamics of soil temperature at different depths [2]

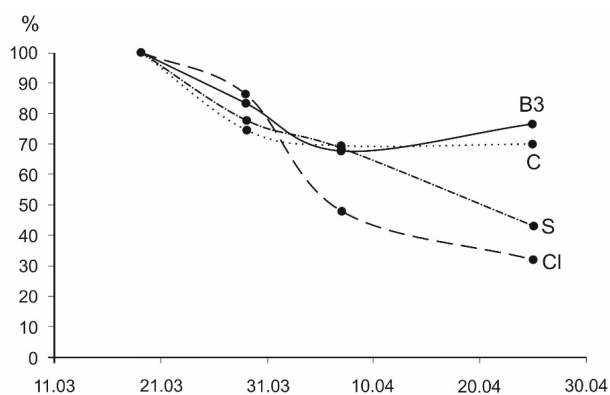


Рис. 12. Изменение запаса химических элементов при таянии снежного покрова (B3 – влагозапас, C – HCO_3^- в пересчете на углерод, S – SO_4^{2-} в пересчете на серу)

Fig. 12. Change in stock of chemical elements during melting of snow cover (B3 – moisture reserve, C – HCO_3^- in terms of carbon, S – SO_4^{2-} in terms of sulfur)

при уменьшении водного эквивалента на 35 %), наблюдавшим влияние весеннего снеготаяния на миграцию ионов в снеге [13].

Выводы

Характер изменения плотности солевого состава снежного покрова позволяет выделить три фазы процесса вымывания химических компонентов.

Первая – до конца марта, когда в первой фазе таяния общий теряемый запас химических элементов снега составляет около 20 % и наибольший вынос характерен для хорошо растворимых гидрокарбонатов и сульфатов (20–25 %) при соотношении $\text{C} > \text{S} > \text{Cl} > \text{N}$.

Вторая – с окончания первой фазы и до конца первой декады апреля, связанная с интенсивным стоком воды – снижением влагозапаса примерно на 1/3 до 41,4 мм и синхронным понижением плотности солевого состава снежного покрова также на 1/3 до 10,7 г/м². Общий теряемый запас снегом растворимых солей составляет 13 % при интенсивном вымывании хлоридов и нитратов (30–40 % от их общего количества).

Наконец третья фаза – период интенсивного снеготаяния и относительной стабилизации влагозапаса и плотности солевого состава снежного покрова. Общий теряемый запас снегом растворимых солей уменьшается до 8 % при наиболее интенсивном вымывании хлоридов и нитратов (25–30 % от их общего количества).

Основная масса влагозапаса при таянии снега стекает по мерзлому почвенному покрову в конечные водоёмы стока: озера и р. Лену. Возможно избыточное поступление влаги, образующейся при таянии снега, в последние годы является одной из причин опреснения городских

озер г. Якутска [9, 11]. При этом снеговой влаги, поступающей в почвы, может не хватать для нормального развития деревьев.

Литература

1. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.
2. Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Пермяков П.П. Влияние инфильтрации летних жидких атмосферных осадков на термовлажностный режим грунтов // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. Магадан: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2017. С. 245–246.
3. Кириллин А.Р., Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова горных мерзлотных ландшафтов Эльконского ураново-рудного района // Наука и образование. 2016. № 4. С. 64–69.
4. Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова таёжных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии // Лед и снег. 2014. № 1. С. 73–80.
5. Макаров В.Н. Химический состав снежного покрова горных ландшафтов Эльконского урановорудного района // Материалы IV Международной конференции «Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее». Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2016. С. 283–287.
6. Макаров В.Н. Влияние изменения климата на геохимию атмосферных осадков и озерных систем Якутска // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Эволюция биосферы и техногенез». Чита: ИПРЭК СО РАН, 2016. С. 44–47.
7. Макаров В.Н. Химический состав снежного покрова // Прикладная экология Севера / Саввинов Д.Д. Новосибирск: Наука, 2016. С. 40–53.
8. Макаров В.Н., Потапова С.А. Оценка миграции хлор-иона из снега в грунты и озера Центральной Якутии // Науки о Земле. 2017. № 3-3 (29). С. 456–459.
9. Макаров В.Н., Седельникова А.Л. Экогеохимия городских озер Якутска. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2016. 210 с.
10. Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И. Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1990. 152 с.
11. Седельникова А.Л., Макаров В.Н. Влияние атмосферных осадков на геохимию озерных систем г. Якутска // Наука и образование. 2016. № 1. С. 47–51.
12. Ianchenko N.I., Kondratiev V.V., Verkhoturov V.V. Features of the elemental composition of snow cover in the area of production primary aluminum emissions // 2016 Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering

10035,1003563. IF SJR – 0,234. DOI: 10.1117/12.2248867.

13. Johanessen M., Henriksen A. Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during meeting // Water Resources Res. 1978. V. 14, no. 4. P. 615–619. DOI: 10.1029/WR014i004p00615.

14. Makarov V.N. Tritium in the Snow Cover at Mid-Taiga Landscapes in Central Yakutia // Geochemistry International. 2016. V. 54, no. 11. P. 1005–1010. IF = 0,558. DOI: 10.1134/S0016702916090044.

References

1. Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 182 s.
2. Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N., Permyakov P.P. Vliyanie infil'tratsii letnikh zhidkikh atmosferykh osadkov na termovlazhnostnyj rezhim gruntov // Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya. Magadan: Izd-vo IMZ SO RAN, 2017. S. 245–246.
3. Kirillin A.R., Makarov V.N. Geokhimiya snezhnogo pokrova gornyx merzlotnykh landshaftov El'konskogo uranovorudnogo rajona // Nauka i obrazovanie. 2016. № 4. S. 64–69.
4. Makarov V.N. Geokhimiya snezhnogo pokrova taezhnykh i gornyx merzlotnykh landshaftov Yakutii // Led i снег. 2014. № 1. S. 73–80.
5. Makarov V.N. Khimicheskij sostav snezhnogo pokrova gornyx landshaftov El'konskogo uranovorudnogo rajona // Materialy IV Mezhdunarodnoj konferentsii «Bioraznoobrazie, problemy ekologii Gornogo Altaya i sopredel'nykh regionov: nastoyashee, proshloe, budushee». Gorno-Altajsk: RIO GAGU, 2016. S. 283–287.
6. Makarov V.N. Vliyanie izmeneniya klimata na geokhimiyu atmosferykh osadkov i ozernyx sistem Yakutska // Materialy Vserossijskoj konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Evolutsiya biosfery i tekhnogenez». Chita: IPREK SO RAN. 2016. S. 44–47.
7. Makarov V.N. Khimicheskij sostav snezhnogo pokrova // Prikladnaya ekologiya Severa / Savvinov D.D. Novosibirsk: Nauka, 2016. S. 40–53.
8. Makarov V.N., Potapova S.A. Otsenka migratsii khlor-iona iz snega v grunty i ozera Tsentral'noj Yakutii. Nauchnyj al'manakh // Nauki o Zemle. 2017. № 3-3 (29). S. 456–459.
9. Makarov V.N., Sedel'nikova A.L. Ekogeokhimiya gorodskikh ozer Yakutska. Yakutsk: Izd-vo MZ SO RAN, 2016. 210 s.
10. Makarov V.N., Fedoseev N.F., Fedoseeva V.I. Geokhimiya snezhnogo pokrova Yakutii. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1990. 152 s.
11. Sedel'nikova A.L., Makarov V.N. Vliyanie atmosferykh osadkov na geokhimiyu ozernyxh

sistem g. Yakutsk // Nauka i obrazovanie. 2016. № 1. S. 47–51.

12. *Ianchenko N.I., Kondratiev V.V., Verkhuturov V.V.* Features of the elemental composition of snow cover in the area of production primary aluminum emissions // 2016 Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 10035, 1003563. IF SJR – 0,234. DOI: 10.1117/12.2248867.

13. *Johanessen M., Henriksen A.* Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting // Water Resources Res. 1978. V. 14, no. 4. P. 615–619. DOI: 10.1029/WR014i004p00615.

14. *Makarov V.N.* Tritium in the Snow Cover at Mid-Taiga Landscapes in Central Yakutia // Geochemistry International. 2016. V. 54, no. 11. P. 1005–1010. ИФ = 0,558. DOI: 10.1134/S0016702916090044.

Поступила в редакцию 08.06.2018

Об авторах

МАКАРОВ Владимир Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-6086-886X>, Makarov@mpi.ysn.ru;

МАРКОВА Стелла Афанасьевна, аспирант, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, stellapotapova93@mail.ru.

About the authors

MAKAROV Vladimir Nikolaevich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Principal Researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-6086-886X>, Makarov@mpi.ysn.ru;

MARKOVA Stella Afanas'evna, Postgraduate Student, P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russia, stellapotapova93@mail.ru.