

Геохимический состав голоценовых повторно-жильных льдов Южного и Центрального Ямала

Буданцева Надежда Аркадьевна

кандидат географических наук

старший научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

119992, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, стр. 19

Budantseva Nadine

PhD in Geography

Senior Research Fellow at the Faculty of Geography of Moscow State University

119992, Russia, Moscow, ul. Leninskie Gory, 1, building 19

✉ nadin.budanceva@mail.ru



Васильчук Юрий Кириллович

доктор геолого-минералогических наук

профессор, МГУ имени М.В.Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009

Vasil'chuk Yuriy Kirillovich

Doctor of Geology and Mineralogy

Associate Professor at Moscow State University

119991, Russia, Moscow, ul. Leninskie Gory, 1, room 2009

✉ vasilch_geo@mail.ru



Аннотация. Детально исследованы голоценовые сингенетические повторно-жильные льды (ПЖЛ) в пяти районах п-ова Ямал: в пределах мощных торфяников в долине р.Щучья и близ пос.Сеяха, в пойменных отложениях рек Еркутаяха и Ляккатосё и в отложениях лайды в районе пос. Мыс Каменный. Ширина голов ледяных жил в торфяниках варьирует от 0,5 до 1,6 м, их высота – от 2 до 5 м, ширина жил на поймах и лайде также варьирует от 0,5 до 1,8 м, вскрытая мощность – не более 2 м. Были отобраны образцы льда из жил по вертикали и по горизонтали. Для исследования генезиса вод, участвовавших в формировании голоценовых повторно-жильных и текстурных льдов из вмещающих их отложений, было выполнено определение содержания микроэлементов и тяжелых металлов. Определение микроэлементов и тяжелых металлов проводилось на атомно-абсорбционном спектрофотометре (AAS-3) в Почвенном институте им. В.В. Докучаева. Там же выполнены определения минерализации и химического состава воднорастворимых солей в сегрегационных и

повторно-жильных льдах. Радиоуглеродное датирование вмещающих отложений для определения возраста жил выполнено в Геологическом институте РАН. Голоценовые повторно-жильные льды характеризуются ультрапресным и пресным составом, минерализация варьирует от 20 до 200 мг/л, в составе ионов преобладают гидрокарбонаты и кальций. Повышенное содержание хлоридов в ПЖЛ на высоких элементах рельефа указывает на захват снегом морских аэрозолей, для ПЖЛ на пойме – на непосредственное участие в формировании льда жил речных вод в период нагонов с акватории Обской губы. Повышенное содержание в некоторых фрагментах жил железа, сопоставимое с его содержанием в сегрегационных льдах в торфянике, возможно, указывает на периодическое участие в формировании льда жил болотных вод. Сегрегационный лед иногда имеет более высокую минерализацию и содержание микроэлементов, указывая на значительное поступление их из торфа и минеральных отложений.

Ключевые слова: повторно-жильные льды, голоцен, минерализация, ионный состав, микроэлементы, тяжелые металлы, пойменные отложения, торфяники, лаида, сегрегационные льды

DOI: 10.7256/2453-8922.2017.1.22485

Дата направления в редакцию: 29-03-2017

Дата публикации: 02-04-2017

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083, анализ результатов) и бюджетного финансирования Московского университета имени М.В. Ломоносова с использованием масс-спектрометрического оборудования, приобретенного на средства Программы развития МГУ.

Abstract. The authors study the Holocene syngenetic ice wedge casts of five regions of the Yamal Peninsula: within the thick peat bogs in the Shchuchya River valley and near the Seyakha settlement, in the floodplain of the Erkutayakha and Lakkatoso Rivers and within floodplain sediments of the Ob Bay in vicinity of the Mys Kamenny settlement in eastern coast of Yamal Peninsula. The width of the top of ice wedges in peatlands varies from 0.5 to 1.6 m, their height is from 2 to 5 m, the width of the ice wedges in the floodplain and marsh and swamp also varies from 0.5 to 1.8 m, the visible height is not more than 2 meters. Samples of ice were taken from ice wedges vertically and horizontally. To study the genesis of the water that participated in the formation of Holocene ice wedge casts and ice lenses from the enclosing sediments, the author analyze the content of trace elements and heavy metals. The analysis of trace elements and heavy metals is based on atomic absorption spectrophotometer (AAS-3) at the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. The mineralization and chemical composition of water-soluble salts in segregated and ice wedges are determined in the same place. The radiocarbon dating of the surrounding sediments aging of the ice wedges is carried out at the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences. Holocene ice wedges are ultra-fresh and fresh, their mineralization varies from 20 to 200 mg / l, hydrocarbonates and calcium dominate in the ion composition. Participation of chlorides in the ice wedges on terraces indicates the influence of marine aerosols, the same for the ice wedges on the floodplain means the direct participation water of Ob Bay in their formation. The increasing of iron ions in some fragments of ice wedges, comparable to their content in segregated ice in the peat bog, may indicate a periodic participation of swamp waters in the formation of ice wedges.

Keywords: peatlands, floodplain deposits, heavy metals, trace elements, ion composition, salinity level, Holocene, ice wedge casts, laida, segregated ice

Введение

Анализ данных о химическом составе льда показывает, что вероятность встречи на севере Западной Сибири опресненных и слабозасоленных (это классификационные, а не качественные названия) повторно-жильных льдов с величиной общей минерализации более 200 мг/л не превышает 10%.

При этом в 28% изученных проб содержание иона хлора превышает 20 мг/л, а в 80% оно более 100 мг/л. Эти два показателя – высокая минерализация и большое содержание хлоридов, пожалуй, наиболее убедительные индикаторы палеофациальных условий [\[1, 2\]](#).

Несмотря на редкую встречаемость слабозасоленных разностей повторно-жильных льдов, пренебрегать ими не следует, так как именно эти жилы являются прямыми индикаторами морского или лагунно-морского режима осадконакопления (в условиях верхней литорали и пляжа) во время их формирования.

Районы исследований и методы измерений

Детально исследованы голоценовые повторно-жильные льды (ПЖЛ) в пяти районах полуострова Ямал: а) в долине р.Щучья; б) в долине р.Еркутаяха; в) близ пос. Мыс Каменный; г) в низовьях р.Ляккатосё; г) близ пос. Сеяха (рис. 1).

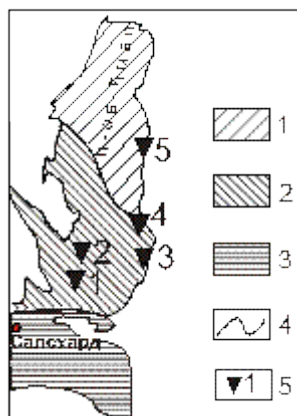


Рис. 1. Схема расположения голоценовых полигональных массивов с повторно-жильными льдами на юге и в центральной части полуострова Ямал. Мерзлотные зоны: 1 – 2 – зона сплошного распространения многолетнемёрзлых пород: 1 – среднегодовая температура пород ниже -5°C , 2 – температура от -3 до -5°C , 3 – зона массивно-островного и островного с поверхности распространения многолетнемёрзлых пород, среднегодовая температура пород от 0 до -3°C ; 4 – границы мерзлотных зон; 5 – расположение геологически охарактеризованных повторно-жильных льдов: 1 – в долине р.Щучья, 2 – в долине р.Еркутаяха, 3 – у пос. Мыс Каменный, 4 – в низовьях р.Ляккатосё, 5 – близ пос. Сеяха

Голоценовая сингенетическая толща высокой поймы с повторно-жильными льдами исследована на левом берегу р.Еркутаяха. Высота поверхности высокой поймы над меженным уровнем реки достигает 2,5-3 м. На поверхности поймы встречаются более сухие и более увлажненные участки с полигональным рельефом. На глубине 0,4 м вскрывается жила льда шириной в верхней части 0,8 м. Лед жилы чистый, без примесей, отчетливо видны элементарные жилки шириной до 0,4-0,5 см. Сверху к ледяной жиле примыкает грунтовая оторфованная жила [\[3\]](#).

Детально изучен разрез мощного (5-5,5 м) торфяника в долине р.Щучья на Южном Ямале. Самым выразительным геокриологическим элементом разреза является

обнажение крупных (высотой более 5 м) сингенетических повторно-жильных льдов, рассекающих всю толщу торфа и проникающих в подстилающие торф озерные супеси и глины [4].

В устье р.Сеяха (Зеленая) на восточном побережье центрального Ямала на побережье Обской губы обнаружены сингенетические повторно-жильные льды, интенсивно формировавшиеся в период голоценового "оптимума" и мощный торфяник (4,5-5 м) который накопился чрезвычайно быстро – менее чем за 0,8 тысяч лет. Сингенетические повторно-жильные льды в парагенезе с торфяными жилами (менее вероятно, что это псевдоморфозы) в первом из описываемых фрагментов, залегают практически параллельно с торфяными. Головы тех и других располагаются на одной глубине – около 0,5-0,7 м, Ледяные жилы здесь достигают по высоте 2-2,5 м, ширина головы жил более 1,6 м. Торфяные жилы достигают 2 м по вертикали, они сложены мерзлым опесчаненным торфом слабо разложившимся с веточками с сохранившейся корой, листьями дриад, камнеломок и карликовой березки [4]. В шурфах и скважинах исследованы ледяные жилы на лайде в районе пос. Мыс Каменный и в пойменных отложениях в низовьях р.Ляккатосё.

Для исследования генезиса вод, участвовавших в формировании голоценовых повторно-жильных и текстурных льдов, было выполнено определение содержания микроэлементов и тяжелых металлов. Определение микроэлементов и тяжелых металлов проводилось на атомно-абсорбционном спектрофотометре (AAS-3) в Почвенном институте им. В.В. Докучаева. Там же выполнены определения минерализации и химического состава воднорастворимых солей в сегрегационных и повторно-жильных льдах. Радиоуглеродное датирование вмещающих отложений для определения возраста жил выполнено в Геологическом институте РАН.

Результаты и обсуждение

Долина р.Еркутаяха. Голоценовая сингенетическая толща высокой поймы с повторно-жильными льдами исследована на левом берегу р.Еркутаяха. Высота поверхности высокой поймы над меженным уровнем реки достигает 2,5–3 м. На поверхности поймы встречаются более сухие и более увлажненные участки с полигональным рельефом. В пределах более сухих участков полигоны выражены отчетливее. Здесь отмечаются зияющие морозобойные трещины шириной до 5 см. В одном из характерных фрагментов берегового обнажения сверху-вниз вскрывается (рис. 2):

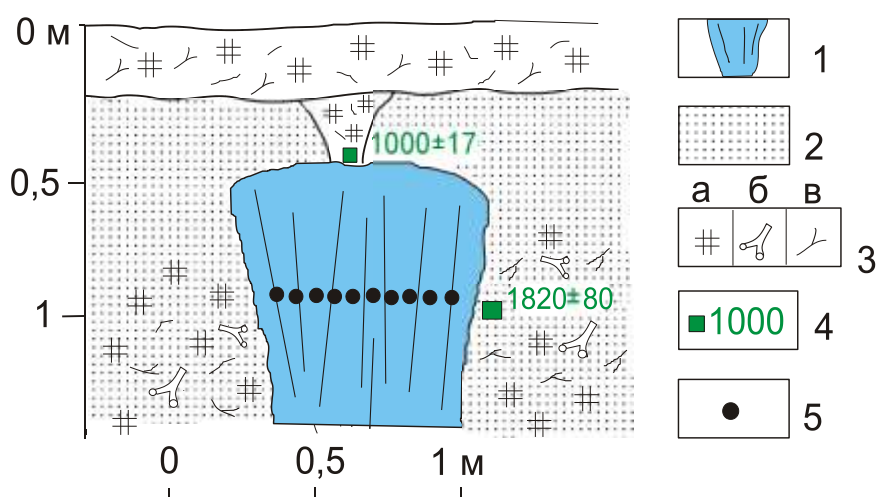


Рис. 2. Повторно-жильные льды в верхней части разреза поймы в долине р.Еркутаяха: 1 – лед жилы; 2 – песок; 3 – торф (а), веточки (б), корешки (в); 4 – радиоуглеродные датировки; 5 – отбор образцов повторно-жильного льда на геохимический анализ

0-0,2 м – торф коричневый, со стебельками и корнями растений, на глубине 12 и 17 см отмечаются слои темно-коричневого торфа мощностью 2-3 см.

0,2-0,7 м – песок серый с массивной криотекстурой.

0,7-1,5 м – песок сильно оторфованный, слоистый, с массивной и слоистой тонкошлировой криотекстурой.

На глубине 0,4 м вскрывается жила льда шириной в верхней части 0,8 м.

Лед жилы чистый, без примесей, отчетливо видны элементарные жилки шириной до 0,4-0,5 см. Сверху к ледяной жиле примыкает грунтовая оторфованная жила. Радиоуглеродным датированием установлен молодой возраст жилы, и вмещающих ее отложений. Возраст торфа из грунтовой жилы с глубины 0,3 м (375-YuV/5) составил 1000 ± 170 лет (ГИН-10632), а скопления корешков на глубине 1,0 м (375-YuV/13) датированы в 1820 ± 80 лет (ГИН-10986).

Среди микроэлементов в повторно-жильных льдах в долине р.Еркутаяха преобладает железо, значимые концентрации отмечаются для марганца и в некоторых образцах – для меди (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1

Микроэлементы и тяжелые металлы в голоценовых повторно-жильных льдах, в среднем течении р.Еркутаяха

№ образца	Расстояние от левого края жилы, см	Содержание микроэлементов, мкг/л			
		Fe	Zn	Cu	Mn
375-YuV/27	7-14	560	17,4	30	190
375-YuV/29	28	163	–	20	140
375-YuV/30	28-40	280	–	22	143
375-YuV/4	30-40	3672	0	33	150
375-YuV/9	40	1149	3,6	34	8,5
375-YuV/31	40-50	112	–	26	276
375-YuV/32	50-54	270	–	310	290
375-YuV/33	54-64	133	–	16	127
375-YuV/34	64-70	430	–	30	140
375-YuV/35	70-80	570	–	37	259

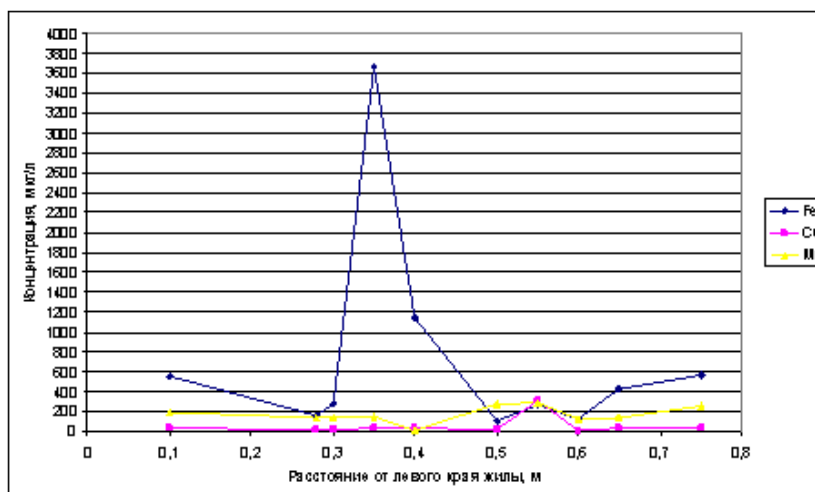


Рис. 3. Концентрация микроэлементов и тяжелых металлов в повторно-жильном льду в долине р.Еркутаяха, Южный Ямал

В образцах из центральной части жилы концентрация железа оказалась наиболее высокой и составила 1149-3672 мкг/л. В образцах из краевой части жилы, содержание железа составило 163-560 мкг/л. Концентрация марганца изменялась от 8,5 до 290 мкг/л, максимальные значения отмечаются в центральной и краевой частях – 276-290 мкг/л и 259 мкг/л, соответственно. Содержание меди в среднем варьировало от 16 до 37 мкг/л, в средней части жилы отмечено значение концентрации меди 310 мкг/л (см. рис. 3).

Долина р.Щучья. В обнажении торфяника мощностью 5,5 м на глубине 3 м вскрыты ледяные жилы (рис. 4): жила № 1 шириной около 0,5 м в верхней части, мощностью более 1,5 м, лед жилы белый, прозрачный, отчетливо видны элементарные жилки; жила № 2 шириной 0,5 м в верхней части, 0,25 м – в нижней, мощностью 1,5 м. Хвосты жил проникают подстилающие торф озерную серую супесь, горизонтально-слоистую (слои от 1 мм до 20 см) местами ожелезненную, слабо оторфованную со слоистой криотекстурой.

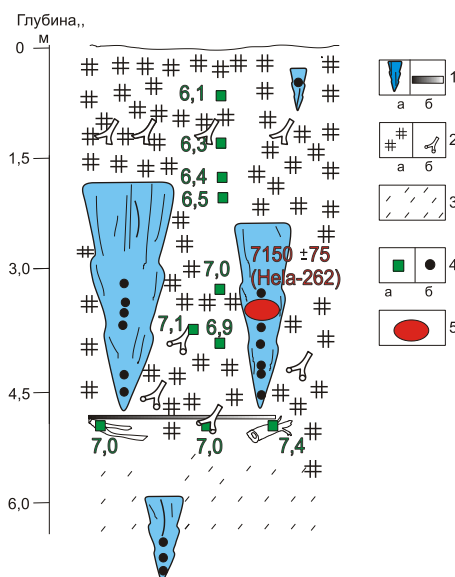


Рис. 4. Полигонально-жильный массив в мощном торфянике в долине р.Щучья на Южном Ямале: 1 – повторно-жильный лед; 2 – торф (а), стволы, корни и ветки деревьев (б); 3 – супесь; 4 – точки отбора образцов: а – на радиоуглеродный сцинтилляционный анализ, б – на геохимический анализ; 5 – на радиоуглеродный ускорительный масс-спектрометрический анализ из повторно-жильного льда

Из разреза торфяника был выполнен детальный отбор образцов для радиоуглеродных определений, в Радиоуглеродной лаборатории Хельсинского университета. Показано, что возраст торфяника в краевой части оказался тем же, что и в центральной части: подошва торфяника и начало накопления древесного горизонта датированы 7,4-7,1 тыс. лет, а кровля торфяника 6,1 тыс. лет. Самым примечательным является то, что синхронно накоплению древесного горизонта формировались мощные сингенетические ледяные жилы. На это указывает и радиоуглеродная AMS-датировка стебелька мха, взятого из осевой части ледяной жилы – 7150 ± 75 лет (Hela – 262), демонстрирующая, что формирование льда началось сразу же после начала накопления торфа.

Минерализация повторно-жильных льдов в торфянике в долине р.Щучья очень низкая, варьирует от 18 до 77 мг/л. В составе ионов преобладают гидрокарбонаты (6-50 мг/л) и кальций (2-11 мг/л), содержание остальных ионов очень низкое, не превышает 10 мг/л (см. табл. 2). В жиле №1 прослеживается тенденция повышения минерализации с глубиной (рис. 5). Сегрегационные льды из вмещающих отложений несколько более

минерализованы, минерализация возрастает снизу-вверх от 20 до 143-210 мг/л, состав также гидрокарбонато-кальциевый (см. табл. 2, рис. 6).

Таблица 2

Минерализация (М), химический состав водно-растворимых солей в подземных льдах в торфянике в долине р.Щучья

№ образца	Глубина от поверх- ности, м	М., мг/л	Анионы, мг/л			Катионы, мг/л			
			HCO- 3	Cl-	SO2- 4	Ca2+	Mg2+	Na+	K+
Сингенетический повторно-жильный лед									
<i>Жила 1</i>									
364- YuV/39	3,7-3,8	18	7	3	4	2	1	1	1
364- YuV/28	4,3-4,35	60	37	4	4	7	5	3	–
364- YuV/14	4,6-4,7	77	50	5	4	11	5	2	–
<i>Жила 2</i>									
364- YuV/97	3,5	18	7	3	4	2	1	1	1
364- YuV/95	3,6	18	7	4	4	2	1	1	1
364- YuV/92	3,75	26	7	4	10	2	2	1	1
364- YuV/86	4,6	21	6	4	6	2	2	1	1
Сингенетический погребенный лед в супеси									
364- YuV/40	6,5-6,55	18	8	3	4	1	1	1	1
364- YuV/41	6,55-6,65	20	9	3	4	1	2	1	1
364- YuV/42	6,60	29	16	3	4	2	3	1	1
364- YuV/43	6,65-6,75	58	35	3	4	10	4	1	1
Сегрегационный пузырьчатый лед из супеси, подстилающей торфяник									
364- YuV/44	6,75	38	26	3	4	2	2	1	1
Сегрегационный лед из торфяника									
364- YuV/72	1,25-1,3	143	121	4	8	6	2	1	2
364- YuV/78	1,7-1,75	210	181	4	6	13	5	1	1
364- YuV/60	1,75-1,8	105	91	4	4	3	2	1	1
364- YuV/51	2,3-2,35	69	58	3	4	1	2	1	1
364- YuV/48	2,7-2,8	25	9	3	8	2	2	1	1
364- YuV/45	3,6-3,7	20	7	3	4	2	3	1	1
364- YuV/84	4,8	20	5	5	6	2	1	1	1

Вода из Оби									
364- YuV/5	0	83	54	7	8	10	6	5	–
Жила №1					Жила №2				

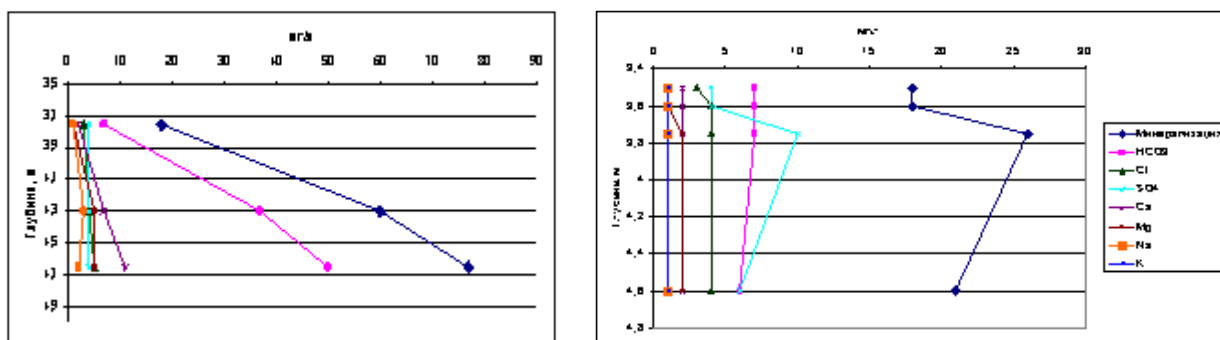


Рис. 5. Вариации значений минерализации и содержания основных ионов в повторно-жильных льдах из торфяников долине р.Щучья

Для оценки источников возможного привноса аэрозолей на исследуемую территорию и характера торфонакопления приведен анализ концентрации железа, марганца, цинка, меди, стронция и кобальта (табл. 3). В повторно-жильных льдах преобладают железо и цинк: концентрация железа варьирует от 60 до 1980 мкг/л, цинка – от 10 до 490 мкг/л, максимумы приурочены к средней части жил.

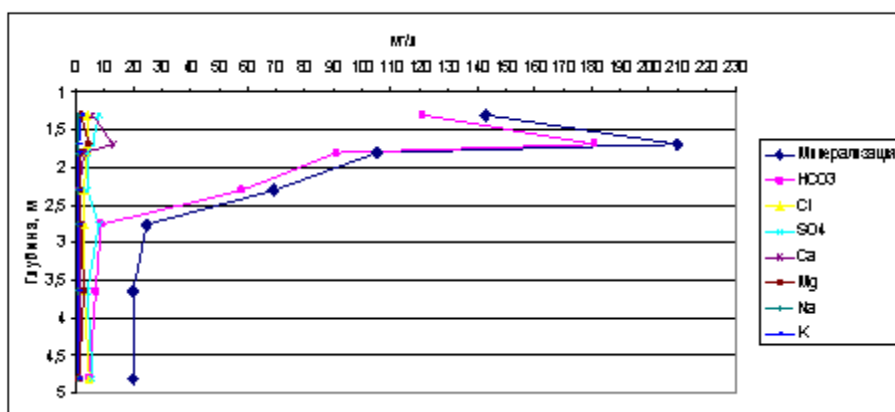


Рис. 6. Вариации значений минерализации и содержания основных ионов в сегрегационном льду из торфяников долине р.Щучья

Таблица 3

Состав и содержание микроэлементов и тяжелых металлов в подземных льдах в торфянике в долине р.Щучья

Полевой номер	Глубина от поверхности, м	Микроэлементы, мкг/л					
		Fe	Mn	Zn	Cu	Sr	Co
Повторно-жильный лед							
<i>Жила 1</i>							
364- YuV/79	3,6-3,65	160	<10	<10	10	<50	<5
364- YuV/39	3,7-3,8	320	10	110	10	<50	7
364-	4.0-4.07	370	10	10	<10	<50	<5

YuV/35							
364-YuV/28	4,3-4,35	1980	90	130	10	<50	7
364-YuV/14	4,6-4,7	60	10	260	<10	<50	6
364-YuV/40	6,5-6,55	600	20	490	<10	50	6
364-YuV/41	6,55-6,65	300	10	190	<10	<50	9
364-YuV/42	6,60	1750	20	150	10	<50	11
364-YuV/43	6,65-6,75	1300	20	190	10	<50	6
<i>Жила 2</i>							
364-YuV/101	3,4	150	40	470	10	80	6
364-YuV/97	3,5	240	<10	220	20	<50	8
364-YuV/95	3,6	180	20	170	10	<50	5
364-YuV/92	3,75	220	20	160	10	<50	-
364-YuV/86	4,6	250	150	100	10	<50	<5
Сегрегационный пузырьчатый лед из супеси							
364-YuV/44	6,75	600	10	100	<10	<50	<5
Сегрегационный лед из торфяника							
364-YuV/67	0,7-0,8	310	20	<10	10	<50	<5
364-YuV/69	0,9-1,0	100	10	<10	10	50	<5
364-YuV/72	1,25-1,3	200	20	1110	<10	60	5
364-YuV/74	1,35-1,4	2180	340	<10	<10	60	6
364-YuV/76	1,45-1,5	1280	150	<10	10	70	6
364-YuV/78	1,7-1,75	160	150	120	<10	<50	7
364-YuV/60	1,75-1,8	120	40	400	<10	<50	6
364-YuV/52	1,95-2,05	320	30	<10	20	<50	<5
364-YuV/51	2,3-2,35	60	20	280	10	<50	7
364-YuV/50	2,35-2,4	170	10	<10	10	<50	<5
364-YuV/49	2,55-2,6	160	320	30	20	70	<5
364-YuV/48	2,7-2,8	120	50	160	<10	<50	<5
364-YuV/45	3,6-3,7	90	50	150	<10	60	6
364-YuV/84	4,8	60	<10	<10	<10	<50	5

Вода из Оби							
364- YuV/5	0	40	30	140	<10	<50	<5

В текстурообразующих льдах преобладают железо и марганец, их содержание заметно выше, чем в повторно-жильных льдах. Содержание железа составляет от 60 до 2180 мг/л, марганца – от 10 до 340 мг/л. Железо достигает максимальных концентраций в средней части разреза, марганец – в средней и нижней части, что вероятно, связано с особенностями накопления и сингенетического промерзания осадков болотной фации. Для некоторых горизонтов отмечены высокие значения концентрации цинка – от 120 до 1110 мкг/л.

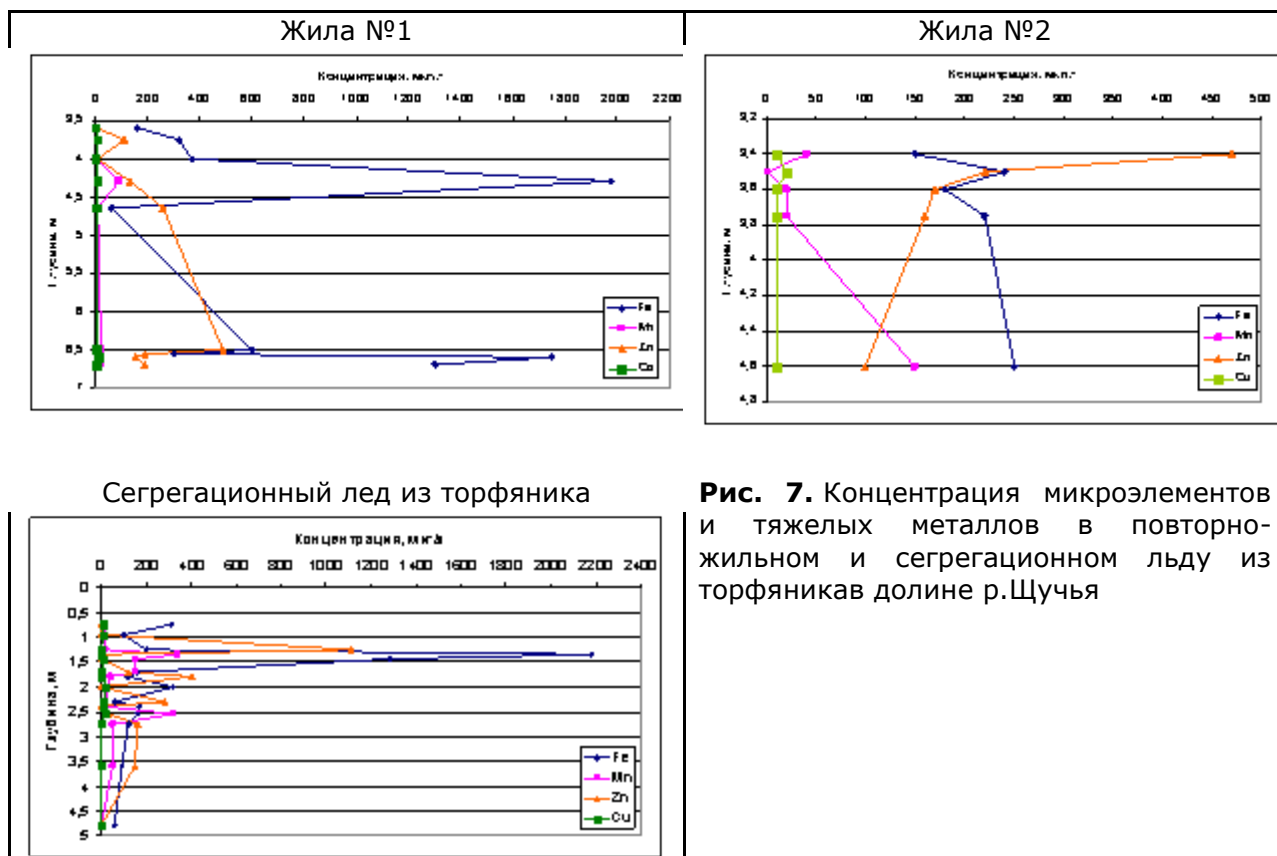


Рис. 7. Концентрация микроэлементов и тяжелых металлов в повторно-жильном и сегрегационном льду из торфяников долины р.Щучья

Устье р.Сеяха (Зеленая). Сингенетические повторно-жильные льды в парагенезе с торфяными жилами залегают практически параллельно с торфяными (рис. 8).

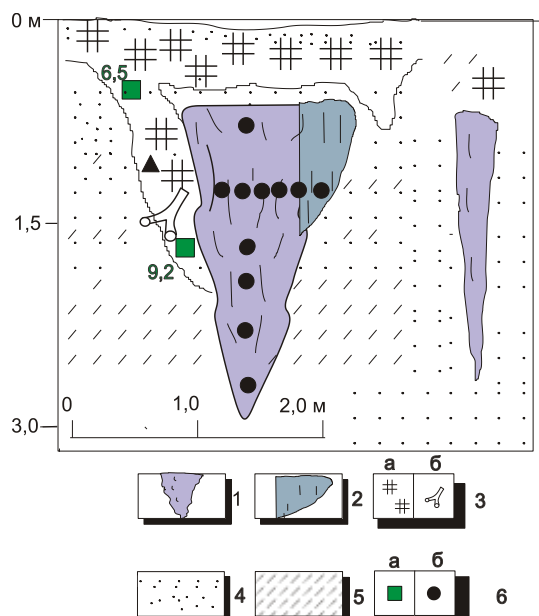


Рис. 8. Полигонально-жильный массив в мощном торфянике в устье р.Сеяха (Зеленая), близ пос. Сеяха: 1 – повторно-жильные льды; 2 – сахарно-белый лед "каймы"; 3 – растительные остатки: торф (а), стволы, ветки и корни берез (б); 4 – песок; 5 – супесь; 6 – точки отбора образцов: органики на радиоуглеродный анализ (а) и повторно-жильных льдов на геохимический анализ (б)

Головы тех и других располагаются на одной глубине, около 0,5-0,7 м, Ледяные жилы здесь достигают по высоте 2-2,5 м, они представлены розовато-коричневым льдом, ширина головы жил более 1,6 м, на боковых контактах жил отмечается белый сахаристый лед (примерно 0,1 м в ширину). Торфяные жилы достигают 2 м по вертикали, они сложены мерзлым опесчаненным слабо-разложившимся торфом. Вмещающие жилы отложения представлены желтоватым мелким оторфованным песком с включениями веточек и гнездами оторфования. Непосредственно над головой жил залегает серовато-коричневый оторфованный тонкослоистый песок. Во льду жил отмечается низкая минерализация – 24-27 мг/л (табл. 4), в ионном составе преобладают гидрокарбонаты (6-10 мг/л), хлор (7-8 мг/л) и кальций (2-4 мг/л).

Таблица 4

Минерализация (М) и состав воднорастворимых солей повторно-жильных и сегрегационных текстурообразующих льдов Сеяхинских голоценовых отложений

№ образца	Глубина от поверх- ности, м	М., мг/л	Анионы, мг/л			Катионы, мг/л				pH
			HCO- 3	Cl-	SO2- 4	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	
Повторно-жильный лед										
363- YuV/194	1,4	24	7	7	4	4	1	1	1	
363- YuV/191	1,7	24	6	7	4	4	1	2	1	
363- YuV/188	2,5	27	10	8	4	2	1	2	1	
Сегрегационный лед из вмещающих жилы отложений										
363- YuV/200	1,0	24	7	5	6	3	1	1	1	7,5
Сегрегационный лед из торфяника										
363- YuV/148	0,6	18	2	9	4	2	1	1	1	4,6
363- YuV/200	1,0	24	7	5	6	3	1	2	–	
363- YuV/154	1,2	76	24	9	4	28	8	3	1	6,8

363- YuV/162	2,0	71	44	5	4	14	3	1	1	
363- YuV/169	2,6	189	148	5	4	30	1	1	1	8,6
363- YuV/172	2,7	430	340	14	4	38	28	6	1	9,2
363- YuV/173	2,9	452	377	14	6	14	33	8	1	
363- YuV/180	3,5	576	467	14	4	56	27	8	1	9,1
363- YuV/186	3,9	137	89	9	4	18	13	4	1	
Современный росток повторно-жильного льда										
363- YuV/216	+19,35	25	5	7	8	4	1	1	1	5,8

Для текстурообразующих льдов в торфянике отмечено последовательное изменение минерализации с глубиной. В придонных частях торфяной залежи минерализация ледяных шлиров составляет 576–430 мг/л в средней части – 189 мг/л, а в приповерхностных ее частях – 76–18 мг/л (рис. 9).

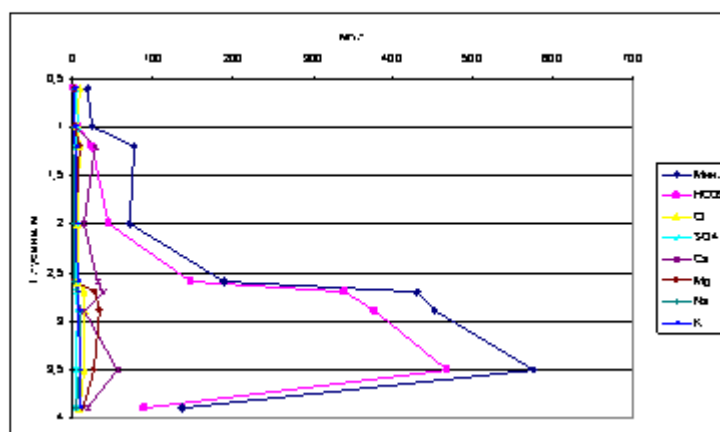


Рис. 9. Вариации значений минерализации и содержания основных ионов в сегрегационном льду из торфяника в устье р.Сеяха

При этом столь же закономерно уменьшается снизу-вверх содержание бикарбонатов от 467–340 до 24–2 мг/л. Обращает на себя внимание стабильное невысокое содержание сульфатов, заметное присутствие ионов кальция и магния, причем содержание первых также очень плавно и закономерно уменьшается с глубиной (см. табл. 4).

Весьма примечательно и изменение pH с глубиной: в придонных частях торфяника сегрегационные льды характеризуются явно выраженным щелочным типом, в средней части близки к нейтральным, а в верхней они кислого типа.

Пос. Мыс Каменный. В районе пос. Мыс Каменный были исследованы голоценовые повторно-жильные льды на лайде. Абсолютная высота поверхности лайды 2,5 м. На поверхности отмечен полигональный рельеф на стадии зарождения и развития. Размер полигонов варьирует от 7х10 м до 20х20 м. В шурфе, заложенном поперек межполигональной канавки, вскрываются сверху-вниз (рис.10, а):

0–0,2 м – сезонно-талый слой – торф коричневый, верховой, мощность торфяного слоя варьирует от 5 до 20 см;

0,2-0,3 м – песок мелкозернистый, оторфованный, косослоистый, с массивной криотекстурой;

0,3-0,37 м – торф черный, низинный, опесчаненный, мерзлый, криотекстура неяснослоистая, тонкошлировая. В толще прослеживается элементарная ледяная жилка шириной 2 см;

0,37-0,56 м – торф серо-коричневый, верховой, мерзлый, криотекстура неполносетчатая, тонкошлировая;

0,56-0,63 м – песок тонкозернистый, светло-серый.

На границе торфа и песка залегает ледяная жила шириной в верхней части до 0,35 м, сложенная более чем 100 элементарными жилками. Мощность вскрытого фрагмента жилы около 0,5 м до дна шурфа. На боковых контактах жилы с вмещающим песком отмечены прослои льда мощностью 1-2 см. Над головой жилы расположен горизонтальный шпир льда, примыкающий к осевой части жилы. Лед жилы содержит ксенолиты оторфованного песка, размерами 4-5х2-3 см.

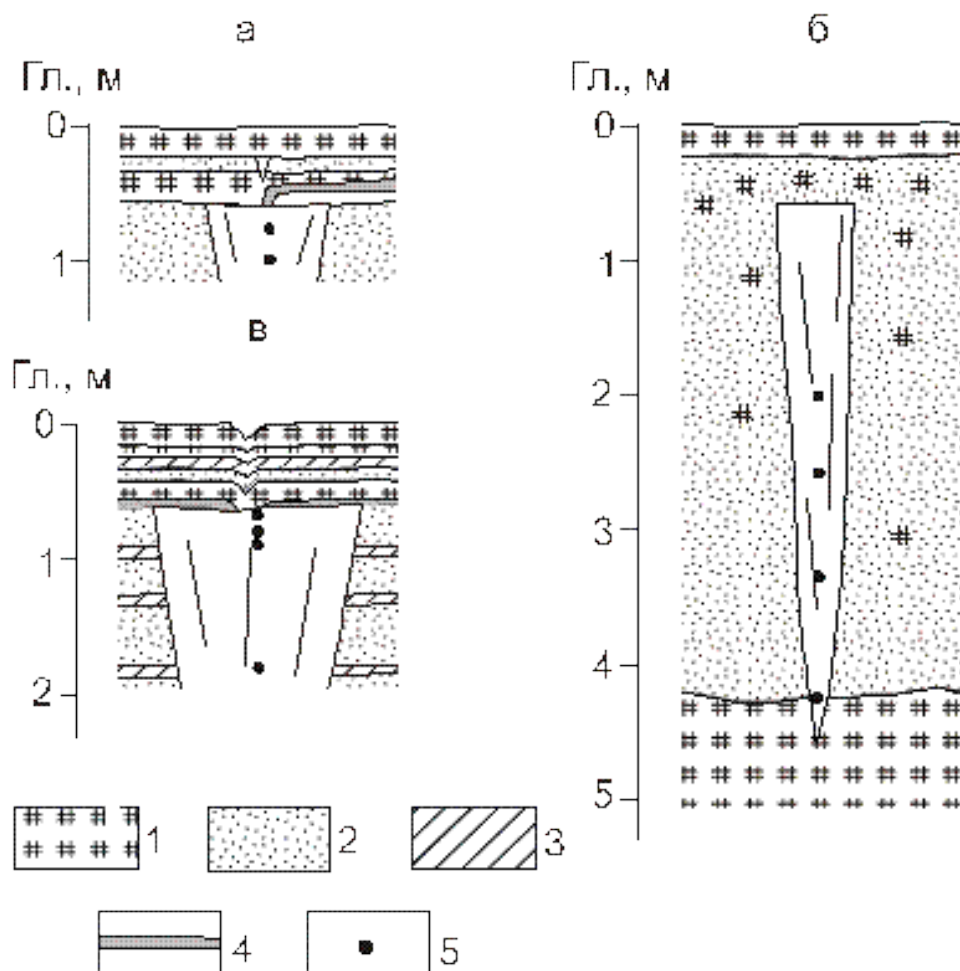


Рис. 10. Повторно-жильные льды в отложениях лайды в районе пос. Мыс Каменный, Южный Ямал (а – точка 172-YuV, б – точка 176- YuV, в – точка 177-YuV): 1 – повторно-жильный лед; 2 – песок; 3 – суглинок; 4 – горизонтальный шпир льда; 5 – точки отбора образцов льда на геохимический анализ

В 70 м северо-западнее скважиной в точке пересечения полигональных трещин, вскрыто (рис. 10, б):

0-0,25 м – сезонно-талый слой – торф коричневый, верховой, опесчаненный;

0,25-0,4 м – переслаивание песка серого тонкозернистого, мощность слоев 5-10 см, и торфа рыже-коричневого опесчаненного, мощность прослоев 10-15 см. Криотекстура массивная, льдистость не более 5%.

В интервале глубин 0,4-4,2 м скважиной вскрыт повторно-жильный лед:

0,4-3,0 м – лед слоистый, матовый, с большим количеством пузырьков воздуха и ксенолитами песка;

3,0-3,4 м – лед матовый, элементарные жилки выражены слабо;

3,4-4,2 м – лед матовый, неслоистый, с отдельными зернами льда;

4,2-5,05 м – торф коричнево-черный, криотекстура базальная. Торф подстилается песком светло-серым, неслоистым.

В 4 м севернее предыдущей точки в шурфе, заложенном поперек межполигональной канавки, вскрыто (рис. 10, в):

0,0-0,15 м – сезонно-талый слой – моховой слой;

0,15-0,5 м – переслаивание заиленного суглинка, торфа темно-коричневого и светло-серого песка, слои образуют грунтовую жилу под канавкой.

На глубине 0,5 м вскрыта ледяная жила, шириной в верхней части 1,8 м. На контакте головы жилы с вышележащими породами отмечен мощный прослой льда столбчатой структуры. В интервале 1,0-1,25 м отмечена горизонтальная и слабонаклонная слоистость льда. Скважиной лед вскрыт до глубины 2 м.

Минерализация льда жил низкая, не превышает 76 мг/л, составляя в среднем 35-50 мг/л (табл. 5, рис. 11). В ледяной жиле в т. 172 высокая более высокая минерализация обусловлена высоким содержанием гидрокарбонатов – 97,6 мг/л, также здесь отмечена наиболее высокая концентрация железа – 26 мг/л. Во льду других жил также преобладают гидрокарбонаты (см. рис. 11), в меньшей концентрации – от 9,8 до 61 мг/л, кальций (1,8-5,6 мг/л) и сумма натрия и калия (0,7-5,8 мг/л). В двух жилах на глубинах 1-2 м отмечены повышенные значения суммы натрия и калия (11,3 и 22,3 мг/л).

Таблица 5

Содержание и состав воднорастворимых солей в повторно-жильных льдах на лайде близ пос. Мыс Каменный

№ образца	Гл. отбора, м	М., мг/л	Анионы, мг/л			Катионы, мг/л			Fe общ., мг/л	pH	
			HCO-3	Cl-	SO2-4	Ca2+	Mg2+	Na++ K+			
Жила 1											
172- YuV /1	0,85-1,0	50,0	9,8	5,3	3,3	5,6	0,6	0,7	0,4	4,5	
172- YuV	1,0-1,1	–	97,6	7,8	1,6	3,6	2,2	1,15	26,0	6,45	

/2											
Жила 2											
176- /2	YuV	1,5-2,5	50,0	36,6	3,3	4,9	3,6	1,2	11,27	–	6,05
176- /3	YuV	2,5-3,0	40,0	12,2	5,3	2,5	2,8	1,1	3,0	0,7	5,25
176- /4	YuV	3,0-3,4	26,0	12,2	4,6	3,3	2,2	0,8	4,8	0,2	5,4
176- /6	YuV	4,2-4,5	30,0	18,3	2,6	4,1	2,8	1,7	3,9	–	6,2
Жила 3											
177- /2	YuV	0,5	24,0	12,2	2,6	3,3	2,2	0,8	3,4	0,2	5,4
177- /4	YuV	0,75- 0,8	36,0	24,4	2,6	2,5	1,8	1,1	5,78	1,4	7,25
177- /10	YuV	0,8- 0,95	76,0	61,0	8,0	2,5	4,6	0,6	22,3	–	7,0
177- /9	YuV	1,7-1,9	32,0	9,8	6,6	6,6	4,6	1,1	3,9	0,1	4,6

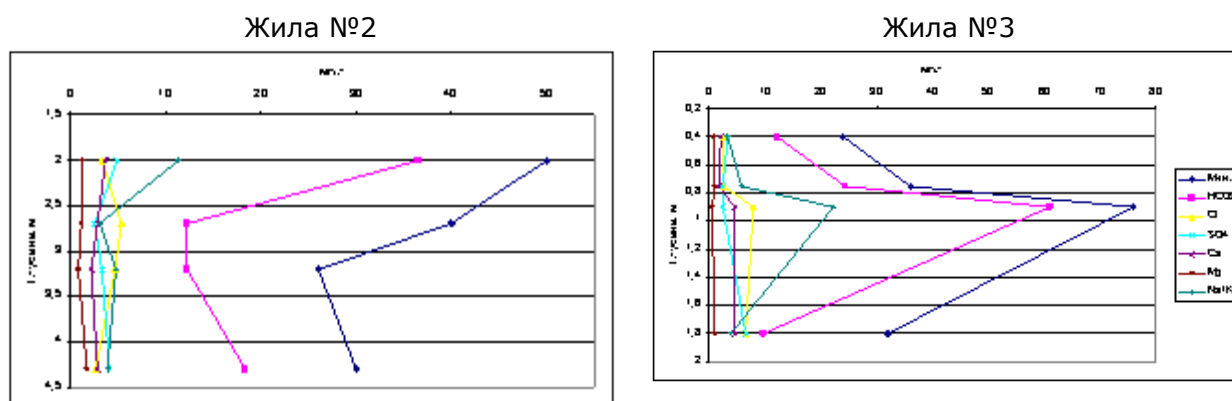


Рис. 11. Вариации значений минерализации и содержания основных ионов в повторно-жильных льдах на лаиде близ пос. Мыс Каменный

Низовья р.Ляккатосё. Правый берег р.Ляккатосё, абсолютная высота поверхности поймы 4-5 м. Поверхность плоская, с полигонально-валиковым рельефом, полигоны часто оконтурены открытыми морозобойными трещинами. Берег реки обрывистый, в береговом обнажении после сильного паводка в результате прилива и нагона в устье реки со стороны Обской губы вскрыты повторно-жильные льды. Высота паводка достигала 2,5 м, что привело к затоплению части высокой поймы. Ширина вскрытых в береговом обнажении жил достигает 1,2-1,5 м. В осевой части одной из жил много минеральных примесей, до 40%, формирующих вертикальную слоистость, которая исчезает от центра к краям жилы.

Скважиной, заложенной в 1,5 м от берега, вскрыто (рис. 12, а):

0-0,22 м – сезонно-талый слой – торф и мох;

0,22-0,3 м – супесь серая с рыжими пятнами. Криотекстура массивная, льдистость 5%;

0,3-0,6 м – супесь серая оторфованная, криотекстура тонко- и среднешлировая, льдистость 80%;

0,6-7,1 м – переслаивание горизонтов песка с разной криотекстурой и льдистостью от 5 до 10%.

На глубине 0,6 м залегает ледяная жила, сложенная в верхней части серым мутным льдом, основная часть жилы представлена белым мутным льдом с прослоями прозрачного, содержание минеральных примесей во льду уменьшается сверху-вниз.

Скважиной (Точка 188-ЮВ) на поверхности поймы вскрыта ледяная жила на глубине 0,7 м (рис. 12, б). Над головой жилы залегает горизонтальный шпир льда мощностью 3 см, простирающийся вдоль всей береговой зоны. Перекрывающие жилу отложения сильнольдистые, криотекстура от микролинзовидно-слоистой до неполносетчатой, встречаются включения и примазки торфа. Над осевой частью жилы по трещине располагается росток шириной в верхней части 7 см.

Минерализация льда жил отличается: в первой жиле минерализация в целом низкая, от 48 до 88 мг/л, за исключением верхней части жилы, в которой минерализация составляет 182 мг/л. Для второй жилы минерализация льда, за исключением верхнего слоя льда, варьирует в диапазоне 150-200 мг/л (табл. 6, рис. 13). В составе ионов во льду обеих жил преобладают гидрокарбонаты (от 12,2 до 85,4 мг/л), хлориды (от 10,6 до 37,2 мг/л) и сумма натрия и калия (от 2,8 до 53,4 мг/л). Показательно, что наиболее низким значениям содержания суммы Na+ К соответствуют наиболее низкие значения pH – 4,5-4,7, наиболее высоким значениям суммы Na+ К – наиболее высокие значения pH – 7,1-7,5 (см. табл. 6).

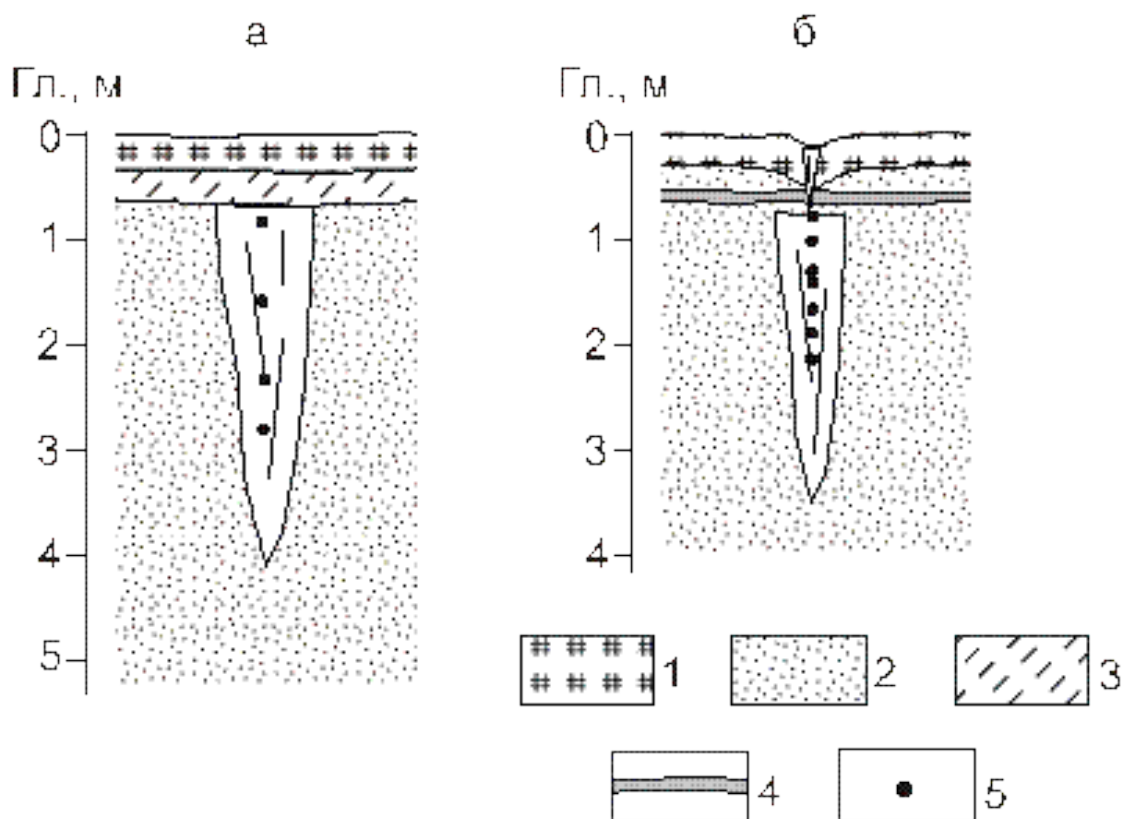


Рис. 12. Повторно-жильные льды в пойменных отложениях р.Ляккатосё, Центральный Ямал (а – точка 186-YuV, б – точка 188-YuV): 1 – повторно-жильный лед; 2 – песок; 3 – супесь; 4 – горизонтальный шпир льда; 5 – точки отбора образцов льда на геохимический анализ

Таблица 6

Содержание и состав воднорастворимых солей в повторно-жильных льдах в низовьях р.Ляккатосё

№ образца	Гл. отбора, м	М., мг/л	Анионы, мг/л			Катионы, мг/л			Fe общ.	pH
			HCO-3	Cl-	SO2-4	Ca2+	Mg2+	Na++K+		
Жила 1										
186-YuV/4	0,7-1,3	182,0	85,4	37,2	8,2	7,4	3,9	23,7	16,8	6,45
186-YuV/5	1,4-2,0	60,0	30,5	17,4	4,1	1,8	1,7	19,1	0,14	6,4
186-YuV/6	2,1-2,5	48,0	12,2	10,6	2,5	1,8	1,1	8,3	00,2	4,7
186-YuV/7	2,6-3,0	88,0	36,6	25,2	4,1	7,4	5,6	10,01	2,2	6,2
Жила 2										
188-YuV/5	0,7-0,8	90,0	24,4	15,5	4,9	2,8	1,1	16,3	-	6,7
188-YuV/8	1,0-1,15	186,0	12,2	19,0	5,8	7,4	4,5	2,8	-	4,45
188-YuV/9	1,2-1,4	152,0	48,8	35,1	30,4	4,6	2,8	44,4	0,6	6,8
188-YuV/10	1,4-1,57	174,0	42,7	28,1	43,6	5,6	5,0	38,87	-	7,5
188-YuV/11	1,7-1,76	196,0	73,2	33,7	46,9	6,4	5,6	53,4	0	7,1
188-YuV/12	1,76-2,05	160,0	18,3	24,6	45,3	6,4	4,5	28,5	0	6,65
188-YuV/13	2,06-2,3	168,0	12,2	16,9	18,1	5,6	2,2	9,9	3,2	5,45

Жила №1

Жила №2

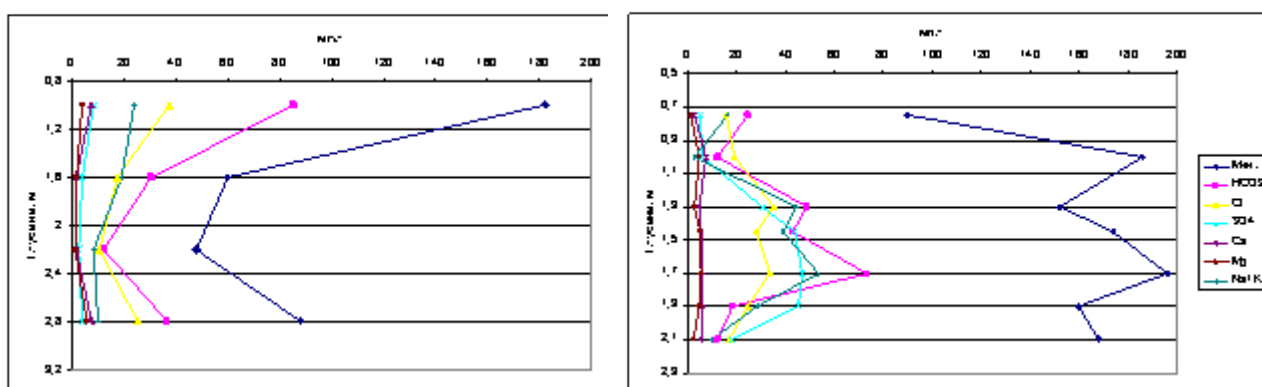


Рис. 13. Вариации значений минерализации и содержания основных ионов в повторно-жильных льдах на пойме р.Ляккатосё

Полученные результаты по геохимическому составу голоценовых повторно-жильных льдов и текстурным льдам из вмещающих их отложений показывают различия в жилах, формировавшихся на поймах и лаиде и в пределах торфяников. В ПЖЛ на пойме р.Еркутаяха преобладает железо, значимые концентрации отмечаются для марганца и в

некоторых образцах – для меди. Максимальные концентрации Fe и Mn отмечены в центральной части жилы. Минерализация льда жил на пойме р. Лаккатосё варьирует в диапазоне от 48 до 200 мг/л, в составе ионов гидрокарбонаты, хлориды и сумма натрия и калия. Значения минерализации, позволяющие отнести эти жилы к категории пресных, и преобладание хлора и натрия в составе катионов, возможно, связано с участием в формировании жил речных вод в периоды нагонов. Жилы на лайде в районе пос. Мыс Каменный имеют невысокую минерализацию (не более 76 мг/л), в составе ионов преобладают гидрокарбонаты, кальций и сумма натрия и калия.

Повторно-жильные льды в торфяниках по минерализации относятся к ультрапресным – их минерализация не превышает 80 мг/л, и, как правило, составляет 20-30 мг/л. В составе ионов преобладают гидрокарбонаты и кальций, для ПЖЛ Сеяхинского торфяника отмечено более высокое содержание хлоридов, что, возможно, говорит о непосредственном влиянии атмосферных осадков, химический состав которых формировался над акваторией слабозасоленной Обской губы. В повторно-жильных льдах торфяника на р. Щучья преобладают Fe (до 2000 мкг/л) и Zn (до 500 мкг/л), их максимальные концентрации приурочены к средней части жил, что возможно, говорит о периодическом участии в формировании жил болотных вод.

Сегрегационные текстурообразующие льды из торфяников характеризуются более высокими значениями минерализации и концентраций микроэлементов по сравнению с сингенетичными им ПЖЛ. В торфянике на р. Щучья минерализация текстурообразующих льдов достигает 210 мг/л, отмечено повышение значений снизу-вверх. Среди микроэлементов преобладает Fe и Mn, для некоторых горизонтов отмечены высокие значения концентрации цинка. Судя по более заметному присутствию микроэлементов в текстурообразующих льдах можно заключить, что, вероятно, торфонакопление происходило по евтрофному типу питания, с участием болотных вод в формировании текстурных сегрегационных льдов и при преимущественном атмосферном питании повторно-жильных льдов. В текстурообразующих льдах Сеяхинского торфяника также отмечена существенно более высокая минерализация, по сравнению с ПЖЛ (более 500 мг/л в придонной части). В верхних частях торфяника, также как и в современных жилах и в текстурообразующих льдах вмещающих голоценовые жилы отложений минерализация и химический состав практически идентичны и указывают на атмосферное питание всех этих типов льдов. Изменение минерализации текстурообразующих льдов в толще торфяника – ее постепенное снижение снизу-вверх (от 576 до 18 мг/л) указывает на то, что причиной образования озерно-болотной котловины, скорее всего, было вытаивание больших масс сильноминерализованного сегрегационного льда, содержащегося в верхней части разреза лагунно-морской террасы ^[4].

Активное развитие термокарстовых озер в результате протаивания льдонасыщенных многолетнемерзлых пород, и последующее формирование торфяников характерно арктических территорий в голоцене ^[5]. На севере Западной Сибири, в пределах полуостровов Ямал и Гыданский мощные полигональные торфяники формировались как на поймах и лайдах, так и в озерно-болотных вкладах на более высоких элементах рельефа. Показано, что скорость их накопления может превышать несколько миллиметров в год, в результате 4–5-метровый торфяник, содержащий текстурные и повторно-жильные льды, накапливается за 700–1000 лет. В основании таких торфяников часто прослеживается древесный горизонт, датируемый бореальным периодом голоцена, что подтверждает появление древесной растительности в зоне современных типичных тундр в оптимум голоцена ^[6].

Геохимический состав льда в многолетнемерзлых породах и подземных льдах во многом определяется составом отложений, а радиальное и латеральное распределение минерализации и концентраций ионов в отложениях связано с мощностью сезонно-талого слоя (СТС) и климатическими условиями летнего периода.

Так, исследование ионного состава льдистых отложений верхнего 1,5-3 м горизонта, проведенное в стенках оползней и скважинах на севере Канады, показали, что преобладающими ионами в слое СТС и во льду нижележащих ММП являются SO_4^{2-} , Ca^{2+} and Mg^{2+} , при этом их концентрация наиболее низкая в пределах СТС и возрастает в 2-10 раз в мерзлых отложениях в пределах 20-30 см зоны ниже горизонта палео-протаивания. Значения общего содержания сухого остатка (TDS) также резко возрастают ниже выделенной границы - от < 72 мг/л в слое СТС до 4173,4 мг/л ниже границы палеопротаивания. Более высокое содержание водно-растворимых ионов может быть объяснено тем, что химическое выветривание в этом слое сильно ограничено по сравнению с отложениями слоя СТС, которые ежегодно подвергаются сезонному выщелачиванию осадками и подземными водами, в то время как отложения ниже границы палео-протаивания оставались в многолетнемерзлом состоянии в течение всего голоцена. Преобладание в составе ионов сульфатов, кальция и магния, объясняется, прежде всего, вымыванием этих ионов из моренных отложений и сланцев в данном районе. Повышенное содержание ионов в пределах слоя СТС на некоторых других ключевых участках может быть связано с более высоким содержанием органического углерода в пределах СТС. Повышенное содержание Na в слое СТС связано с привносом осадками морских аэрозолей с акватории моря Бофорта [7]. Исследования состава и концентрации ионов в пределах СТС и верхнего горизонта многолетнемерзлых пород на о.Мелвил, Нунавут, Канадская Арктика, показали, что концентрация типичных водно-растворимых ионов возрастает сверху-вниз в пределах СТС при этом концентрация ионов SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Mg^{2+} резко возрастает в пределах переходного слоя от СТС к мерзлым породам. С глубиной отмечено постепенное снижение концентраций до глубины 160 см, где вновь отмечено резкое повышение концентрации SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также Cl^- [8].

Показано, что в пределах аласов в Якутии отмечено повышенное содержание Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , SO_4^{2-} и HCO_3^- , особенно в пределах верхнего 1-м слоя, что объяснено восходящим перемещением ионов с водой. Более высокое содержание ионов отмечено для участков с более глубоким протаиванием. Так, в районе Якутска, основным компонентом осадков является SO_4^{2-} (до 42%) и HCO_3^- (43-37%), а также Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , что близко соответствует ионному составу СТС. Современное засоление аласных ландшафтов Якутии обусловлено весенним поступлением талой воды и активным летним испарением [9].

Анализ поровых вод из торфяников в Западной Сибири вдоль трансекта длиной 640 км, охватывающего районы островного и сплошного развития многолетнемерзлых пород, позволил установить, что с юга на север в поровых водах возрастает содержание Mg, Ca, Al, Ti, V, Ni, Sr и некоторых других элементов, что связано с усиленным выветриванием силикатов. Концентрации ионов SO_4^{2-} , B, V, Cs, Th в поровых водах торфяных бугров выше, чем в понижениях и термокарстовых воронках, что, возможно, связано с повышенным содержанием этих элементов в самом торфе, а также длительностью нахождения воды в поровом пространстве торфа [10].

Химический состав вод тундровых озер также во многом определяется составом коры выветривания. Исследование химического состава тундровых озер на Шпицбергене в течение ряда лет показало, что преобладание в воде ионов HCO_3^- , SO_4^{2-} , and Ca^{2+} связано с широким распространением в пределах коры выветривания гипсов и ангидритов, при этом отмечено, что определенный вклад в формирование химического состава вносят морские аэрозоли (8,1%), атмосферные осадки привносят сульфаты (до 69-81%) и хлориды (14-36%) антропогенного происхождения (от ближайшего города) [11].

В Западной Сибири основными источниками поступления микроэлементов в реки являются растительный опад, почвенные горизонты, мохово-лишайниковый покров (Mn, Zn, Cu, Co, Ni, Ba, R), атмосферные аэрозоли (Cd, Pb); торфяной покров и подстилающие их минеральные отложения (Fe, Al, V и Cr); подземные воды, которые привносят в реки микроэлементы зимой с подземным стоком и через талики (для Li, B,

Ca, Mg, Sr, Mo, As, Sb, W и U). Существенное снижение (более чем в 10 раз) в концентрации Sr, Mo и U с юга на север связано со снижением концентрации этих элементов в торфе и подстилающих минеральных отложениях, а также снижением подземного стока в реки ^[12].

Говоря о геохимическом составе голоценовых повторно-жильных льдов и сегрегационных льдах из вмещающих их отложений можно отметить, что жилы формировались преимущественно из талого снега и характеризуются ультрапресным и пресным составом, даже на лайде Обской губы. Сегрегационный лед, как правило, имеет более высокую минерализацию и содержание микроэлементов, указывая на значительное поступление их из торфа и минеральных отложений, а также концентрацию элементов из атмосферных осадков. Глубокое протаивание и размыв отложений СТС и перешедшего в талое состояние верхнего горизонта ММП и подземных льдов в периоды с более теплыми и дождливыми летними сезонами, приводит к значительному повышению минерализации и содержания ионов в водах рек и ручьев, при этом это воздействие длится в течение нескольких лет, т.к. в сезонно-талое состояние переходят более глубокие слои многолетнемерзлых пород, насыщенные ионами, которые, в свою очередь переходят в подвижное состояние ^[8].

Выводы

1. Голоценовые повторно-жильные льды характеризуются ультрапресным и пресным составом, минерализация варьирует от 20 до 200 мг/л, в составе ионов преобладают гидрокарбонаты и кальций.
2. Повышенное содержание хлоридов в ПЖЛ на высоких элементах рельефа указывает на захват снегом морских аэрозолей, для ПЖЛ на пойме – на непосредственное участие в формировании льда жил речных вод в период нагонов с акватории Обской губы.
3. Повышенное содержание в некоторых фрагментах жил железа, сопоставимое с его содержанием в сегрегационных льдах в торфянике, возможно, указывает на периодическое участие в формировании льда жил болотных вод.
4. Сегрегационный лед, как правило, имеет более высокую минерализацию и содержание микроэлементов, указывая на значительное поступление их из торфа и минеральных отложений, а также концентрацию элементов из атмосферных осадков.

Благодарности

Авторы благодарны д.г.н. А.К.Васильчук за помощь в полевых исследованиях и обсуждение результатов.

Библиография

1. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций) Oxygen Isotope Composition of Ground Ice (application to paleogeocryological reconstructions). М., изд. МГУ, РАН. 1992. в 2-х томах. Т.1. 420 С. Т. 2. 216 с.
2. Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т. Криогидрохимические особенности повторно-жильных льдов Ямало-Гыданской провинции // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отд. геол., 1985, том 60, вып.3. С. 114–120.
3. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Возраст и условия формирования сингенетических повторно-жильных льдов в толще поймы р.Еркутаяха // Материалы Второй

- конференции геокриологов России. 6–8 июня 2001 г. Москва). Том. 3. Региональная и историческая геокриология. Изд-во Моск. ун-та. С. 29–35.
4. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Юнгнер Х., ван дер Плихт Й. Формирование сингенетических повторно-жильных льдов во время голоценового оптимума в условиях быстрого накопления торфа на Центральном Ямале // Криосфера Земли. 1999. Том 3. №1. С. 1–12.
 5. Fritz M., Wolter J., Rudaya N., Palagushkina O., Nazarova L., Obu J., Rethemeyer J., Lantuit H., Wetterich S. Holocene ice-wedge polygon development in northern Yukon permafrost peatlands (Canada) // Quaternary Science Reviews 147. 2016. P. 279–297.
 6. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Thick polygonal peatlands in continuous permafrost of West Siberia // Earth's Cryosphere (Kriosfera Zemli). 2016. N4. P. 3–13.
 7. Fontaine M. Ground ice content and geochemistry of active layer and permafrost in northwestern Arctic Canada / Thesis Submitted to the Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master of Science Degree in Geography. University of Ottawa Department of Geography. Ottawa, 2016. 87 p.
 8. Lamhonwah D, Lafrenière M. J., Lamoureux S. F., Wolfe B. B. Multi-year impacts of permafrost disturbance and thermal perturbation on High Arctic stream chemistry // Arctic Science. 2017. dx.doi.org/10.1139/as-2016-0024.
 9. Larry Lopez C.M., Brouckov A., Nakayama H., Takakai F., Fedorov A.N., Fukuda M. Epigenetic salt accumulation and water movement in the active layer of central Yakutia in eastern Siberia // Hydrol. Process. 2007. Vol. 21. P. 103–109.
 10. Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A., Krickov I.V., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. Dissolved organic carbon, major and trace element in peat pore water of sporadic, discontinuous and continuous permafrost zone of Western Siberia // Biogeosciences Discuss. 2017. doi:10.5194/bg-2017-24.
 11. Mazurek M., Paluszkiwicz R., Rachlewicz G., Zwoliński Z. Variability of Water Chemistry in Tundra Lakes, Petuniabukta Coast, Central Spitsbergen, Svalbard // The Scientific World Journal. 2012, Article ID 596516, 13 pages doi:10.1100/2012/596516.
 12. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., Kopysov S.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient // Biogeosciences, 2016. Vol. 13. P. 1877–1900.

References (transliterated)

1. Vasil'chuk Yu.K. Izotopno-kislorodnyi sostav podzemnykh l'dov (opyt paleogeokriologicheskikh rekonstruktsii) Oxygen Isotope Composition of Ground Ice (application to paleogeocryological reconstructions). M., izd. MGU, RAN. 1992. v 2-kh tomakh. T.1. 420 S. T. 2. 216 s.
2. Vasil'chuk Yu.K., Trofimov V.T. Kriogidrokhimicheskie osobennosti povtorno-zhil'nykh l'dov Yamalo-Gydanskoi provintsii // Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otd. geol., 1985, tom 60, vyp.3. S. 114–120.
3. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A. Vozrast i usloviya formirovaniya singeneticheskikh povtorno-zhil'nykh l'dov v tolshche poimy r.Erkutayakha // Materialy Vtoroi konferentsii geokriologov Rossii. 6–8 iyunya 2001 g. Moskva). Tom. 3. Regional'naya i istoricheskaya geokriologiya. Izd-vo Mosk. un-ta. S. 29–35.
4. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Yungner H., van der Plicht J. Formirovanie singeneticheskikh povtorno-zhil'nykh l'dov vo vremya golotsenovogo optimuma v usloviyakh bystrogo nakopleniya torfa na Tsentral'nom Yamale // Kriosfera Zemli. 1999. Tom 3. №1. S. 1–12.
5. Fritz M., Wolter J., Rudaya N., Palagushkina O., Nazarova L., Obu J., Rethemeyer J., Lantuit H., Wetterich S. Holocene ice-wedge polygon development in northern Yukon permafrost peatlands (Canada) // Quaternary Science Reviews 147. 2016. P. 279–297.

6. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Thick polygonal peatlands in continuous permafrost of West Siberia // *Earth's Cryosphere (Kriosfera Zemli)*. 2016. N4. P. 3–13.
7. Fontaine M. Ground ice content and geochemistry of active layer and permafrost in northwestern Arctic Canada / Thesis Submitted to the Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master of Science Degree in Geography. University of Ottawa Department of Geography. Ottawa, 2016. 87 p.
8. Lamhonwah D, Lafrenière M. J., Lamoureux S. F., Wolfe B. B. Multi-year impacts of permafrost disturbance and thermal perturbation on High Arctic stream chemistry // *Arctic Science*. 2017. [dx.doi.org/10.1139/as-2016-0024](https://doi.org/10.1139/as-2016-0024).
9. Larry Lopez C.M., Brouckov A., Nakayama H., Takakai F., Fedorov A.N., Fukuda M. Epigenetic salt accumulation and water movement in the active layer of central Yakutia in eastern Siberia // *Hydrol. Process*. 2007. Vol. 21. P. 103–109.
10. Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A., Krickov I.V., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. Dissolved organic carbon, major and trace element in peat pore water of sporadic, discontinuous and continuous permafrost zone of Western Siberia // *Biogeosciences Discuss*. 2017. [doi:10.5194/bg-2017-24](https://doi.org/10.5194/bg-2017-24).
11. Mazurek M., Paluszkiwicz R., Rachlewicz G., Zwoliński Z. Variability of Water Chemistry in Tundra Lakes, Petuniabukta Coast, Central Spitsbergen, Svalbard // *The Scientific World Journal*. 2012, Article ID 596516, 13 pages [doi:10.1100/2012/596516](https://doi.org/10.1100/2012/596516).
12. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., Kopysov S.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient // *Biogeosciences*, 2016. Vol. 13. P. 1877–1900.

Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К. Геохимический состав голоценовых повторно-жильных льдов Южного и Центрального Ямала // *Арктика и Антарктика*. — 2017. - № 1. - С.1-22. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.1.22485. URL: http://e-notabene.ru/arctic/article_22485.html