

УДК 581.48:624.139:536.58

КРИОХРАНИЛИЩЕ СЕМЯН РАСТЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ**Кузьмин Г.П., Куваев В.А.***ФГБНУ «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова» СО РАН, Якутск,
e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru*

Сохранения генетического фонда растений в настоящее время достигают путем хранения семян в хранилищах с определенными температурными и влажностными условиями. Для длительного хранения семян растений по данным Института биологических проблем криолитозоны СО РАН оптимальными являются температуры минус 6–10 °С. В криолитозоне такие температуры характерны только на побережье и островах Северного Ледовитого океана. Поэтому при строительстве подземных криохранилищ семян на большей части территории криолитозоны требуется дополнительное круглогодичное охлаждение окружающих их мерзлых грунтов. Относительно низкие отрицательные температуры в хранилищах для длительного сохранения семян создают в основном с помощью холодильных установок, которые потребляют большое количество электрической энергии, требуют постоянного обслуживания и ремонта. В г. Якутске в толще многолетнемерзлых грунтов построено криохранилище семян растений на 100 тыс. образцов семян. Криохранилище состоит из рабочих помещений, в котором на стеллажах в герметично закупоренных сосудах хранятся образцы семян, двух вертикальных стволов, соединяющих рабочие помещения с поверхностью земли и воздушной охлаждающей системы. В криохранилище авторами испытан разработанный ими способ круглогодичного охлаждения подземных сооружений, построенных в толще многолетнемерзлых грунтов. Воздушная охлаждающая система состоит из установки зимнего и установки летнего охлаждения сооружения. Для поддержания в летнее время необходимой температуры в рабочих помещениях верхняя поверхность мерзлых грунтов кровли сооружения охлаждается зимним холодным воздухом, а рабочие помещения располагают на определенной глубине, зависящей от скорости распространения температурных волн в мерзлых грунтах, режима работы охлаждающих установок и заданной температуры в криохранилище. Во время испытания криохранилища в течение 5,5 лет температура воздуха в рабочих помещениях колебалась в соответствии с изменениями температуры наружного воздуха с определенным сдвигом фаз. Однако пределы изменения температуры воздуха в рабочих помещениях практически укладывались в рекомендованный диапазон температур хранения семян.

Ключевые слова: криохранилище семян, мерзлый грунт, температура, охлаждающая установка, температурные колебания

SEED VAULT IN PERMAFROST**Kuzmin G.P., Kuvaev V.A.***Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru*

The preservation of the genetic Fund of plants is currently solved by storing seeds in storage facilities with certain temperature and humidity conditions. For long-term storage of plant seeds according to the Institute of biological problems permafrost SB RAS are optimal temperature minus 6-10 °C. In the permafrost such temperatures are typical only on the coast and Islands of the Arctic ocean. Therefore, during the construction of underground cryopreservation of seeds in most of the permafrost requires additional year-round cooling of the surrounding frozen soils. Relatively low negative temperatures in the storages for long-term preservation of seeds are created mainly by means of refrigeration units, which consume a large amount of electric energy, require constant maintenance and repair. In Yakutsk, in the thickness of permafrost, a Seed of plant seeds for 100 thousand samples of seeds was built. The Seed consists of working rooms in which samples of seeds, two vertical trunks connecting working rooms with a surface of the earth and air cooling system are stored on racks in hermetically sealed vessels. The authors tested the method of year-round cooling of underground structures built in the thickness of permafrost in the cryogenic storage facility. Air cooling system consists of the installation of winter and summer cooling of buildings. In order to maintain the necessary temperature in the summer in the working rooms, the upper surface of the frozen soils of the roof of the building is cooled by winter cold air, and the working rooms are located at a certain depth, depending on the speed of the temperature waves in the frozen soils, the operating mode of the cooling units and the specified temperature in the cryopreservation. During the testing of the Seed for 5.5 years, the air temperature in the working rooms fluctuated in accordance with changes in the outdoor air temperature with a certain phase shift. However, the limits of the air temperature change in the working rooms were practically within the recommended temperature range of seed storage.

Keywords: Seed Vault, frozen ground, temperature, cooling unit, temperature fluctuations

В связи с опасностью потери части генетического фонда растений в результате природных катастроф и техногенных разрушений среды произрастания растений во многих странах создают хранилища семян растений с определенным температурным и влажностным режимом. Продолжитель-

ность сохранения семян зависит от температуры и влажности их [1]. В существующих в мире хранилищах необходимые для длительного хранения семян относительно низкие отрицательные температуры создаются с помощью холодильных установок или с дополнительным использованием

естественного холода наружного воздуха и многолетнемерзлых грунтов. Недостатками хранилищ, оборудованных холодильными охлаждающими установками, являются значительные затраты на производство холода и зависимость функционирования хранилищ от надежной работы этих установок.

В подземном пространстве криолитозоны возводят сооружения различного назначения [2, 3]. Свойства мерзлых грунтов как физико-химической системы подробно изложены в монографии [4]. Климатические условия и мерзлое состояние грунтов криолитозоны в наибольшей степени удовлетворяют эксплуатационным требованиям криохранилищ семян растений.

Цель исследования: разработка системы управления температурным режимом подземных сооружений в криолитозоне.

Криохранилище в г. Якутске создано переоборудованием подземной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН, построенной в 1940 г. в толще мерзлых грунтов. Особенностью криохранилища является система его охлаждения.

Температура мерзлых грунтов на глубине расположения рабочих помещений криохранилища после многолетней эксплуатации подземной лаборатории понизилась и составляла минус 2,4 °С. В процессе переоборудования подземной лаборатории в криохранилище в результате свободного попадания холодного воздуха в открытые выработки температура окружающих грунтов еще больше понизилась. Однако это локальное охлаждение грунтов было временным. Для поддержания температуры в рабочих помещениях криохранилища в интервале минус 6–10 °С, рекомендованном Институтом биологических проблем криолитозоны СО РАН, необходимо было разработать эффективную и надежную систему круглогодичного охлаждения. За основу разрабатываемой системы была принята известная широко применяемая охлаждающая установка конвективного действия, в которой движение холодного воздуха происходит под действием естественной тяги. Вопросами охлаждения массива грунтов сезоннодействующими охлаждающими установками занимались многие исследователи [5–7]. Впервые в мире температурный режим в созданном в г. Якутске криохранилище поддерживается использованием только естественных источников холода – наружного воздуха и многолетнемерзлых грунтов.

Низкая влажность семян при длительном хранении достигается предваритель-

ным высушиванием и хранением их в герметичных емкостях.

Устройство криохранилища. Криохранилище расположено в толще многолетнемерзлых грунтов и состоит (рис. 1) из рабочих помещений для размещения на стеллажах образцов семян в герметичных упаковках, двух вертикальных стволов для спуска-подъема людей 1 и груза 3 и двух охлаждающих установок. Рабочие помещения, состоящие из одного основного 2 и трех боковых 4 помещений, представляют собой горизонтальные выработки прямоугольного поперечного сечения высотой 2,2 м и шириной 2,2–2,4 м. Общая площадь рабочих помещений составляет 80 м². Кровля и боковые стороны рабочих помещений закреплены деревянным брусом из лиственницы со сторонами 20х20 см, а подошва залита слоем бетона толщиной 20 см. Лиственничное крепление горных выработок в массиве многолетнемерзлых грунтов длительное время сохраняет свои механические свойства. Так, в известной шахте Шергина в г. Якутске за 175 лет и подземной лаборатории ИМЗ СО РАН за 72 года крепления из лиственницы остались практически без изменения. Кроме того, деревянное крепление обладает относительно высоким термическим сопротивлением, необходимым для таких сооружений как подземные криохранилища. Вертикальные стволы закреплены металлическими уголками и швеллерами и обшиты стальным листом. Оба ствола оборудованы лестницами. Грузовой ствол оснащен лебедкой. За обшивкой стволов проложены каналы для нисходящего и восходящего потоков воздуха охлаждающих установок и кабели осветительной сети.

Охлаждающая система. В настоящее время разработаны различные замораживающие и охлаждающие системы принудительного и конвективного действия.

Охлаждающая система криохранилища в г. Якутске (рис. 2) состоит из двух воздушных установок конвективного действия ОУ-1 и ОУ-2. Установка ОУ-1, предназначенная для зимнего охлаждения рабочих помещений и аккумуляции холода в окружающих многолетнемерзлых грунтах, состоит из вертикальных каналов для нисходящего 1 и восходящего 2 потоков воздуха, расположенных в вертикальных стволах 5, двух охлаждающих каналов 3, проложенных за боковой крепью основного рабочего помещения 6 и коллекторов 4, соединяющих вертикальные каналы для нисходящего и восходящего потоков воздуха с охлаждающими каналами. Верхние концы вертикальных каналов рас-

положены на разных уровнях – нисходящего потока воздуха несколько выше максимальной высоты снежного покрова, восходящего потока на высоте 5 м от поверхности земли. Кроме того, надземная часть канала для восходящего потока воздуха покрыта слоем теплоизоляции. Такое расположение верхних концов вертикальных каналов и теплоизоляции надземной части канала для восходящего потока воздуха создают естественную тягу высокого напора [8].

Охлаждающая установка ОУ-2 для летнего охлаждения рабочих помещений криохранилища состоит также из вертикальных каналов для нисходящего и восходящего потоков воздуха 1' и 2', коллекторов 4' и охлаждающих каналов 3', представляющих собой систему из 11 труб диаметром 219 мм, расположенных параллельно друг другу на расстоянии 1,5 м в основании слоя сезонного оттаивания. Охлаждение ими наиболее нагретой за лето верхней части массива многолетнемерзлых грунтов кровли сооружения обеспечивает интенсивный теплообмен между потоком холодного воздуха в охлаждающих каналах и окружающими грунтами. При этом рабочие помещения криохранилища должны быть расположены на глубине, которой первая температурная волна от охлаждающих каналов ОУ-2 достигает через определенное время. Продолжительность этого времени зависит от длительности работы охлаждающей установки, теплофизических свойств грунтов кровли сооружения и принятой верхней границы температуры в рабочих помещениях криохранилища.

В слое годовых теплооборотов температурные колебания согласно второму закону Фурье происходят со сдвигом фаз, пропорциональным глубине и определяемым зависимостью [9]

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{CT}{\pi\lambda}} z, \quad (1)$$

где C – среднее значение объемной теплоемкости грунтов кровли рабочих помещений криохранилища; T – период колебаний температуры (8760 ч); λ – среднее значение коэффициента теплопроводности грунтов кровли рабочих помещений; z – разность глубин расположения середины высоты рабочих помещений и заглубленных в основание слоя сезонного оттаивания охлаждающих каналов ОУ-2.

На рис. 3 приведена типичная кривая температуры наружного воздуха в климатических условиях области распространения многолетнемерзлых грунтов на примере г. Якутска [10]. На графике показаны периоды работы воздушных охлаждающих установок τ_1 , промежуток времени $\Delta\tau$ от момента прекращения работы охлаждающих установок до момента повышения температуры грунтов на уровне расположения рабочих камер до значения максимальной допустимой температуры в них и продолжительность охлаждения рабочих помещений в теплое время года τ_2 . Величина сдвига фаз температурных колебаний в грунтах кровли рабочих помещений криохранилища должна быть равна

$$\delta = \tau_1 + \Delta\tau. \quad (2)$$

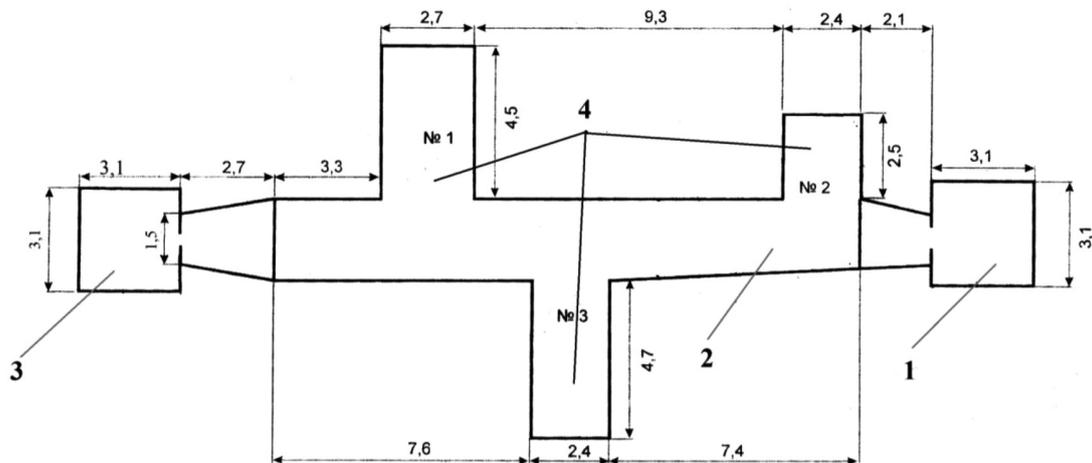


Рис. 1. Рабочие помещения криохранилища: 1 – вертикальный ствол, 2 – основное рабочее помещение, 3 – вертикальный грузовой ствол, 4 – боковые рабочие помещения

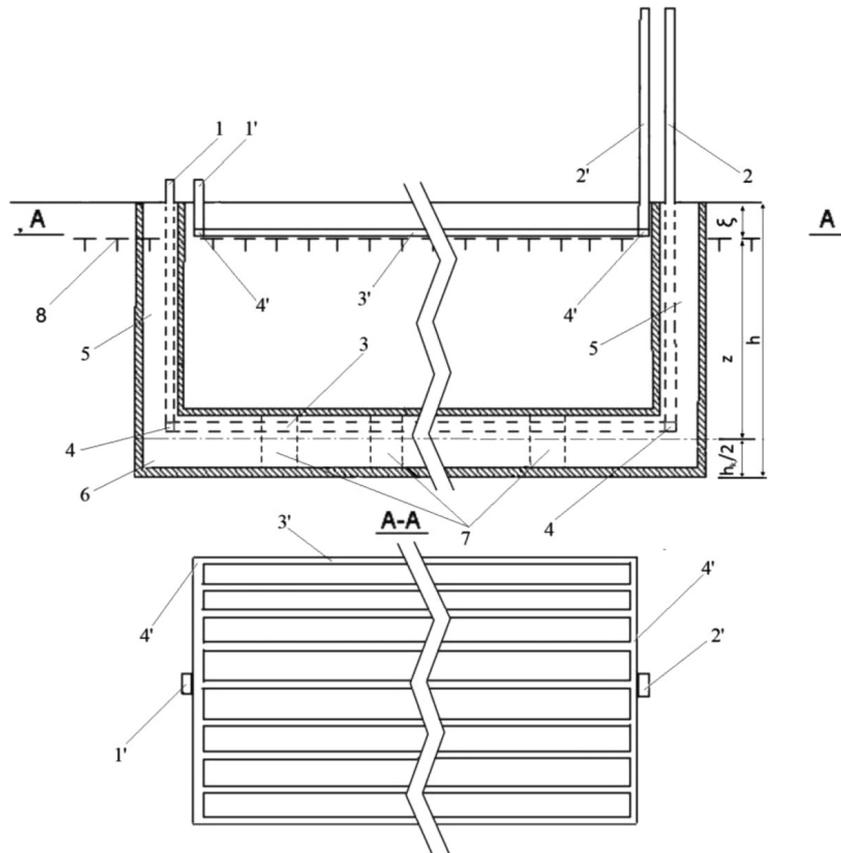


Рис. 2. Схема воздушных охлаждающих установок криохранилища: 1 – каналы для нисходящего потока воздуха; 2 – каналы для восходящего потока воздуха; 3 – охлаждающие каналы; 4 – коллекторы; 5 – вертикальные стволы; 6 – основное рабочее помещение; 7 – боковые рабочие помещения; 8 – граница сезонного оттаивания; цифры без штрихов относятся к ОУ-1, со штрихами к ОУ-2

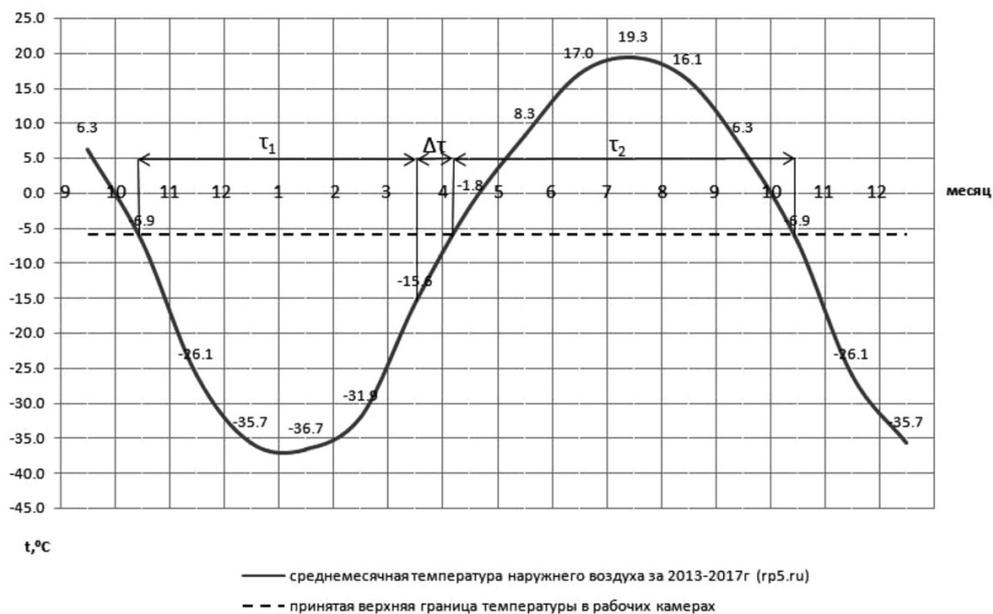


Рис. 3. Кривая среднемесячных температур наружного воздуха в г. Якутске

Из равенств (1) и (2) находим выражение оптимальной глубины заложения рабочих помещений

$$z = 2(\tau_1 + \Delta z) \sqrt{\frac{\pi \lambda}{CT}} \quad (3)$$

Начальная температурная волна от охлаждающих каналов ОУ-2 должна пройти расстояние z за промежуток времени δ . Если величина δ больше или равна продолжительности периода τ_2 , то холодные температурные волны будут поступать к рабочим помещениям в течение всего этого времени.

Для определения оптимального значения z в условиях г. Якутска исходим из следующих данных. Циркуляция холодного воздуха в охлаждающих установках конвективного действия происходит, как установлено предварительными экспериментами, примерно с середины октября до середины марта, т.е. продолжительность охлаждения ОУ-2 мерзлых грунтов кровли рабочих помещений составляет $\tau_1 = 3624$ ч. Температура грунтов у середины высоты рабочего помещения близка к температуре наружного воздуха. Первая температурная волна от охлаждающих каналов ОУ-2 должна достигнуть уровня середины высоты рабочего помещения, когда температура наружного воздуха повысится до принятой величины максимальной температуры воздуха в рабочих помещениях, равной около минус 6°C . В условиях г. Якутска при расчетных параметрах: $\tau_1 = 3624$ ч; $\Delta\tau = 540$ ч; $T = 8760$ ч; $C = 2016$ кДж/м³°C и $\lambda = 2,3$ Вт/°C оптимальное значение разности глубин расположения рабочих помещений и охлаждающих каналов ОУ-2, рассчитанное по формуле (3), составило $z = 10,1$ м. Фактическое значение этой разности при глубинах расположения подошвы рабочих помещений $h = 11,0$ и охлаждающих каналов ОУ-2 $\xi = 1,5$ м и высоте рабочих помещений вчерне $h_k = 2,5$ м составляет $z = h - \xi - \frac{h_k}{2} = 11,0 - 1,5 - \frac{2,5}{2} = 8,2$ м, т.е. меньше расчетного значения на $1,9$ м. Поэтому охлаждение окружающих рабочие помещения мерзлых грунтов начинается несколько раньше повышения температуры мерзлых грунтов у стенки рабочих камер до минус 6°C .

При испытании криохранилища в течение 5,5 лет охлаждающие установки функционировали без нарушения нормального режима.

Результаты исследования и их обсуждение

Температура мерзлых грунтов на глубине расположения рабочих помещений

после длительной эксплуатации подземной лаборатории понизилась до минус $2,4^\circ\text{C}$. В период реконструкции подземной лаборатории в криохранилище грунты вокруг подземных выработок были сильно охлаждены (рис. 4), о чем свидетельствуют кривые температур, замеренных в марте 2013 г. в кровле (рис. 4, а), подошве (рис. 4, б) и боковой стене (рис. 4, в) основного рабочего помещения. В последующие годы в результате исключения свободного попадания холодного воздуха в выработки температура грунтов вокруг них повысилась и стабилизировалась.

Непосредственно у стенки рабочего помещения температура грунтов стала равной минус $5,5-6,0^\circ\text{C}$.

В летнее время 2013 г. в результате аварийного разлива воды из летнего водопровода теплая вода по грузовому стволу попала в рабочие помещения криохранилища. В низких местах подошвы рабочих помещений толщина слоя воды достигала 10 см. Эти внешние воздействия оказали влияние на тепловое состояние окружающих грунтов. Как видно из приведенных на рис. 4 кривых температуры, замеренных в марте месяце, наибольшее повышение температуры грунтов произошло в подошве рабочих помещений (рис. 4, б), несколько меньшее в боковой стене (рис. 4, в) и почти не произошло повышения температуры грунтов кровли (рис. 4, а).

Из графиков температуры грунтов вокруг рабочего помещения криохранилища на рис. 4 видна также эффективность работы охлаждающих установок. Установившиеся температуры грунтов у стенок рабочего помещения криохранилища (минус $5,5-6,0^\circ\text{C}$) значительно ниже установившейся температуры грунтов у стенок подземной лаборатории (минус $2,4^\circ\text{C}$).

На рис. 5 показана кривая температуры воздуха в основном рабочем помещении за время эксплуатации криохранилища. Среднее ее значение составляет около минус 8°C , которое на $5,6^\circ\text{C}$ ниже установившейся температуры грунта на стенке подземной лаборатории до переоборудования ее в криохранилище. На короткие периоды времени температура воздуха поднималась в основном до минус $4,5^\circ\text{C}$ и опускалась до минус 17°C . Такие пики температурных кривых могут быть предотвращены устройством теплоизоляции вокруг емкостей с семенами.

Как видно из приведенного графика, установился квазистационарный температурный режим криохранилища, практически удовлетворяющий предварительно рекомендованному режиму.

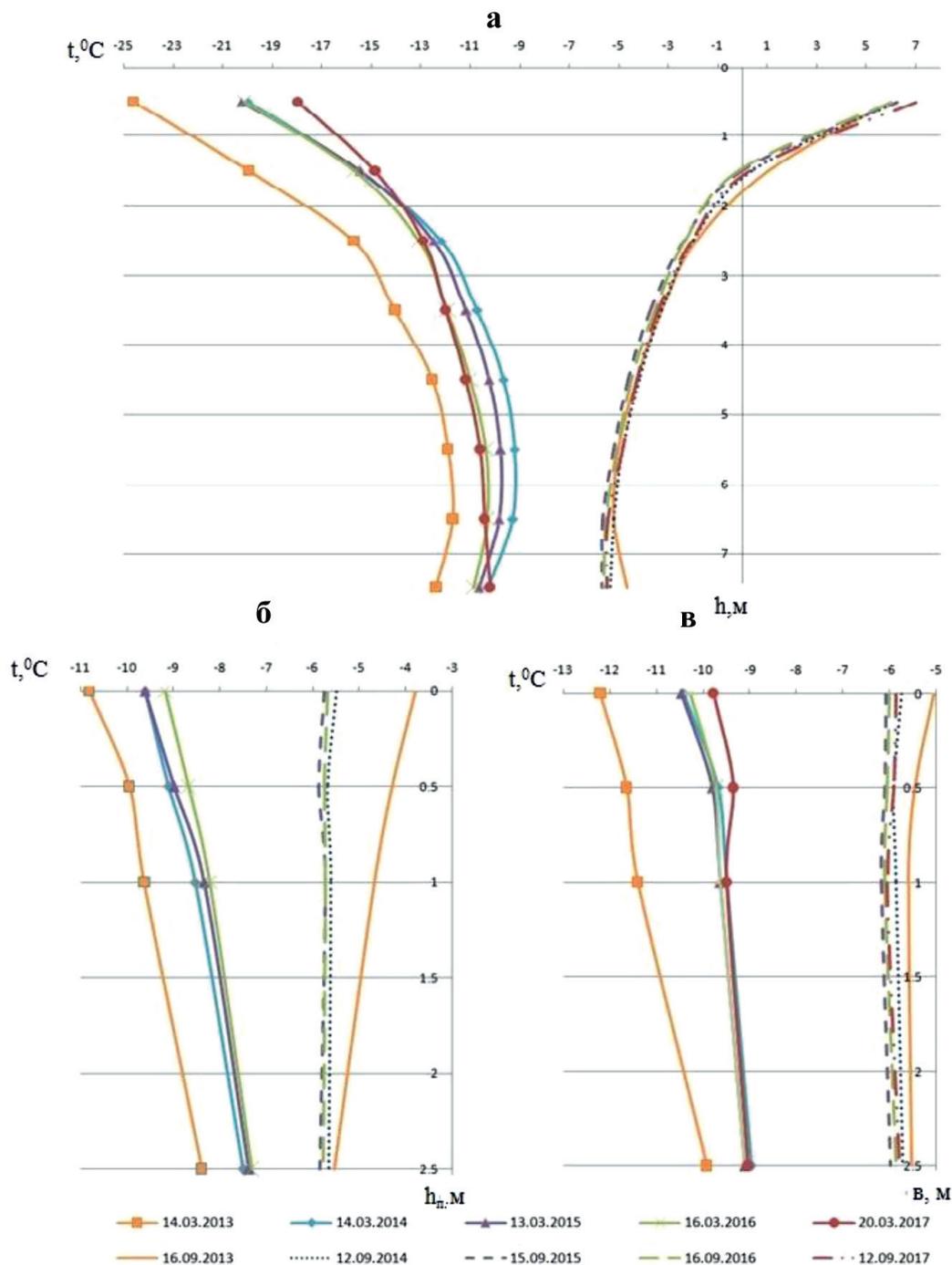


Рис. 4. Температура грунтов вокруг основного рабочего помещения:
 а – в кровле; б – в подошве; в – в стенке

Закключение

Построено и испытано криохранилище семян растений, температурный режим которого поддерживается, впервые в мире, за счет естественных ресурсов холода и без применения нагнетательных механизмов.

Предложен способ определения оптимальной глубины заложения криохранилища, основанный на закономерности сдвига фаз температурных колебаний в мерзлых грунтах. Обоснованы способ и устройство для охлаждения криохранилища в теплое время года с помощью аккумулированного холода

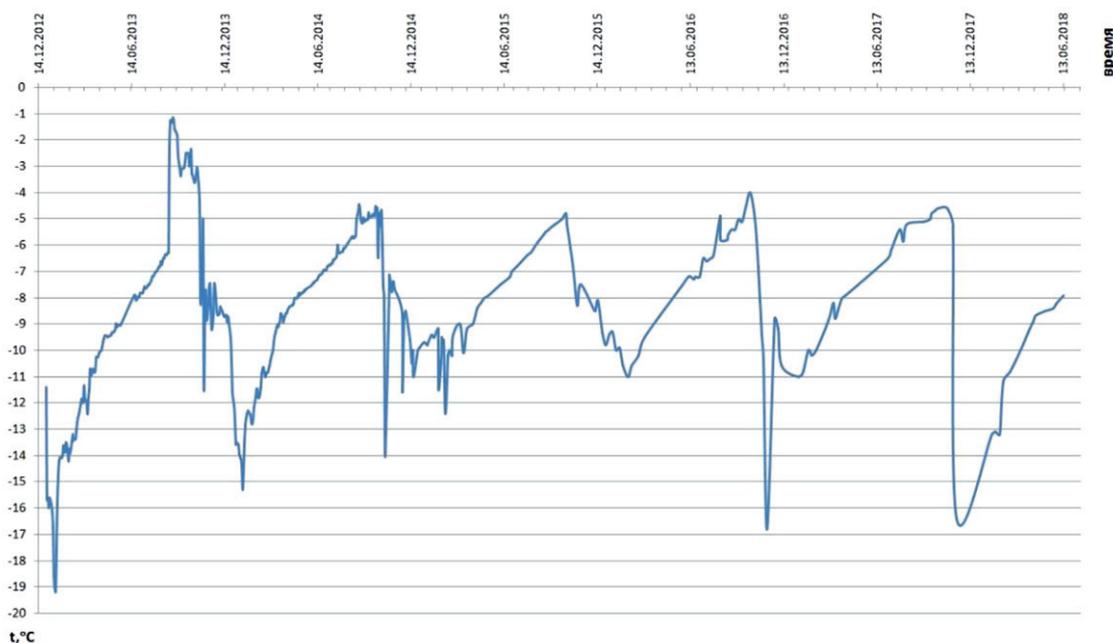


Рис. 5. Температура воздуха в рабочих помещениях криохранилища за период эксплуатации

в зимнее время в грунтах кровли сооружения. Длительные испытания подземного криохранилища, расположенного в толще многолетнемерзлых грунтов, показали:

- возможность использования в криолитозоне разработанного способа круглогодичного охлаждения подземных сооружений;
- эффективность и надежность конструктивного выполнения воздушных охлаждающих установок конвективного действия;
- возможность увеличения мощности охлаждающих установок.

Список литературы/ References

1. Кершенгольц Б.М., Жимулев И.Ф., Гончаров Н.П., Чжан Р.В., Филиппова Г.В., Шейн А.А., Прокопьев И.А. Сохранение генофонда растений в условиях многолетней мерзлоты: состояние, преимущества, перспективы // Вавилонский журнал генетики и селекции. 2012. Т. 16. № 3. С. 675–682.
- Kershengolts B.M., Zhimulev I.F., Goncharov N.P., Zhang R.V., Filippova G.V., Shein A.A., Prokopiev I.A. Preservation of the gene pool of plants under permafrost conditions: State, advantages, and prospects // Russian Journal of Genetics: Applied Research January. 2012. V. 16. № 3. P. 675–682 (in Russian).
2. Кузьмин Г.П. Подземное пространство криолитозоны (проблемы и перспективы использования) // Наука и техника в Якутии. 2008. № 1 (14). С. 15–19.
- Kuzmin G.P. Underground space of cryolithozone (problems and prospects of use) // Nauka i tehnika v Yakutii. 2008. № 1 (14). P. 15–19 (in Russian).
3. Великин С.А., Малышев А.В., Неклюдов В.В., Паничев А.А. К вопросу о системе управления мерзлотной обстановкой на инженерных объектах: материалы IX Международного симпозиума «Проблемы инженерного мерзлотоведения». Мирный, 2011. С. 191–197.
- Velikin S.A., Malishev A.V., Neklyudov V.V., Panichev A.A. On the issue of the permafrost environment management system at engineering facilities: materials IX International Workshop on Problems of Geocryologies Engineering. Mirmii, 2011. P. 191–197 (in Russian).
4. Шестернев Д.М. Физика, химия и механика мерзлых грунтов. Чита: Изд-во Поиск, 2012. 331 с.
- Shesternev D.M. Physics, chemistry and mechanics of frozen soils. Chita: Izdat Poisk, 2012. 331 p. (in Russian).
5. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стрижков С.Н. Строительство объектов в криолитозоне с использованием систем термостабилизации грунтов основания: материалы X Международной конференции по мерзлотоведению TICOP. Том 3. Тюмень: ООО «Печатник», 2012. С. 153–158.
- Dolgich G.M., Okunev C.N., Ctrigkov C.H. The construction in the permafrost zone using systems of thermal stabilization of Foundation soils: materials X International Workshop on Problems of Geocryologies. TICOP. Vol. 3. Tyumen: OOO «Pechatnik», 2012. P. 153–158 (in Russian).
6. Окунев С.Н., Долгих Г.М., Стрижков С.Н., Скорбилин Н.А. Термометрический мониторинг систем температурной стабилизации грунтов: материалы X Международной конференции по мерзлотоведению TICOP. Том 3. Тюмень: ООО «Печатник», 2012. С. 369–373.
- Okunev C.N., Dolgich G.M., Ctrigkov C.H., Skorbilin N.A. Thermometric monitoring system of the temperature stabilization of soils: materials X International Workshop on Problems of Geocryologies. TICOP. Vol.3. Tyumen: OOO «Pechatnik», 2012. P. 369–373 (in Russian).
7. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск: Наука, 1985. 169 с.
- Makarov V.I. Thermosyphons in northern construction. Novosibirsk: Nauka, 1985. 169 p. (in Russian).
8. Кузьмин Г.П. Подземные сооружения в криолитозоне. Новосибирск. Наука, 2002. 176 с.
- Kuzmin G.P. Underground construction in the cryolithozone. Novosibirsk: Nauka, 2002. 176 p. (in Russian).
9. Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. проф. В.А. Кудрявцева. М.: МГУ, 1978. 463 с.
- General permafrost (geocryology) / Ed. prof. V.A. Kudryavtsev. M.: MGU, 1978. 463 p. (in Russian).
10. Архив погоды в Якутске. URL: http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Якутске (дата обращения: 28.08.2018).
- Archive of weather in Yakutsk. URL: https://rp5.ru/Weather_archive_in_Yakutsk (date of access: 28.08.2018).