

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 551.491+551.345

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КРИОПЭГОВ В СЛОЕ ГОДОВЫХ ТЕПЛОБОРОТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЯКУТСКА

Н. П. Анисимова, Н. А. Павлова

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 1, Россия

Изучение условий и закономерностей формирования режима техногенных криопэгов в многолетне-мерзлых аллювиальных отложениях долины р. Лена (участок Туймаада), определение роли природных и техногенных факторов в их динамике — необходимая составная часть исследований при решении природоохранных и инженерных проблем.

При анализе материалов, полученных в процессе проведения комплексных режимных мерзлотно-гидрогеохимических исследований (1985—2001 гг.), установлена зависимость гидрогеологического режима и миграции линз криопэгов в вертикальном разрезе многолетнемерзлых аллювиальных песков от изменений гидрометеорологических факторов; определены главные процессы формирования трех ярусов линз криопэгов.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы в практике инженерных изысканий и проектирования в долине Туймаада.

Криопэги, засоленность, солевой состав, сезонноталый слой, миграция

PECULIARITIES OF THE CRYOPEGS' FORMATION WITHIN THE LAYER OF ANNUAL HEAT EXCHANGE AT THE TERRITORY OF YAKUTSK

N. P. Anisimova, N. A. Pavlova

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 677010, Yakutsk, Russia

Understanding of the development and conditions of anthropogenic cryopegs in perennially frozen alluvial deposits of the Lena valley (Tuymaada), and elucidation of the role of natural and anthropogenic factors of their dynamics are essential for solving environmental and engineering problems.

Analysis of the results of integrated permafrost and hydrogeochemical investigations in 1985—2001, showed that the hydrogeological regime and vertical migration of cryopeg lenses within perennially frozen alluvial sands are dependent on changes in hydrometeorological factors. The main processes responsible for the formation of three layers of cryopegs have been identified.

The results of the investigations will be useful for engineering surveys and design in the Tuymaada valley.

Cryopeg, salinity, salt composition, seasonally thawing layer, migration

ВВЕДЕНИЕ

В Центральной Якутии большая часть освоенных и планируемых к освоению площадей приурочена к долине р. Лена. Якутск со всеми пригородными промышленными и сельскохозяйственными комплексами находится на левобережной расширенной ее части — в долине р. Туймаада. Природные мерзлотно-гидрогеологические условия развитых здесь первой и второй надпойменных террас в значительной степени изменились под влиянием антропогенного воздействия. Слаборасчлененный увалистый рельеф с избытком стариц, ложбин стока, перемежающихся с невысокими валами, неблагоприятен для отвода ливневых, сточных и надмерзлотных вод. Кроме того, неполное протаивание промерз-

ших пород под дорогами, строениями и улицами создает техногенные мерзлотные преграды (барражи) на пути движения загрязненных поверхностных и надмерзлотных стоков. В результате в замкнутых низинах происходит обводнение почвогрунтов, повышается их засоленность, формируются маломощные надмерзлотные талики с высокой минерализацией воды.

Формирование в верхних слоях многолетнемерзлых пород высокоминерализованных отрицательно-температурных грунтовых вод (криопэгов) влияет на температурный режим и засоленность вмещающих пород [Анисимова, 1996а]. Это отражается на устойчивости инженерных сооружений.

При обосновании различного рода проектов строительства на площадях возможного формирования техногенных криопэггов, наряду с традиционным комплексом материалов инженерных изысканий, необходимы фактические данные для выполнения гидрогеохимических прогнозов. Получение их требует проведения специальных режимных мерзлотно-гидрогеохимических исследований.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Начиная с 1980 г. Институтом мерзлотведения СО РАН выполнен большой объем комплексных мерзлотно-гидрогеологических исследований по изучению закономерностей формирования и режима техногенных надмерзлотных криопэггов на первой и второй надпойменных террасах р. Лена. Для этого был выбран с учетом геоморфологических, мерзлотно-гидрогеологических особенностей и техногенной нагрузки ряд

экспериментальных полигонов, на каждом из которых была пробурена и оборудована сеть гидрогеологических и геотермических скважин для проведения режимных наблюдений с целью решения конкретных задач. Так, например, на полигонах „Хатассы“ и „Молочная ферма“ с 1988 по 1993 г. изучались особенности формирования и миграции криопэггов на площадях животноводческих комплексов, а на городских участках — влияние застройки, инфильтрации бытовых стоков и подземной прокладки трубопроводов [Анисимова, 1996б; Анисимова и др., 1989; Анисимова, Павлова, 2000].

Научную и практическую ценность имеет большой объем материалов многолетних мониторинговых мерзлотно-гидрогеохимических исследований, проводившихся с 1985 по 2001 г. на научно-экспериментальном полигоне „Криопэг“, находящемся на второй террасе р. Лена в окрестностях г. Якутск (рис. 1). Полигон площадью 0,04 км² представляет собой пологий

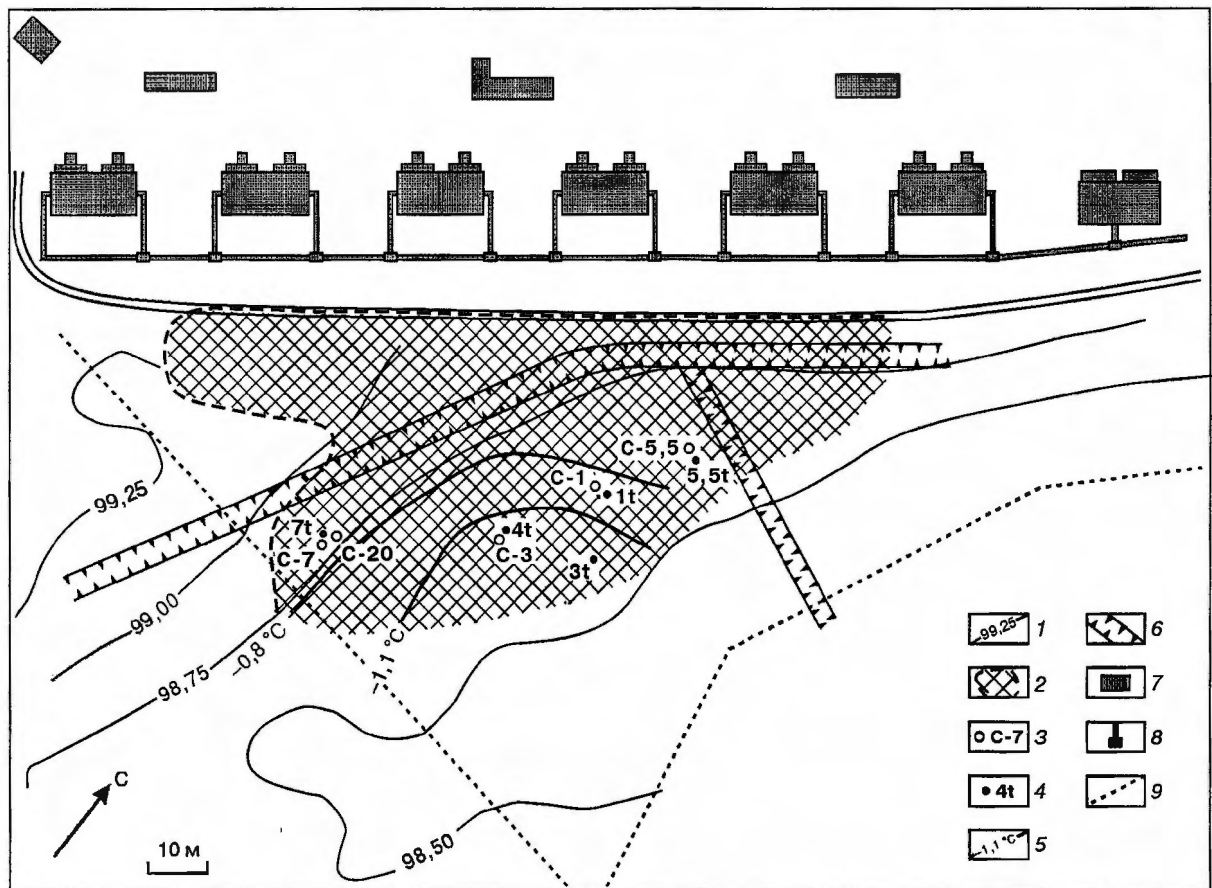


Рис. 1. План-схема полигона „Криопэг“.

1 — горизонталь, 2 — площадь распространения первого яруса криопэггов (май 1981 г.), 3 — режимная гидрогеологическая скважина и ее номер, 4 — режимная геотермическая скважина и ее номер, 5 — температура пород на глубине 3,5 м, 6 — траншея с трубопроводом, 7 — жилые дома и постройки, 8 — теплотрасса, 9 — заборы.

склон небольшого эрозионного понижения, днище которого в прошлом было залесено. Верхняя западная прибортовая часть участка занята деревянными строениями жилого комплекса. Многолетнемерзлые аллювиальные отложения мощностью 20—25 м представлены здесь разнозернистыми песками, перекрытыми до глубины 2 м суглинками и супесями. В результате инфильтрации загрязненных надмерзлотных вод и концентрирования растворенных веществ в основании сезонноталого слоя (глубина 1,8—2,0 м) на этом участке сформировались линзы криопэггов.

В задачу исследований входило изучение процессов формирования и динамики техногенных криопэггов, их влияния на температуру и засоленность вмещающих пород, а также проведение наблюдений за изменением их гидрогеологического режима.

Наблюдательная сеть состояла из спаренных (гидрогеологической и геотермической) скважин глубиной $6,5 \div 20,0$ м. Гидрогеологические скважины (скв. 1, 3, 7, 20 и 5,5) в интервале залегания водоносного горизонта оборудованы фильтровыми колоннами. В геотермических скважинах (скв. 1т, 3т, 4т, 5т) до глубины 6 м были стационарно установлены гирлянды с резисторными датчиками через каждые 0,5 м. Геотермические и гидрогеологические наблюдения

проводились в первый год ежедекадно, в дальнейшем 1 раз в месяц.

В апреле 1988 г. в рамках геофизических исследований в западной части полигона, в 5 м от проложенного в 1983 г. канализационного трубопровода, пересекающего поверхность стока, были дополнительно пробурены и оборудованы две скважины: скв. 7 — для проведения режимных наблюдений за криопэгами второго яруса (глубина 7—8 м), скв. 20 — третьего яруса (глубина 17—19 м).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среднегодовая температура пород на глубине затухания годовых колебаний температуры (18—20 м) в районе Якутска составляет -2 °С [Мельников, 1950; Павлов и др., 1984]. Появление техногенных криопэггов играет роль своеобразной завесы, препятствующей проникновению зимой низкой отрицательной температуры в подстилающие слои многолетнемерзлых песков; вследствие этого температура оказывается несколько выше, чем на участках без криопэггов. Более высокая отрицательная температура пород, подстилающих криопэги, наблюдается на всех исследованных участках. В центре полигона „Криопэг“ на глубине 5—6 м температура пород под линзой криопэггов составляет $-1,2 \div -1,3$ °С, в западной, более высокой части склона — $-0,7 \div -0,8$ °С.

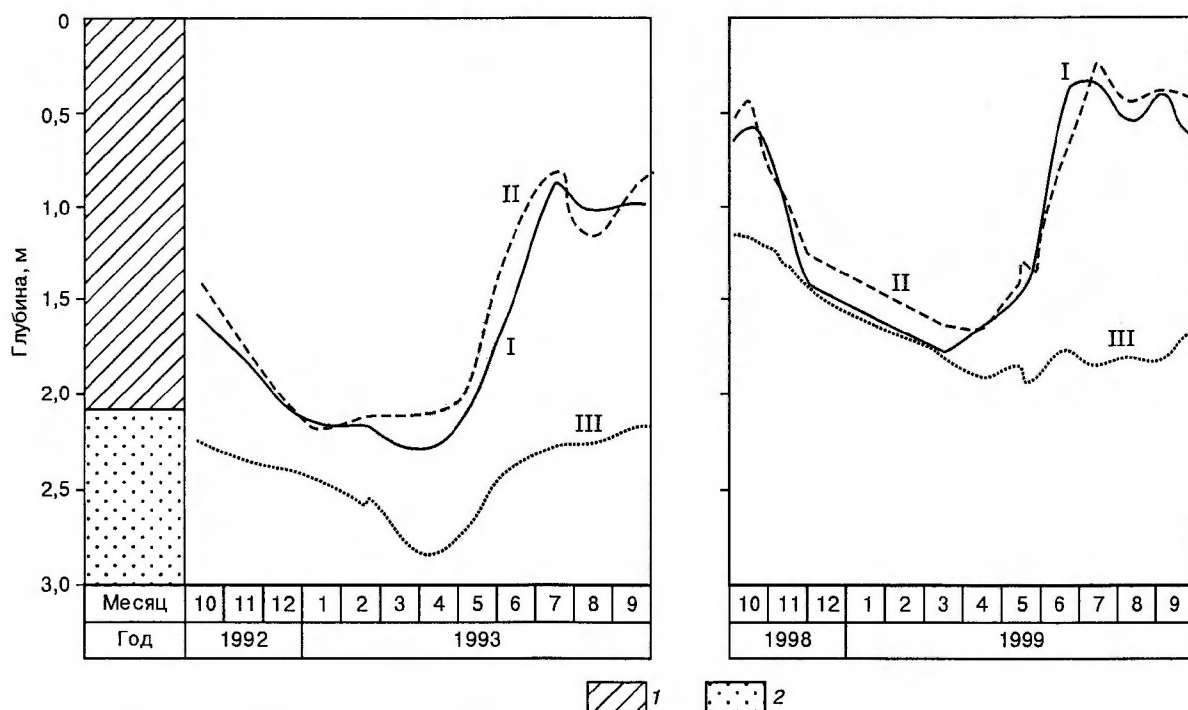


Рис. 2. Динамика уровня криопэггов различных ярусов.

1 — переслаивающиеся супеси и суглинки, 2 — пески; I, II, III — номера ярусов криопэггов.

Криопэги верхнего яруса (глубина 1,8—4,5 м) осенью залегают в песках наиболее близко от поверхности (1,8—2,0 м), их минерализация составляет 11—15 г/л. С началом промерзания перекрывающих их суглинков происходит небольшое понижение уровня и минерализации криопэгов вследствие миграции влаги из водонасыщенных пород к фронту промерзания (рис. 2). Выделение тепла при кристаллизации мигрирующей влаги несколько замедляет скорость промерзания перекрывающих суглинков, которое завершается в конце февраля—начале марта. Промерзание подстилающих водонасыщенных песков (криопэгов) начинается при температуре $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в условиях замкнутой системы сопровождается отжатием солей в нижележащие слои. При этом минерализация остающегося раствора повышается в основном за счет хлоридов, сульфатов, натрия и магния. Формирующийся при этом криогенный напор достигает максимальной величины (1,2—1,7 м) в мае—июне.

Залегание криопэгов верхнего яруса отмечается в конце теплых зим на глубине $2,5 \div 3,5$ м, холодных — $5 \div 6$ м, слой водонасыщенных пород при этом соответственно уменьшается. Иногда в очень холодные зимы происходит полное промерзание линзы криопэгов, при этом в образующихся льдистых породах отмечается наиболее высокая засоленность.

В процессе миграции криопэгов вниз по разрезу многолетнемерзлых пород происходит подплавление льда—цемента, сопровождающееся поглощением тепла и соответственно некоторым понижением их температуры. Хотя в мае начинается протаивание пород сверху, но вследствие продолжающегося дальнейшего продвижения фронта холода вниз по разрезу, глубина залегания криопэгов продолжает увеличиваться.

В процессе протаивания пород (с июня по сентябрь—октябрь) и снятия криогенного напора уровень воды постепенно понижается. Минера-

лизация криопэгов при этом несколько уменьшается за счет плавления льда. В августе—октябре отмечается небольшой рост уровня воды и снижение минерализации. В химическом составе криопэгов повышается содержание сульфатов магния, а иногда и натрия, поступающих с инфильтратом поверхностных вод. Эта динамика в разные годы имеет свою специфику и находится в зависимости от особенностей изменения гидрометеорологических факторов, засоленности пород, мощности и минерализации криопэгов.

Так, например, в 1986—1988 гг. с малоснежными и холодными зимами и небольшой суммой летних осадков сезонномерзлые породы, перекрывавшие линзы криопэгов, полностью не протаивали. Сохранение перелетка помещало к повышению температуры пород, что способствовало в последующую зиму более интенсивному их охлаждению по всему разрезу. В результате произошло криогенное оттеснение высокоминерализованного раствора глубже 6 м, увеличение минерализации криопэгов от 16 до 22 г/л и понижение температуры пород в интервале их залегания до $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Павлова, 2000].

Засоленность пород в интервале глубины $4 \div 5$ м в конце зимнего периода 1988 г., по сравнению с тем же периодом 1986 г., повысилась в 2—2,5 раза, а на глубине 5,5 м — в 5 раз при том же химическом составе. В осенний период 1988 г. надмерзлотные воды, сформировавшиеся при протаивании сезонномерзлых пород в интервале $2,0 \div 3,5$ м, имели минерализацию 6—9 г/л.

В последующие относительно теплые годы в интервале глубин $2,0 \div 4,5$ м вновь сформировалась линза криопэгов с более высокой минерализацией (17—18 г/л), чем в 1986—1988 гг. Это обусловлено не только поступлением поверхностных стоков, но и солей (в основном хлоридов натрия), оставшихся в породе при промерзании криопэгов в предыдущие более холодные

Таблица 1. Температура пород на площади развития техногенных криопэгов, $^{\circ}\text{C}$

Глубина, м	Дата замера							
	15.10.1985	15.05.1986	30.10.1992	20.05.1993	12.09.1995	16.04.1996	16.10.1998	07.05.1999
0,5	-0,9	3,9	—	—	3,1	-1,3	-6,4	—
1,0	0,0	3,2	-0,2	-2,1	6,1	-5,5	-2,3	-1,7
1,5	0,1	-3,1	—	-2,3	5,0	-4,4	-0,5	-2,8
2,0	0,0	-2,3	0,2	-1,6	3,0	-3,0	—	-2,0
2,5	-0,5	-2,0	-0,2	-1,0	0,8	-1,7	0,9	-0,5
3,0	-0,9	-1,5	—	—	-0,9	-0,9	0,4	—
3,5	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,1	-1,1	-0,3	-1,1
4,0	-1,0	-1,0	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,0
4,5	-1,0	-1,0	-1,2	-1,2	-1,1	-1,1	-1,1	-1,2
5,0	-1,0	-1,0	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-1,2	-1,3
5,5	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,1	-1,1	-1,2	-1,2
6,0	-1,0	-1,0	-1,2	-1,3	-1,2	-1,2	—	-1,3

Примечание. Прочерк — температура не определена.

годы. Температура грунтов, подстилающих верхний ярус криопэгов, в эти годы понизилась на 0,2—0,3 °С, по сравнению с предыдущим периодом (табл. 1). В солевом составе воды основную часть составляли хлориды натрия (53—66 % мг-экв/л) и сульфаты магния (20—31 % мг-экв/л).

С 1993—1994 гг. в растворе в осенние месяцы стали появляться и сульфаты натрия (до 10—13 % мг-экв/л). Уменьшение содержания хлоридов натрия и исчезновение хлоридов магния на фоне появления сульфатов натрия могут быть связаны с миграцией хлоридов в нижние горизонты.

В целом для верхнего яруса криопэгов с 1988 по 2001 г. характерно увеличение мощности обводненного слоя и понижение его минерализации в основном за счет уменьшения содержания хлор-иона, мигрирующего вниз по разрезу пород (рис. 3).

Второй ярус криопэгов (глубина 7—8 м) формируется в более холодные годы в процессе криогенного оттеснения раствора солей из верхнего яруса в подстилающие высокотемпературные (−1,2 ÷ 1,3 °С) мерзлые породы. Химичес-

кий состав и уровенный режим подземных вод этого яруса также испытывают сезонные и межгодовые изменения, связанные с процессами промерзания—оттаивания перекрывающих пород.

Криогенный рост напоров и повышение минерализации криопэгов второго яруса, так же как и верхнего, начинаются в марте и продолжают до мая—июля (см. рис. 2). В период максимального промерзания пород минерализация воды достигает 20—22 г/л, амплитуда изменения уровня воды составляет 1,2 ÷ 1,7 м.

Тенденция к росту уровня воды второго яруса криопэгов в многолетнем цикле позволяет предположить наличие гидравлической связи с верхним горизонтом. Появление сульфатов натрия, наблюдающееся с 1997 г. в осенние месяцы в солевом составе криопэгов этого яруса, также подтверждает предположение о наличии миграции солей в несколько отепленные породы из первого яруса, в котором происходит смешивание с инфильтрующимися менее минерализованными водами. Однако минерализация второго яруса криопэгов на протяжении всего срока наблюдений оставалась относительно стабильной.

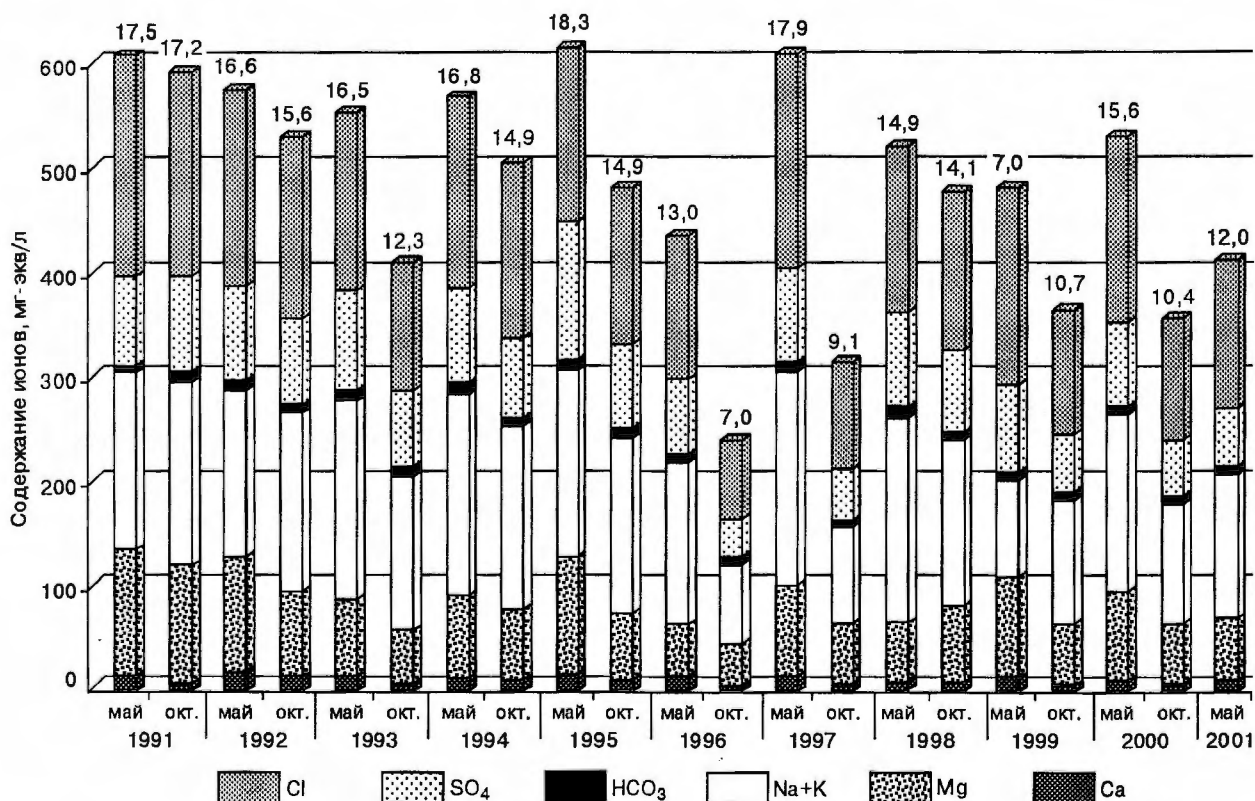


Рис. 3. Изменение химического состава первого яруса криопэгов в многолетнем цикле.

Цифры в поле рисунка — величина минерализации, г/л.

Таблица 2. Химический состав техногенных криопэггов на полигоне „Криопэг“ в период максимального промерзания пород (территория Института мерзлотоведения)

Дата отбора пробы	Форма выражения анализа	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(Na+K) ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	Минерализация, г/л
<i>Первый ярус (интервал 3,5—5,0 м)</i>								
20.05.1993	мг/л	277,3	901,1	4345,1	641,4	4597,4	6057,2	16,5
	мг-экв/л	13,838	74,103	188,917	10,515	95,719	170,624	
	% мг-экв	5,0	26,8	68,2	3,8	34,6	61,6	
07.06.1999	мг/л	354,7	950,9	4788,8	429,9	4208,6	7424,6	17,9
	мг-экв/л	17,700	78,200	208,211	7,046	87,625	209,440	
	% мг-экв	5,8	25,7	68,5	2,3	28,8	68,9	
<i>Второй ярус (интервал 7,3—8,3 м)</i>								
20.05.1993	мг/л	375,7	1400,5	5181,7	659,6	5632,1	8205,3	21,1
	мг-экв/л	18,749	115,171	225,29	10,813	117,261	231,136	
	% мг-экв	5,2	32,1	62,7	3,0	32,6	64,4	
07.06.1999	мг/л	292,6	1464,1	5055,4	506,4	5431,1	8220,1	20,8
	мг-экв/л	14,600	120,400	219,801	8,301	113,076	231,880	
	% мг-экв	4,1	33,9	62,0	2,3	31,9	65,4	
<i>Третий ярус (интервал 17—19 м)</i>								
20.05.1993	мг/л	572,5	1758,7	5951,3	417,5	6029,1	10635,2	25,2
	мг-экв/л	28,570	144,633	258,753	6,845	125,527	299,584	
	% мг-экв	6,6	33,5	59,9	1,6	29,1	69,3	

Третий ярус криопэггов (глубина 17—19 м) сформировался в нижних слоях толщи аллювиальных песков, которые на участках развития криопэггов имеют повышенную отрицательную температуру. Формирование нижнего яруса криопэггов происходит в процессе диффузии ионов хорошо растворимых солей в эти слои пород из промерзающих верхних горизонтов. Как установлено геофизическим оконтуриванием, линза криопэггов, вскрытая скв. 20 на глубине 17—19 м, в 1986 г. имела локальное развитие. Вода ее более минерализована, по сравнению с водой верхних ярусов (табл. 2). Максимальные значения (25—30 г/л) отмечаются в конце лета (август—октябрь). В эти же месяцы зафиксированы и наивысшие отметки уровня воды в скважине. Годовая амплитуда изменения уровня воды составляет 0,7 м. С ноября по февраль—март минерализация криопэггов снижается до 22—26 г/л, падает и их уровень. С марта по август—октябрь происходит рост и минерализации, и уровня воды. В ее солевом составе преобладают хлориды натрия (55—60 % мг-экв/л) и сульфаты магния (25 % мг-экв/л), содержание хлоридов магния колеблется здесь также в пределах 10 % мг-экв/л.

В криопэггах третьего яруса с 1991 по 1997 г. хотя и наблюдалось повышение уровня воды, но минерализация ее была относительно постоянной. С 1998 по 2000 г. прослеживается неболь-

шое понижение уровня криопэггов и рост минерализации в основном за счет хлоридов натрия. Это еще раз подтверждает вывод, что третий горизонт криопэггов сформировался за счет миграции ионов хорошо растворимых солей из верхних горизонтов в гидравлически замкнутой системе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В очень холодные зимы криогенное оттеснение высокоминерализованных вод верхнего яруса (1,8—4,5 м) вниз по разрезу приводит к засолению подстилающих многолетнемерзлых пород и переходу их в пластично-мерзлое или охлажденное состояние. В последующем на этом уровне (5—7 м) появляется линза второго яруса криопэггов. Формирование нижнего яруса (17—19 м) происходит в процессе диффузии активно мигрирующих ионов из верхних ярусов. В результате вся 20—25-метровая толща аллювиальных песков становится значительно засоленной и имеет высокую отрицательную температуру, т. е. многолетнемерзлые породы становятся охлажденными. Сезонные гидрогеологические изменения на глубине залегания первого и второго ярусов криопэггов отзываются, хотя и с небольшим сдвигом во времени и менее интенсивно, на динамике криопэггов нижнего яруса. Изменения уровня и химического состава воды во всех трех ярусах криопэггов в общем

идентичны, что свидетельствует об их гидравлической связи.

При проектировании строительства и эксплуатации сооружений в условиях, способствующих накоплению в сезоннопротаивающем слое загрязняющих веществ, необходимо учитывать возможность временных гидрогеохимических изменений и формирования высокой засоленности всей толщи рыхлых аллювиальных отложений.

Установленные особенности формирования и динамики техногенных криопэгов должны учитываться при инженерно-геокриологическом прогнозе и обосновании необходимости мониторинговой службы на эксплуатационный период инженерных сооружений.

Литература

- Анисимова Н.П. Влияние техногенных криопэгов на температуру и засоленность вмещающих многолетнемерзлых пород // Материалы I конф. геокриологов России. М., Изд-во МГУ, 1996а, кн. 1, с. 331—337.
- Анисимова Н.П. Техногенные гидрогеохимические изменения в долине Лены на участке Туймаада // Эколого-геохимические проблемы в районах криолитозоны. Якутск, 1996б, с. 35—44.
- Анисимова Н.П., Жигалова О.П., Кузнецов С.Н. Формирование криопэгов на участке антропогенного загрязнения // Мерзлотно-геологические исследования зоны свободного водообмена. М., Наука, 1989, с. 98—106.
- Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Изменение мерзлотно-гидрогеохимических условий техногенно-засоленных грунтов на участке подземной прокладки водовода в Центральной Якутии // Материалы междунар. конф. „Инженерно-геологические изыскания в криолитозоне (теория, методология, практика)“. СПб., 2000, с. 11—17.
- Мельников П.И. Вечная мерзлота в районе Якутска // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. М., Изд-во АН СССР, 1950, вып. 2, с. 53—70.
- Павлов А.В., Вотякова Н.И., Шипицина Л.И. Анализ многолетних изменений параметров теплового режима сезоннопротаивающих грунтов // Мерзлые грунты при инженерных воздействиях. Новосибирск, Наука, 1984, с. 46—52.
- Павлова Н.А. Изучение особенностей динамики техногенных криопэгов на освоенных площадях в Центральной Якутии // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия. Томск, 2000, с. 591—594.

Поступила в редакцию
27 июня 2001 г.