

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.345:624.131

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ, ВМЕЩАЮЩИХ НАДМЕРЗЛОТНЫЕ КРИОПЭГИ, НА ТЕРРИТОРИИ ЯКУТСКА

© 2016 г. М. В. Данзанова, Н. А. Павлова

*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск,
ул. Мерзлотная, 36, 677010 Россия.*

E-mail: pavlova@mpi.ysn.ru

Поступила в редакцию 04.09.2015 г.

После иправления 27.01.2016 г.

Рассматриваются примеры и недостатки методов борьбы с техногенными криопэгами в г. Якутске. Приводится анализ результатов опытно-фильтрационных работ, выполненных в разные сезоны года на типовых участках локального развития надмерзлотных криопэгов. На первом опытном полигоне в интервале глубин 2.0–4.5 м развиты надмерзлотные грунтовые воды с минерализацией от 8 до 15 г/дм³ и температурой минус 0.4–0.6°C. На втором полигоне, где обводненные породы вскрыты в интервале от 1.8 до 9.2 м, минерализация надмерзлотных вод составляет 1.8–3.4 г/дм³, а их температура – минус 0.1–0.4°C. Установлено, что в зимне-весенний период рост криогенного давления в таликах способствует увеличению коэффициента фильтрации грунтов, насыщенных солеными водами, в 1.5–2 раза. Для расчетов дренажных систем и получения кондиционных данных о фильтрационных свойствах дисперсных отложений, вмещающих криопэги, обоснована необходимость включения в программу инженерно-геологических изысканий опытных полевых работ. Показана принципиальная возможность применения вертикальных дренажей для осушения надмерзлотных таликов при строительном освоении участков со сложными инженерно-геологическими, геокриологическими и гидрогеологическими условиями.

Ключевые слова: *надмерзлотные криопэги, талики, мелиорация, кустовые откачки, фильтрационные параметры, дренаж.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на территории г. Якутска происходит интенсивное увеличение объемов строительства зданий и сооружений на участках сноса старых кварталов с деревянной застройкой. Особенность вновь осваиваемых площадок – высокая засоленность грунтов оснований и насыщенность их криопэгами (солончатые и соленые воды с отрицательной температурой). Такие высокоминерализованные надмерзлотные воды обладают коррозионной активностью по отношению к железобетонным и металлическим конструкциям и препятствуют смерзанию свай с окружающими породами. В последнее десятилетие в центральной части города участились случаи деформации многоэтажных зданий. Одна из главных причин нарушения их устойчивости – снижение несущей способности грунтов оснований из-за перехода их в пластично-мерзлое или охлажденное состояние и формирование техногенных криопэгов в условиях высокой зарегули-

рованности поверхностного и надмерзлотного стока различными барражами. Для повышения эксплуатационной надежности инженерных сооружений практически повсеместно требуется техническая мелиорация засоленных водонасыщенных грунтов.

На территории города линзы криопэгов вскрывают обычно до глубины 6–8 м. Минерализация воды в них изменяется от 2 до 20 г/дм³, а температура водовмещающих грунтов – от минус 0.2 до минус 2°C [3]. В условиях слабого водообмена на участках утепленных пород (под трубопроводами, в местах ввода коммуникаций в здания), криопэги способны мигрировать вниз по разрезу, вплоть до первого литологического водоупора, т.е. до глубины 18–20 м [2, 3]. На отдельных участках в сильнозасоленных грунтах содержатся линзы криопэгов с минерализацией 35–72 г/дм³, а в наиболее старой части г. Якутска – до 200 г/дм³ [1–4, 17]. Температура кристаллизации таких растворов составляет минус 2–8°C.

Основная цель данной работы – оценка гидро-геологических параметров рыхлых четвертичных отложений, вмещающих надмерзлотные соленые воды, для дальнейшей разработки научно-обоснованных методов улучшения строительных свойств грунтов оснований в г. Якутске. В процессе исследований необходимо было рассмотреть опыт технической мелиорации обводненных засоленных грунтов в городе, на типовых участках распространения криопэгов изучить геофильтрационные параметры водовмещающих грунтов, а также оценить возможность применения различных видов дренажей для осушения техногенных таликов при строительном освоении территории.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для борьбы с криопэгами на территории города пробовали применять разные методы и технологии. Например, на площади строительства домостроительного комбината грунты, содержащие линзы криопэгов, были заменены незасоленным песком. Данный способ оказался неэффективным, потому что одновременно не выполнялись мероприятия по регулированию надмерзлотного стока. Криопэги в насыпном грунте появились снова.

Для повышения несущей способности оснований аварийных зданий в г. Якутске проводились работы по укреплению водонасыщенных засоленных пород методом объемной силикатизации [12]. Этот метод не нашел широкого применения, поскольку при силикатизации грунта в толще образовывались замкнутые полости, из которых не удалялся высокоминерализованный поровый раствор, и, следовательно, несущая способность оснований оставалась низкой [18].

На одном из участков распространения криопэгов был проведен натурный эксперимент по замещению соленых вод пресными с последующим естественным замораживанием грунтов [1, 9]. Нагнетание пресной воды в водоносный слой, залегающий в интервале глубин 2–4 м, осуществлялось через скважины осенью в период максимального протаивания пород. Несмотря на то, что в течение всей последующей зимы с площадки убирался снег, промерзания мелких пылеватых и среднезернистых песков с криопэгами не произошло. Как показал дальнейший анализ гидродинамических и гидрохимических данных, полученных в процессе опыта, отрицательный результат связан с фильтрационной неоднородностью четвертичных отложений в плане и разрезе,

а также разницей в плотности закачиваемой пресной воды и вытесняемого раствора, приведших к сохранению «языка» соленых вод в подошве талика. Немаловажную роль, вероятно, сыграла и более высокая температура нагнетаемой воды по сравнению с температурой грунтов, вмещающих криопэги.

В последующем на этом же участке для изучения возможности искусственного промораживания талика в сентябре была прорыта траншея до глубины залегания надмерзлотных грунтовых вод и организованы режимные мерзлотно-гидро-геохимические наблюдения за температурой пород, их засоленностью и минерализацией криопэгов [11]. Траншея простояла открытой всю зиму. Было установлено, что на участках прокладки подобных линейных выработок понижение температуры водоносных пород за счет бокового охлаждения идет значительно быстрее, чем за счет естественного сверху. Промерзание пород под дном траншеи происходит уже в первой половине зимы и сопровождается миграцией ионов порового раствора как вниз по разрезу, так и в горизонтальном направлении. На удалении от траншеи охлаждающее ее влияние быстро ослабевает вследствие выделения тепла при фазовых переходах воды, а также повышения минерализации криопэгов, температура кристаллизации которых, соответственно, понижается. Вместе с тем под траншеей создаются условия для формирования слоя высокоминерализованных вод до глубины 7–9 м.

Анализ результатов проведенных экспериментов показывает, что сложность борьбы с криопэгами возникает из-за специфического мерзлотно-гидрогеологического строения аллювиальной толщи, в которой линзы отрицательно-температурных высокоминерализованных вод разделены прослоями засоленных твердомерзлых или пластичномерзлых пород. В настоящее время основной метод борьбы с криопэгами и закрепления грунтов оснований в Якутске – установка под зданиями «холодных» свай и охлаждающих термосифонов. Однако задачу промораживания водонасыщенных грунтов естественным или искусственным холодом значительно осложняет миграционная способность криопэгов, а при минерализации порового раствора выше 20 г/дм³ эти методы неэффективны.

Одним из перспективных методов борьбы с надмерзлотными криопэгами может быть принудительное водоотведение. К сожалению, отсутствие методик выполнения водопонизительных работ в сложных инженерно-геологических

условиях и малая изученность фильтрационных свойств пород зоны аэрации и водовмещающих рыхлых аллювиальных отложений сдерживает внедрение на территории Якутска дренажных систем, широко применяемых вне криолитозоны. Рассматриваются результаты режимных мерзлотно-гидрогеологических наблюдений и комплекса опытно-фильтрационных работ, выполненных на 2-х типовых участках распространения надмерзлотных криопэгов, позволившие оценить фильтрационные свойства обводненных засоленных грунтов.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ И МЕТОДИКА РАБОТ

Опытный полигон «Криопэг» площадью 2800 м² находится на периферии Якутска и окружен одноэтажными жилыми домами с приусадебными участками. Полигон представляет собой выположенный склон эрозионного понижения, в днище которого до начала 1970-х годов рос березовый лес. Мощность четвертичных аллювиальных отложений – 21 м. Они представлены разнотерными песками, перекрытыми до глубины 2 м пойменными суглинками и супесями. При застройке территории в результате инфильтрации в сезонноталый слой загрязненных бытовых стоков и концентрирования солей при промерзании пород в условиях затрудненного водообмена на подошве слоя сезонного протаивания (глубина 1.8–2.0 м) сформировались линзы криопэгов, а лес погиб.

Впервые на этом участке надмерзлотные воды с повышенной минерализацией (от 4.0 до 12.6 г/дм³) и температурой минус 0.6–1°C были вскрыты скважинами в пылеватых и мелкозернистых песках в 1981 г. Мощность обводненного слоя изменялась от 40 см до 1.5–2.2 м. Засоленность перекрывающих супесей и суглинков составляла 0.3–0.8%, а подстилающих многолетнемерзлых мелкозернистых песков – 0.3–0.5%. С 1985 г. были начаты режимные наблюдения за динамикой уровня и химического состава криопэгов. По данным многолетних исследований установлено, что минерализация надмерзлотных вод испытывает сезонные колебания [2]. Минимальные ее значения отмечаются в августе–октябре. В марте–июне в результате криогенного концентрирования солей минерализация криопэгов повышается до 14–18 г/дм³. Криогенный напор, формирующийся в талике при промерзании пород сверху, достигает максимальной величины в мае–начале июля и в зависимости от суровости

зимы изменяется от 1 до 2 м. В отдельные холодные годы водонасыщенный слой к концу зимы разделяется на отдельные линзы, минерализация воды в которых достигает 20–25 г/дм³ [3]. Расчетная температура начала замерзания таких растворов, обусловленная влиянием комплекса солей и вычисленная как сумма температур, вызванных влиянием содержания каждой соли [13], изменяется от минус 0.7 до минус 2.1°C.

Для изучения фильтрационных свойств грунтов и гидрогеологических расчетов дренажно-осушительных и водоотводных систем на подобных участках, было принято решение об устройстве на полигоне дренажного колодца и 5-ти наблюдательных скважин, ориентированных по двум лучам. По степени и характеру вскрытия водоносного слоя колодец является совершенным, глубина его заложения – 4.5 м, длина и ширина 1.1 м. При оборудовании водоприемной части колодца была применена щелевая перфорация, а вокруг – гравийная обсыпка, приведенный радиус рабочей части фильтра – 1.62 м. Наблюдательные скважины глубиной 6–10 м оборудованы сетчатым фильтром на всю мощность водоносного слоя. Опытные одиночные и кустовые откачки с дебитами 22, 29 и 72 м³/сут проводились по стандартной методике [7]. После откачек в горных выработках продолжались наблюдения за уровнем воды до полного его восстановления. Для расчета гидрогеологических параметров грунтов использовался графоаналитический метод (способы прямой линии и эталонной кривой) [10, 15].

Первая серия опытно-фильтрационных работ, включающая две кустовые откачки, была выполнена в конце июля 2010 г. В конце мая – начале июня 2011 г. проведена одна кустовая откачка. Для возможности ее исполнения предварительно были разбурены ледяные пробки в скважинах, а колодец очищен ото льда. Продолжительность опытов в зависимости от дебита изменялась от 6 до 48 час. Откачиваемая вода отводилась в канализационный коллектор по временному водоводу.

Для вычисления коэффициента фильтрации грунтов по эмпирическим зависимостям и изучения водно-физических свойств пород лабораторными методами одна из наблюдательных скважин пробурена с отбором керна. Определение гранулометрического состава и коэффициентов фильтрации грунтов выполнено согласно нормативно-методическим документам в лаборатории инженерной геологии Института мерзлотоведения СО РАН.

Опытный полигон «Спортивный комплекс» имеет площадь 6300 м². Он расположен вблизи озерной котловины на участке сноса отапливаемых гаражей с полами по грунту. Озерно-аллювиальные отложения в пределах вновь застраиваемой территории мощностью 23.5 м представлены сверху супесями и суглинками, пылеватыми, реже – мелкозернистыми песками, которые подстилаются с глубины 10 м среднезернистыми песками. Повсеместно четвертичные отложения перекрыты слоем насыпных грунтов мощностью 0.7–4.3 м. При инженерно-геологических изысканиях в 2007 г. скважинами глубиной 10–15 м был вскрыт водоносный талик с глубины 1.5–4.3 м [14]. Граница его в плане наследовала контур снесенных гаражей. Мощность обводненного слоя изменялась от 0.7 до 4.5 м, а на отдельных участках достигала 7.4 м. Засоленность супесчано-суглинистых отложений варьировала от 0.3 до 0.6%, песчаных – от 0.1 до 0.2%. Расчетная температура замерзания грунтов изменялась в пределах минус 0.5–0.8°C.

Для обеспечения устойчивости возводимого здесь инженерного сооружения и недопущения развития опасных геокриологических процессов было решено провести принудительное промораживание грунтов сезонно-охлаждающими установками. Чтобы сократить сроки формирования твердомерзлого состояния грунтов, было предложено предварительно осушить

талик. Основной научно-практической задачей исследований на этом участке было получение гидрогеологических параметров водовмещающих отложений для обоснования технических решений по устройству дренажа на подобных площадках.

Опытный куст скважин, состоящий из одной возмущающей и двух наблюдательных, был заложен на участке с максимальной мощностью водоносного талика (интервал глубин 1.8–9.2 м). В скважинах, совершенных по степени и характеру вскрытия водоносного пласта, установлены каркасно-стержневые фильтры диаметром 219 мм, а вокруг применена гравийная обсыпка.

Комплекс опытно-фильтрационных работ на полигоне также проводился дважды: в декабре 2009 г. – январе 2010 г., когда инфильтрационное питание надмерзлотных вод отсутствует, и в августе 2010 г., после протаивания сезонномерзлого слоя. Дебит откачек изменялся от 22 до 36 м³/сут. Сброс дренажных вод проводился в близрасположенное озеро, не имеющее гидравлической связи с техногенным таликом.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

На участке «Криопэг», по данным бурения 2009–2011 гг., надмерзлотные грунтовые воды залегают с глубины 2.0–3.5 м. Мощность обводненного слоя – 2.0–2.5 м. Максимальная температура

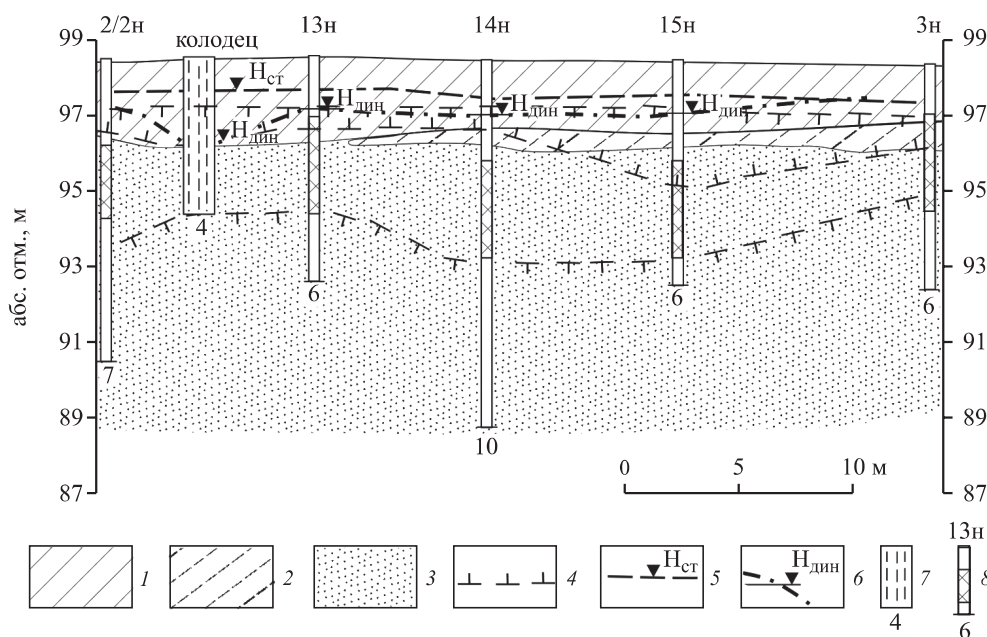


Рис. 1. Схема опытного куста гидрогеологических скважин на полигоне «Криопэг» (июль 2010 г.): 1 – суглинок; 2 – супесь; 3 – песок пылеватый и мелкозернистый; 4 – граница мерзлых грунтов, м; 5 – статический уровень надмерзлотных грунтовых вод; 6 – динамический уровень надмерзлотных грунтовых вод; 7 – дренажный колодец: цифра внизу – глубина, м, 8 – гидрогеологическая скважина: цифры сверху – номер, снизу – глубина, м.

Основные фильтрационные параметры грунтов, вмещающих криопэги, на опытных полигонах в г. Якутске

Даты проведения опыта	K_{ϕ} , м/сут.	μ	a , м ² /сут.	Водоприток, м ³ /сут.	Минерализация воды, г/дм ³
Полигон «Криопэг»					
28–30 июля 2010 г.	3.1–6.0	$(4–6) \cdot 10^{-3}$	$(0.2–2.2) \cdot 10^3$	25	12–15
1–2 июня 2011 г.	5.2	не опр.*	не опр.	33	16–17
Полигон «Спортивный комплекс»					
27 декабря 2009 г., 13–15 января 2010 г.	0.7–0.8	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^3$	34	2–3
25–26 августа 2010 г.	0.4	не опр.	не опр.	13	1.5–2

* Параметр не определен.

(0.6°C) водовмещающих отложений отмечается в октябре, минимальная (до минус 0.4–0.6°C) – в июне. Минерализация надмерзлотных грунтовых вод изменяется во времени и по площади в пределах 8–15 г/дм³. Подземные воды обладают напором, амплитуда колебания которого в течение года достигает 1.5 м. По предварительным расчетам естественные запасы воды в пласте, с учетом упругих и емкостных, составляли 800 м³.

В конце июля 2010 г. перед проведением кустовых откачек мощность протаявшего слоя пород была 1.5 м, а уровень подземных вод в скважинах залегал на глубине 0.9–1.1 м (рис. 1). Сохранение над таликом мерзлых грунтов позволило упростить гидрогеологические расчеты за счет исключения из них величины инфильтрационного питания водоносного слоя.

Повторные опытно-фильтрационные работы на полигоне были выполнены 1–2 июня следующего года. К этому времени грунты протаяли сверху до глубины 0.5 м, а криогенные напоры воды в талике были на 0.3–0.4 м выше относительно замеренных в июле 2010 г.

При интерпретации результатов откачек, проведенных с дебитами 22 и 29 м³/сут., рассчитывались коэффициенты фильтрации (K_{ϕ}) и пьезопроводности (a) пород, их упругая водоотдача (μ) (таблица). Небольшая анизотропия гидрогеологических характеристик грунтов по площади обусловлена неоднородным литологическим составом пойменных отложений и разной степенью их заторфованности. Приведенный радиус влияния водопонижительного колодца составил 45 м.

Откачки с дебитом 72 м³/сут. в существующих на полигоне мерзлотно-гидрогеологических условиях оказались неинформативными из-за весьма малой зоны гидродинамического возмущения. В процессе опытно-фильтрационных работ происходило быстрое (за 1.2 час) осушение колодца, тогда как в близрасположенной (в 4.5 м) от него наблюдательной скважине понижение уровня воды за это время составило лишь 0.1 м, что не позволило достоверно оценить гидрогеологические параметры. В целях водоосушения грунтов проводить откачки с таким дебитом также нецелесообразно из-за ее незначительного радиуса влияния и небольшого понижения уровня воды в пласте.

Аналогичные опытно-фильтрационные работы проводились на полигоне «Спортивный комплекс». На этом участке в декабре 2009 г. при бурении гидрогеологических скважин под сезонномерзлым слоем с глубины 1.8–4.2 м был вскрыт водоносный талик мощностью 7.5 м (рис. 2). Температура грунтов в обводненном интервале колебалась в пределах минус 0.1–0.4°C. Вода в талике имела минерализацию 1.8–3.4 г/дм³ и хлоридно-гидрокарбонатный смешанный по катионам химический состав. Статический ее уровень установился в скважинах на глубине 1.41–1.51 м от поверхности земли. Ориентировочный объем гравитационной воды в талике составил 2240 м³.

В зимний период 2009–2010 гг. опытно-фильтрационные работы проводились с дебитами 22 и 36 м³/сут. Влияние откачек в это время прослеживалось на расстоянии 56 м. После завершения опытных работ гидрогеологические скважины использовались в качестве водопонижительных.

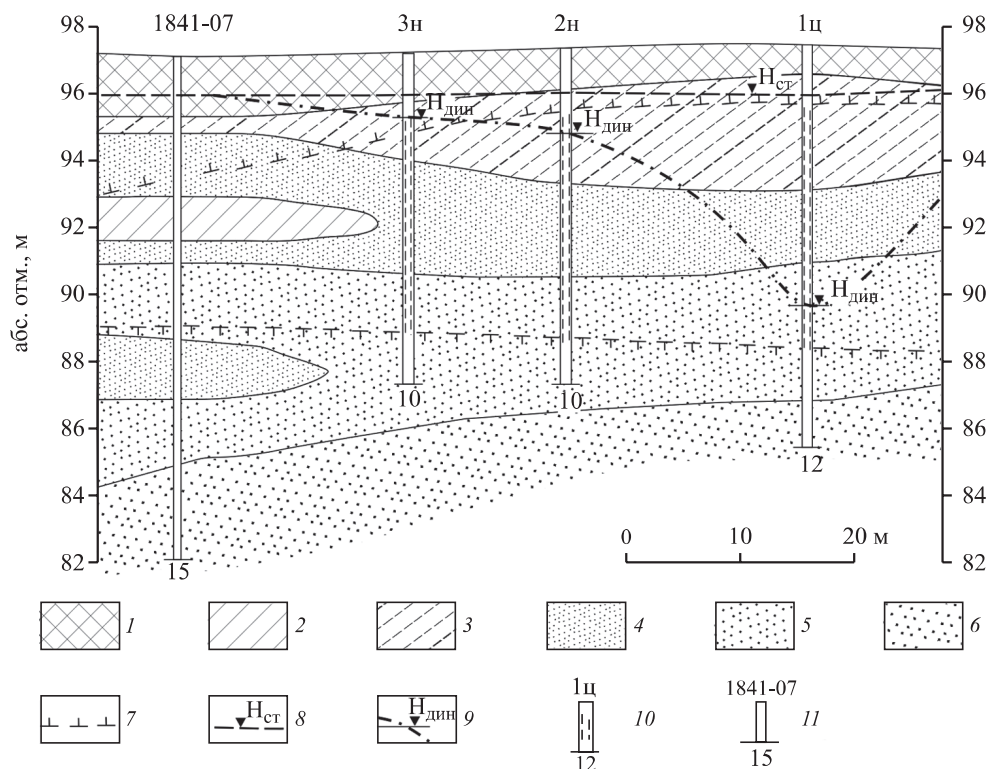


Рис. 2. Схема опытного куста гидрогеологических скважин на полигоне “Спортивный комплекс”: 1 – насыпной грунт; 2 – суглинок; 3 – супесь; 4 – песок пылеватый; 5 – мелкий, 6 – песок средней крупности; 7 – граница мерзлых грунтов (март 2007 г.), м; 8 – статический уровень надмерзлотных грунтовых вод (январь 2010 г.); 9 – динамический уровень надмерзлотных грунтовых вод (январь 2010 г.); 10 – гидрогеологическая скважина: цифры сверху – номер (ц – центральная, н – наблюдательная), внизу – глубина, м; 11 – инженерно-геологическая скважина.

Одновременно на полигоне устанавливали сезонно-охлаждающие устройства. В результате выполненного комплекса мероприятий к началу лета удалось понизить уровень воды на 1.0–1.5 м и, разобшив на отдельные линзы таликовую зону, частично ее проморозить.

Летом выполнялась одиночная откачка (с дебитом 22 м³/сут.), поскольку наблюдательные скважины при строительстве были ликвидированы. Сравнение результатов опытных работ, сделанных в разные сезоны, показало, что фильтрационные свойства грунтов в августе хуже, чем зимой (см. табл.), а расчетный радиус влияния откачки составил всего 20 м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как известно, величина коэффициента фильтрации грунтов определяется геометрией порового пространства, а также гидродинамическими свойствами фильтрующейся жидкости, зависящими от ее минерализации [5, 6]. Основные внешние факторы, влияющие на изменение во времени геометрии пор, и, соответственно, фильтрацион-

ные свойства грунтов, – давление и температура. На территории Якутска в надмерзлотных таликах наблюдается сезонное изменение геостатического давления, связанное с промерзанием–протаиванием супесчано-суглинистых грунтов, перекрывающих водоносные слои. При достижении фронта промерзания водонасыщенных пород, в замкнутых таликах появляется избыточное поровое давление, способствующее отжиманию воды по водоносному слою в ослабленную зону. Вероятно, поэтому в зимне-весенние периоды водопропускная способность песчаных грунтов и водопитоки в дренажные выработки выше, чем летом. Снижение скорости фильтрации надмерзлотных грунтовых вод в летний период может быть обусловлено уменьшением порового давления в талике за счет разуплотнения супесчано-суглинистых отложений, перекрывающих водоносный слой, при таянии текстурного льда. В дальнейшем после полного протаивания промерзших за зиму пород происходит капиллярное поднятие порового раствора из водонасыщенного слоя. Таким образом, есть основание считать, что в летний период своеобразная разгрузка таликовых вод путем вертикальной восходящей

фильтрации влаги из песчаных отложений в перекрывающие супеси и суглинки является одной из причин уменьшения скорости профильного движения надмерзлотных вод талика. Не следует также забывать, что при относительно небольшом снижении давления и увеличении температуры газы выходят из раствора и закупоривают поровое пространство, тем самым понижая водопротекную способность пород [8]. Поэтому выделение углекислого газа из протаивающих пород при повышении их температуры также может быть одним из факторов сезонной переменчивости величины коэффициента фильтрации грунтов.

Влияние минерализации и состава фильтрующей жидкости на фильтрационные свойства дисперсных отложений в опубликованной литературе рассматривается в основном для глинистых разностей. В работах исследователей отмечается, что с ростом минерализации фильтрующей жидкости проницаемость глин увеличивается. Объясняется это сложными процессами физико-химического взаимодействия, происходящими на границе вода–порода [6, 19, 20].

Результаты опытно-фильтрационных работ, выполненных на экспериментальных полигонах, обнаруживают для мелких пылеватых песков аналогичную особенность: коэффициент фильтрации грунтов выше на участке распространения более минерализованных надмерзлотных вод. Ранее в лаборатории подземных вод Института мерзлотоведения СО РАН П. К. Коносовский провел опыты по определению зависимости коэффициента фильтрации пород от концентрации раствора. При испытаниях использовались образцы грунта, отобранные из интервала залегания криопэггов, в качестве фильтрующей жидкости – дистиллированная вода, природный и искусственно приготовленный высокоминерализованный растворы. Было установлено, что значение коэффициента фильтрации пород при применении природного раствора в 2 раза, а модельного – почти в 4 раза выше, чем при использовании дистиллированной воды. По данным наших лабораторных испытаний, с использованием водопроводной воды, коэффициент фильтрации мелких и пылеватых песков, отобранных на полигоне «Криопэг», изменяется от 0.3 до 2.5. Эта величина занижена в 2.5–5 раз относительно определенной в полевых условиях (см. табл.).

А. В. Степанов [17], проводивший в лаборатории изучение фильтрационных свойств суглинков, слагающих на территории Якутска слой сезонного протаивания, также отмечал, что фильтрация модельных соленых растворов через грунт

идет быстрее, чем дистиллированной воды, причем с увеличением концентрации раствора коэффициент фильтрации возрастает.

Природа различия фильтрационных свойств суглинков, а также мелких песков с высоким содержанием пылеватой фракции связана, вероятно, с увеличением эффективной пористости грунта за счет сокращения диэлектрического слоя, окружающего поверхность минерального скелета, по мере роста концентрации порового раствора.

Необходимо отметить, что все перечисленные лабораторные опыты были проведены при положительной температуре, тогда как в естественных условиях в толще охлажденных пород с криопэгами присутствует лед. Для изучения влияния количества ледяных включений на проницаемость грунтов, насыщенных солеными водами, требуется постановка дальнейших специальных исследований при отрицательных температурах.

Коэффициенты фильтрации пород, залегающих в интервале таликов, были вычислены также и по известным эмпирическим формулам по результатам гранулометрического анализа [16]. Как известно, применение данных зависимостей возможно только для однородных чистых, хорошо промытых песков. Поэтому рассчитанные значения этого параметра были завышены по сравнению с опытными в 1.5–10 раз.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В целом полученные результаты натурных экспериментов показали, что фильтрационные свойства грунтов, вмещающих высокоминерализованные воды, в зимний и весенний периоды выше, чем летом. Это связано с высокой криогенной водоотдачей пород талика при его сезонном промерзании. В летний период уменьшение порового давления в талике за счет разуплотнения супесчано-суглинистых отложений при таянии шлиров сегрегационного льда и капиллярное поднятие порового раствора из водонасыщенного слоя способствуют снижению скорости фильтрации надмерзлотных грунтовых вод.

При лабораторных испытаниях для изучения фильтрационных свойств грунтов рекомендуется использовать реально существующий природный раствор, поскольку применение дистиллированной воды или модельных растворов существенно искажает действительные величины коэффициента фильтрации пород. Применение известных эмпирических формул для расчета коэффициентов фильтрации грунтов, распространенных

в Якутске, не оправдано из-за неоднородного литологического строения пойменных отложений. Поэтому в программу инженерно-геологических изысканий для получения кондиционных данных о водно-физических свойствах водовмещающих грунтов обязательно должны быть включены опытные полевые работы.

Экспериментальными работами показана принципиальная возможность применения откачек на локальных участках развития водоносных таликов для осушения грунтов. На участках неглубоких таликов рационально устанавливать дренажные колодцы, откачки из которых можно проводить как в летний период, после протаивания сезонномерзлых пород, перекрывающих водоносный талик, так и в конце зимы, когда отмечаются максимальные криогенные напоры надмерзлотных грунтовых вод. Рекомендуемые дебиты откачек 25–35 м³/сут. Учитывая переменность фильтрационных свойств грунтов в течение года, для эффективного осушения пород в летне-осенний период потребуется большее количество дренажных скважин.

На участках развития глубоких надмерзлотных замкнутых таликов, сложенных пылеватыми и мелкозернистыми песками, возможно применение вертикального дренажа скважинного типа. Для продуктивного осушения грунтов рекомендуется проводить откачки с дебитами до 30–40 м³/сут. Во избежание негативных последствий, к которым может привести промерзание дисперсных отложений, перед использованием сезонно-охлаждающих установок необходимо предварительно максимально осушать талики. В противном случае при понижении температуры неравномерно обводненных грунтов могут произойти разделение водоносного слоя на отдельные линзы и увеличение концентрации солей в них. Дальнейшее охлаждение и промерзание водонасыщенных пород в замкнутом объеме повлечет объемные деформации грунта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-45-05050).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С. В. К вопросу о борьбе с антропогенными криопэгами // Региональные и инженерные геокриологические исследования / Ред. И. В. Климовский, И. Е. Гурьянов. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. С. 127–132.
2. Анисимова Н. П., Павлова Н. А. Особенности формирования криопэгов в слое годовых теплооборотов на территории Якутска // Криосфера Земли. 2002. Т. 4. С. 63–69.
3. Анисимова Н. П., Павлова Н. А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое Изд-во «Гео», 2014. 189 с.
4. Анисимова Н. П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
5. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды / Пер. с англ. В. В. Данилова, А. А. Шарбатяна / Под ред. В. Н. Кунина. М.: Мир, 1971. 452 с.
6. Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 160 с.
7. ГОСТ 23278-78. Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости. М.: Государственный строительный комитет СССР, 1978. 44 с.
8. Жибуртович К. К., Михневич Э. И. Водопроницаемость песчаных грунтов в условиях полного водонасыщения и при содержании в них воздуха // Строительная наука и техника. 2011. № 1. С. 95–97.
9. Коносовский П. К. Тепло- и массоперенос при замещении криопэгов пресными водами // Методика гидрогеологических исследований криолитозоны / Под ред. В. В. Шепелева. Новосибирск: Наука, 1983. С. 73–82.
10. Мироненко В. А., Шестаков В. М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.
11. Павлова Н. А. Экспериментальные исследования изменений мерзлотно-гидрогеохимических условий засоленных грунтов под воздействием естественного источника холода // Сергеевские чтения. Инженерно-экологические изыскания в строительстве: теоретические основы, методика, методы и практика. Вып. 8. М.: ГЕОС, 2006. С. 143–146.
12. Попенко Ф. Е. Инженерная защита зданий и сооружений в условиях Севера // Наука и техника в Якутии. 2003. № 1(4). С. 88–93.
13. Роман Л. Т., Артюшина В. И., Иванова Л. Г. Зависимость прочности мерзлых засоленных грунтов от температуры начала замерзания грунтовой влаги // Геоэкология. 1994. № 1. С. 49–55.
14. Семерня А. А., Ефремов В. С., Данзанова М. В. О влиянии сезонных охлаждающих установок на изменение мерзлотно-гидрогеологических условий на участках строительства крупных зданий в г. Якутске // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Матер. Всерос. научн.-практ. конф. Якутск: ИПК СВФУ, 2013. Т. 2. С. 146–151.
15. Синдаловский Л. Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во СПбУ, 2006. 769 с.

16. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В. М. Максимова. Л.: Недра, 1979. Т. 1. 512 с.
17. Степанов А. В. Теплообменные свойства техногенных грунтов криолитозоны. Новосибирск: Наука, 2011. 152 с.
18. Шашикова К. С. Криопэги: формирование и способы борьбы // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения. Матер. Междунар. конф. Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. Т. 1. С. 313–314.
19. Farouki, Omar T. Thermal properties of soil / by Omar T. Farouki. Hanover, New Hampshire. U.S.A. Cold Regions Research and Engineering Laboratory; Springfield, Va.; available from National Technical Information Service, 1981. 125 p.
20. Moutier M., Shainberg I., Levy G. J. Hydraulic gradient, aging, and water quality effects on hydraulic conductivity of a vertisol // Soil Science Society of America JI. 1998. V. 62. № 6. P. 1488–1496.
8. Zhiburtovich, K.K., Mikhnevich, E. I. *Vodopronistae-most' peschanikh gruntov v usloviyakh polnogo vodonasishcheniya i pri sodержanii v nikh vozdukh* [Permeability of saturated and air-containing sand soil]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*, 2001, no. 1, pp. 95–97 (in Russian).
9. Konosavskii, P. K. *Teplo- i massoperenos pri zameshchennii kriopegov presnymi vodami* [Heat and mass transfer during replacement of cryopegs with fresh water]. *Sbornik statei «Metodika gidrogeologicheskikh issledovaniy kriolitozony»* [Proc. "Methodology for hydrogeological studies in permafrost"], 1983, pp. 73–82 (in Russian).
10. Mironenko, V.A., Shestakov, V. M. *Teoriya i metody interpretatsii opytно-filtratsionnykh rabot* [Theory and interpretation methods of pumping tests]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 325 p. (in Russian).
11. Pavlova, N. A. *Eksperimental'nye issledovaniya izmenenii merzlotno-gidrogeokhimicheskikh uslovii zasolennykh gruntov pod vozdeistviem estestvennogo istochnika kholoda* [Experimental studies of changes in permafrost-hydrogeological conditions of saline soils under the influence of a natural cold source]. *Sergeevskie chteniya. Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya v stroitel'stve: teoreticheskie osnovy, metodika, metody i praktika. Vypusk 8.* [Sergeevskie chteniya. Engineering and environmental investigations for construction purposes: theoretical foundations, methods, techniques and practices, vol. 8]. Moscow, 2006, pp. 143–146 (in Russian).

REFERENCES

1. Andreev, S.V. *K voprosu o bor'be s antropogennymi kriopegami* [The control of anthropogenic cryopegs]. *Sbornik statei Instituta merzlotovedeniya SO AN SSSR «Regionalnye i inzhenernye geokriologicheskie issledovaniya»* [Proc. of Permafrost Institute SB AS USSR "Regional and engineering geocryological studies"], 1985, pp. 127–132 (in Russian).
2. Anisimova, N.P., Pavlova, N. A. *Osobennosti formirovaniya kriopegov v sloe godovykh teplooborotov na territorii Yakutska* [Peculiarities of the cryopeg formation within the layer of annual heat exchange in the territory of Yakutsk]. *Kriosfera Zemli*, 2002, no. 4, pp. 63–69 (in Russian).
3. Anisimova, N. P., Pavlova, N. A. *Gidrogeohimicheskie issledovaniya kriolitozony Tsentral'noi Yakutii* [Hydrogeochemical studies of permafrost in Central Yakutia], Novosibirsk, Academic Publishing House Geo Limited, 2014, 189 p. (in Russian).
4. Anisimova, N. P. *Kriogidrogeohimicheskie osobennosti merzloi zony* [Cryohydrogeochemical features of the permafrost zone], Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 153 p. (in Russian).
5. Bear J., Zaslavsky D., Irmay S. *Fiziko-matematicheskie osnovy fil'tratsii vody* [Physical principles of water percolation and seepage], Moscow, Mir Publ., 1971. 452 p. (in Russian).
6. Gol'dberg, V.M., Skvortsov, N. P. *Pronitsaemost' i fil'tratsiya v glinakh* [Permeability and filtration in clay], Moscow, Nedra, 1986, 160 p. (in Russian).
7. GOST 23278-78. *Grunty. Metody polevykh ispytaniy pronistaemosti* [State Standard 23278-78. Soils. Fields methods of permeability tests]. Moscow, Standartinform Publ., 1978, 44 p. (in Russian).
12. Popenko, F. E. *Inzhenernaya zashchita zdaniy i sooruzhenii v usloviyakh Severa* [Engineering protection of infrastructure in the North] *Nauka i tekhnika v Yakutii*, 2003, no. 1(4), pp. 88–93 (in Russian).
13. Roman, L.T., Artyushina, V.I., Ivanova, L. G. *Zavisimost' prochnosti merzlykh gruntov ot temperatury nachala zamerzaniya gruntovoi vlagi* [Relationship of frozen salinized rock strength to initial freezing point of ground moisture] *Geoekologiya*, 1994. no. 1, pp. 49–55 (in Russian).
14. Semernya, A.A., Efremov, V.S., Danzanova, M.V. [Effect of refrigeration systems on permafrost and hydrogeological conditions at large project sites in Yakutsk]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii "Geologiya i mineral'no-syrievye resursy Severo-Vostoka Rossii"* [Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia. The scientific-practical conference materials. Vol. 2]. Yakutsk, 2013, pp. 146–151 (in Russian).
15. Sindalovskii, L. N. *Spravochnik analiticheskikh reshenii dlya interpretatsii opytно-filtratsionnykh oprobovanii* [Reference of analytical solutions for interpretation of pumping tests]. St. Petersburg: Saint Petersburg State University Publ., 2006, 769 p. (in Russian).
16. Maksimov, V.M. and et. *Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa. Kn. 1.* [Reference manual for hydro-

- geologists, Vol. 1], Leningrad, Nedra Publ., 1979, 512 p. (in Russian).
17. Stepanov, A. V. *Teploobmennye svoistva tekhnogen-nykh gruntov kriolitozony* [Heat exchange properties of anthropogenic soils in permafrost regions], Novosibirsk, Nedra Publ., 2011, 152 p. (in Russian).
 18. Shashkova, K.S. [Cryopegs: formation and the way of its liquidation]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii "Teoriya i praktika otsenki sostoyaniya kriosfery Zemli i prognoz ee izmeneniya. Kn.1"* [Earth cryosphere assessment: theory, applications and forecast of alteration. Proceedings of International conference. Vol 1]. Tyumen, 2006, pp. 313–314 (in Russian).
 19. Farouki, Omar T. Thermal properties of soil. Hanover, New Hampshire. U.S.A. Cold Regions Research and Engineering Laboratory; Springfield, Va.; available from National Technical Information Service, 1981, 125 p.
 20. Moutier, M., Shainberg, I., Levy, G. J. Hydraulic gradient, aging, and water quality effects on hydraulic conductivity of a vertisol. *Soil Science Society of America Journal*. 1998, vol. 62, no. 6, pp. 1488–1496.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE HYDRAULIC PROPERTIES OF SOILS CONTAINING SUPRAPERMAFROST CRYOPEGS IN YAKUTSK

M. V. Danzanova, N. A. Pavlova

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Division, Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya ul. 36, Yakutsk, 677010 Russia. E-mail: pavlova@mpi.ysn.ru

The city of Yakutsk is experiencing a rapid growth of redevelopment in the demolished wooden-house districts. Nearly all the redevelopment sites require improvement of saline soils which often contain cryopegs, i.e., brackish to saline water with subzero temperatures. Air convection piles and thermosyphons are common methods presently in use for cryopeg control and soil stabilization. However, freezing of the water-saturated soils either by passive or active techniques is significantly complicated by the mobility of cryopegs. At dissolved-solids contents of the pore water above 20 g/l, these techniques become ineffective.

Forced dewatering is one of the methods that appears promising in controlling suprapermafrost cryopegs. Application of drainage systems should be preceded by hydrogeological analyses using reliable data on hydraulic properties of enclosing soils. The purpose of this study is to estimate the hydraulic properties of the Quaternary deposits enclosing suprapermafrost saline water in order to improve the scientifically sound techniques for improving the engineering behavior of foundation soils in Yakutsk.

This article discusses the results of pumping tests performed at two representative cryopeg sites in Yakutsk. One site contains suprapermafrost groundwater at the depth interval of 2.0–4.5 m with dissolved-solids concentration of 8 to 15 g/dm³. At the other site, a water-bearing talik was found to occur in the interval of 1.8 to 9.2 m, with water having 1.8–3.4 g/dm³ dissolved solids. Single well and multiple well tests were conducted at discharge rates of 22 to 72 m³/day twice a year, in winter or autumn and in summer, following the standard procedure. The test data were used to calculate the hydraulic conductivity and hydraulic diffusivity of the soils, as well as the water flow into wells.

The study has shown that hydraulic conductivity of the soils containing saline water is higher in winter and autumn than in summer. This is due to the higher cryogenic yield of the talik soils during seasonal freezing. The existing empirical equations for hydraulic conductivity estimation are not applicable to the Yakutsk soils due to the lithological variation of the floodplain deposits. Existing natural solutions are recommended for use in laboratory testing, since the use of distilled water gives underestimated values for hydraulic conductivity. A geotechnical site investigation program should include field tests to characterize the hydraulic properties of saline soils.

The field experiments allowed us to evaluate the use of various drain types and to recommend yields for dewatering anthropogenic taliks at construction sites.

Keywords: *suprapermafrost cryopegs, taliks, improvement of saline soils, multiple well tests, hydraulic conductivity, forced dewatering.*