

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.345

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ ВОКРУГ И ПОД ЗДАНИЯМИ  
ЯКУТСКОЙ ТЕПЛОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

С.И. Заболотник, П.С. Заболотник

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; zabolotnik@mpi.ysn.ru*

Представлены результаты исследований состояния многолетнемерзлых пород на территории Якутской тепловой электростанции с 2008 по 2011 г. На основе ежемесячных измерений температуры грунтов в 36 скважинах глубиной 4–16 м под зданиями и вдоль стен на прилегающих к ним участках установлено наличие таликовых зон. Наиболее высокие значения среднегодовой температуры грунтов (до 12–13 °С) и мощности таликов (23–25 м) отмечены вокруг циркуляционной насосной станции и около здания водогрейных котлов. На большей части электростанции грунты находятся в многолетнемерзлом состоянии. При оттаивании многолетнемерзлых пород под частями зданий происходили неравномерные осадки элементов конструкций, а при последующем промораживании грунтов, наоборот, их выпучивание. Подвижки фундаментов приводили к растрескиванию стен, частичному разрушению оголовков свай, сколам с оголенной арматуры, прогибам рандбалок.

*Средние годовые температуры, многолетнемерзлые породы, талики*

GROUND TEMPERATURE DYNAMICS AROUND AND BENEATH  
THE YAKUTSK COMBINED HEAT AND POWER PLANT BUILDINGS

S.I. Zabolotnik, P.S. Zabolotnik

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 677010, Yakutsk, Merzlotnaya str., 36, Russia; zabolotnik@mpi.ysn.ru*

The analysis of long-term (from 2008 to 2011) research of permafrost condition on the territory of the Yakutsk Combined Heat and Power Plant has been carried out. Monthly ground temperature measurements in 36 boreholes 4–16 m deep beneath the buildings and along the walls in adjacent areas have been made. Currently there are talik zones beneath all the buildings. The highest mean annual ground temperatures (to 12–13 °C) and the talik thickness (23–25 m) have been found around the circulating pump station and near the water boiler facility. In most of the Yakutsk Combined Heat and Power Plant area, the ground is in perennially frozen state. Permafrost thawing beneath the parts of the buildings results in differential settlement of some structural elements, while subsequent ground freezing leads to frost jacking. Foundation displacements lead to the wall cracking, partial breakup of pile heads and chipping from bared reinforcement, and deflection of wall beams.

*Mean annual temperatures, permafrost, taliks*

ВВЕДЕНИЕ

Якутская тепловая электростанция (ЯТЭЦ) была введена в постоянную эксплуатацию 7 ноября 1937 г. и с тех пор обеспечивает город электроэнергией, а с 1961 г. и теплом [Над Леной ТЭЦ..., 2007]. Она является первым промышленным объектом СССР, построенным по принципу использования вечномёрзлых грунтов в качестве его основания.

Сохранение многолетнемерзлого состояния грунтов основания было обеспечено путем установки здания на колонны, поднимающие его над поверхностью земли. Между поверхностью грунта

и зданием оставлено сквозное проветриваемое подполье высотой 1.2–1.8 м, предназначенное для защиты грунтов основания от глубокого оттаивания под воздействием внутреннего тепла здания, а также для накопления запасов холода в них в зимнее время (рис. 1).

Фундаменты первой очереди ЯТЭЦ представляют собой отдельно стоящие через 5–7 м железобетонные колонны с башмаками. В зависимости от запроектированной нагрузки колонны имеют сечение от 30 × 30 до 80 × 80 см, а башмаки основания – от 130 × 130 до 317 × 317 см. Фунда-

менты установлены на глубину 4.5 м от поверхности площадки на ростверк, состоящий из двух рядов лиственничных брусьев сечением 20 × 20 см, уложенных в перекрестном направлении. Фундаменты под турбогенераторы выполнены в виде сплошных бетонных плит площадью около 60 м<sup>2</sup> и толщиной 1 м, уложенных на ростверк из расположенных в перекрестном направлении пяти рядов лиственничных брусьев. Кирпичные стены здания покоятся на мощных железобетонных монолитных рандбалках, которые жестко связаны с колоннами [Цытович и др., 1947].

Все работы по подготовке котлованов, установке фундаментных колонн и плит, а также засыпке их грунтом производились в зимнее время. Одновременно происходило и промораживание вскрытых отложений. Засыпка котлованов производилась мерзлым грунтом из отвалов слоями по 20–25 см. Пустоты между комьями мерзлого грунта заполнялись сухим песком, а образовавшаяся после этого масса утрамбовывалась. Непосредственное пространство вокруг колонн заполнялось песчано-гравийным грунтом.

В связи с постоянным ростом города увеличивалась потребность в электроэнергии. Поэтому неоднократно проводилось расширение и реконструкция зданий тепловой электростанции, комплекс которых приведен в соответствие с современными требованиями. Во время этих работ неукоснительно соблюдался первый принцип строительства – сохранение многолетнемерзлого состояния грунтов основания.

#### ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ЯТЭЦ

ЯТЭЦ находится в северо-восточной части Якутска на берегу городской протоки р. Лены.



Рис. 1. Проветриваемое подполье под главным корпусом ЯТЭЦ. Фото С.И. Заболотника (05.11.2009).

Она возведена на аллювиальной террасе, возвышающейся над уровнем меженных вод на 9–10 м (рис. 2).

Территория, в пределах которой находится город, относится к области сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которых в регионе изменяется от 100 до 300 м, а средняя годовая температура их на глубине 20 м – от –2 до –4 °С [Балобаев, 1991].

В районе ЯТЭЦ, по данным Н.И. Салтыкова, мощность вечномерзлой толщи достигала 180–200 м, а средние годовые температуры грунтов на глубине 15 м непосредственно на площади застройки до возведения сооружений изменялись от –3 до –5 °С. Через 10 лет после заложения фундаментов, по наблюдениям П.И. Мельникова, температура грунтов на глубине 5 м изменялась от –3.2 до –3.6 °С, а мощность сезоннопротаивающего слоя уменьшилась на 0.8 м и не превышала 1 м [Цытович и др., 1947].

Площадка вокруг главного корпуса ЯТЭЦ и ряда других служебных помещений частично асфальтирована и до глубины 1–4 м представлена насыпным грунтом из разнозернистых песков, реже из суглинков с примесью щебня, гальки и шлака. Ниже повсеместно залегают аллювиальные отложения, представленные мелкозернистыми песками, обычно переслаивающимися со средне- и крупнозернистыми. В верхней части разреза (до 11–15 м) встречаются отдельные горизонты супесей, линзы и прослои суглинков, супесей и тонкозернистых песков, а также включения растительного детрита.

Влажность песчаных грунтов изменяется преимущественно от 20 до 30 %, а их плотность – от 1700 до 2040 кг/м<sup>3</sup>. В прослоях с большим количеством растительного детрита, а также в супесча-



Рис. 2. Общий вид Якутской ТЭЦ. Фото П.С. Заболотника (05.09.2013).

но-суглинистых грунтах влажность возрастает до 40 %, иногда и до 60–70 %, а плотность уменьшается до 1460–1500 кг/м<sup>3</sup>. Плотность частицы грунта достаточно стабильна: для песков и супесей она равна 2640–2660 кг/м<sup>3</sup>, для суглинков – 2690 кг/м<sup>3</sup>.

Грунты на площадке ЯТЭЦ незасоленные. Химический анализ водной вытяжки образцов, отобранных на таликовых участках, показал, что сумма минеральных веществ в них составляет всего 0.02–0.07 %. Солевой состав талых и мерзлых грунтов неоднороден. Водные вытяжки талых грунтов преимущественно хлоридно-гидрокарбонатные натриевые, слабощелочные (рН 7.4–7.7), а поровые растворы мерзлых грунтов – гидрокарбонатные, смешанные по составу катионов и более щелочные (рН 7.5–9.0). Это обусловлено, по-видимому, криогенной метаморфизацией водных растворов [Zabolotnik, Zabolotnik, 2009].

За исключением участков локальных таликов, отложения на территории ЯТЭЦ находятся в многолетнемерзлом состоянии. Мощность слоя сезонного промерзания в зависимости от степени растепления участков изменяется от 1.5 до 4.0 м. Глубина сезонного протаивания грунтов составляет 2.2–2.8 м около северной стороны зданий и воз-

растает до 2.5–4.6 м вблизи южной. Непосредственно под главным корпусом она изменяется от 1.0 до 3.0–4.4 м.

### ФОРМИРОВАНИЕ ТАЛИКОВ, ИХ ПРОМОРАЖИВАНИЕ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФУНДАМЕНТОВ

В течение первых 30 лет эксплуатации Якутской ТЭЦ под зданиями, а также на примыкающих к ним участках сформировались обширные таликовые зоны. Основные причины их образования – это тепловыделение от заглубленных объектов и утечки горячих производственных вод непосредственно в грунты основания, а также вдоль линии их сброса из дефектных дренажных труб, канализационной сети и других коммуникаций.

Для промораживания грунтов основания под главным корпусом около части его стены, в непосредственной близости от которой находится циркуляционная насосная станция, в 1967 г. были установлены и пущены в работу шесть многотрубных сезоннодействующих охлаждающих установок (СОУ) системы С.И. Гапеева объемом по 500 л керосина каждая. В 1973 г. с трех сторон этого здания были установлены еще 17 аналогичных установок. СОУ были размещены на расстоянии 1.7–3.5 м от стен здания с шагом от 2.9–3.1 до 5–7 м (рис. 3). Согласно заключению “Сибтехэнерго”, установленные на ЯТЭЦ СОУ за две зимы понизили температуру грунтов на глубину 6 м от положительных значений до –3 °С. Сам автор изобретения сообщил: “Внедрение ... многотрубных автоматически действующих охлаждающих установок позволило ... восстановить мерзлое основание и усилить его под деформирующимися зданиями ЯТЭЦ” [Гапеев, 1983, с. 54].

Ввод в действие СОУ понизил температуру грунтов в непосредственной близости от них, однако полного ожидаемого эффекта по промораживанию оснований фундаментов получить не удалось. Одной из главных причин этого является то, что СОУ были установлены на достаточно большом расстоянии от стен здания, а также между ними. На основе результатов многочисленных опытных данных Л.Н. Хрусталева, О.М. Янченко и Л.А. Наумова [1983] сделали вывод, “что в зависимости от климатических и мерзлотно-грунтовых условий удается достичь замораживания грунта в радиусе от 1 м (Красноярск) до 2.5 м (Воркута)” (с. 5). Аналогичные сведения по радиусу промораживания грунтов с помощью СОУ за один зимний сезон приводят и другие исследователи [Александров, 1983; Миренбург, Федосеев, 1983]. Поэтому было мало шансов проморозить оттаявшие грунты под зданием, так как большинство СОУ находилось за пределами радиуса их действия на фундаменты сооружения.

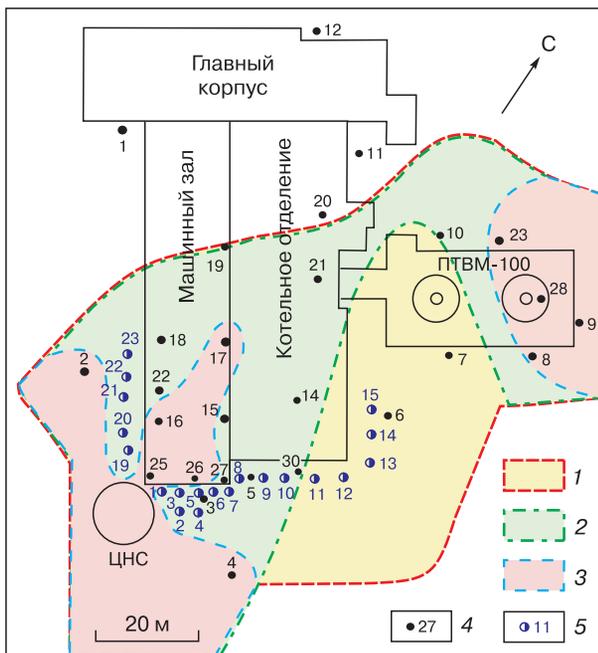


Рис. 3. Изменение границ таликов на площадке ЯТЭЦ с 1976 по 1986 г. [Zabolotnik, Novikov, 2002].

Границы таликов по данным: 1 – Якутского отделения Красноярского треста инженерно-строительных изысканий (КрасТИСИЗ), 1976; 2 – Новосибирского производственного объединения “Сибтехэнерго”, 1978; 3 – Института мерзлотоведения СО РАН, 1986; 4 – скважина и ее номер; 5 – сезоннодействующие охлаждающие установки (СОУ). ЦНС – циркуляционная насосная станция.

Подтверждение тому, что оттаявшие грунты под главным корпусом полностью проморозить не удалось, было получено во время проведения исследований С.И. Заболотником на территории ЯТЭЦ. Измерения температуры грунтов в скважинах 3, 5 и 30, находящихся в непосредственной близости от СОУ (около 1 м), показали, что с октября 1982 по февраль 1986 г. температура грунтов в интервале глубин от 5 до 14 м изменялась от  $-0.5$  до  $-6.9$  °С. Тем не менее под южным углом главного корпуса, вокруг которого с наружной стороны установлены СОУ, талик сохранился (см. рис. 3), а температура грунтов с мая 1985 по апрель 1986 г. на глубине 4 м изменялась от  $-0.4$  до  $+1.8$  °С.

Промораживанию талика в этом месте в значительной мере препятствовали постоянные тепловыделения от заглубленной более чем на 10 м циркуляционной насосной станции (ЦНС) и полузаглубленных трубопроводов, а также периодические утечки горячей воды.

Утечки горячей воды из различных систем и агрегатов оказывают довольно сильное воздействие на многолетнемерзлые породы как в основании сооружений, так и на прилегающей к ним территории. Они наблюдались первым автором из торца пристроя к главному корпусу под котельное отделение во время исследований 1982–1985 гг. В результате мерзлые породы в этом месте (см. рис. 3, скв. 9) оттаяли на глубину 24.5 м, а талик распространился далеко под здание и вокруг него.

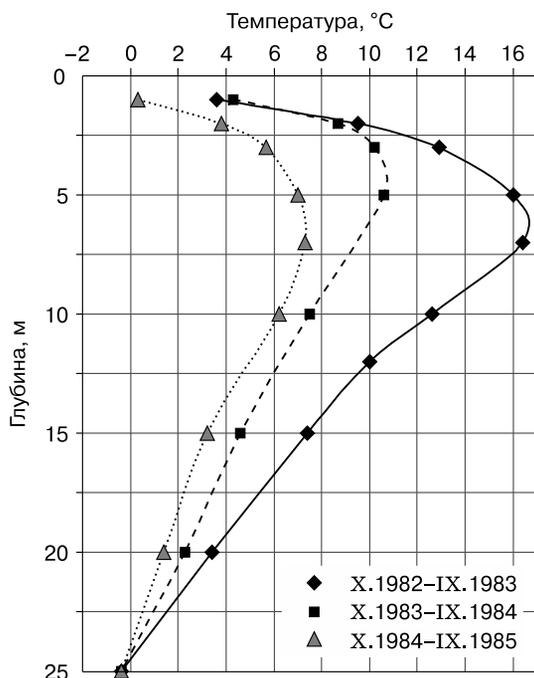


Рис. 4. Изменение средней годовой температуры грунтов в скв. 9 около здания водогрейных котлов с октября 1982 по сентябрь 1985 г.

Периодические поступления горячей воды в грунты под здание приводили к значительному повышению температуры грунтов. Иногда на глубине 9 м она превышала  $20$  °С и изменялась в диапазоне от  $+20.4$  до  $+50.7$  °С [Zabolotnik, Zabolotnik, 2012]! В итоге средняя годовая (с октября 1982 по сентябрь 1983 г.) температура грунтов в интервале 5–7 м достигла  $16$ – $17$  °С. После ликвидации продолжительных утечек происходило постепенное восстановление температурного режима грунтов. Тем не менее за три года наблюдений оно было еще далеко от завершения. Средняя годовая температура грунтов за период октябрь 1984 – сентябрь 1985 г. в этом интервале понизилась только до  $+7$  °С (рис. 4).

Отепляющий эффект от утечек воды непосредственно под здания проявлялся не только в летнее время, но и зимой, так как замерзающая вода постепенно заполняла проветриваемое подполье. В результате образующаяся наледь, с одной стороны, действовала как изолятор, предохраняя основания от охлаждения наружным воздухом, а с другой – перекрывала подполье и исключала циркуляцию воздуха под зданием. В 1980-е гг. наледи достигали значительных размеров. В конце марта 1986 г. наледь под главным корпусом составляла единое поле, общий объем льда в котором превышал  $600$  м<sup>3</sup>, и она практически полностью заполняла проветриваемое подполье (рис. 5) [Заболотник, Новиков, 2002].

Повышение температуры ММП приводит к значительному уменьшению несущей способности фундаментов [Стрелецкий и др., 2012]. При оттаивании ММП под частями зданий ЯТЭЦ возникали неравномерные осадки отдельных элементов конструкций. При последующем промораживании грунтов, наоборот, происходило их выпучивание. С 1982 по 2002 г. соблюдалась общая тенденция

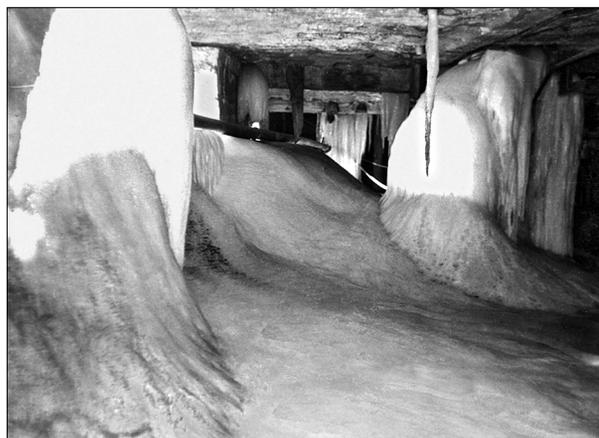


Рис. 5. Наледь под центральной частью главного корпуса около скв. 19. Фото Н.И. Новикова (27.03.1986).

вертикальных перемещений фундаментов: южный угол главного корпуса и примыкающие к нему части здания, под которыми был талик, постоянно оседали, а на промерзающих участках происходило выпучивание конструкций. Хотя в годовом цикле осадки не превышали 3 мм, а выпучивание – 1.1 мм, подвижки фундаментов приводили к различного рода деформациям, наиболее характерными из которых являются трещины стен, частичное разрушение оголовков свай и сколы с оголенной арматуры, прогибы рандбалок [Заболотник, Новиков, 2002].

**ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ В 2008–2011 гг.**

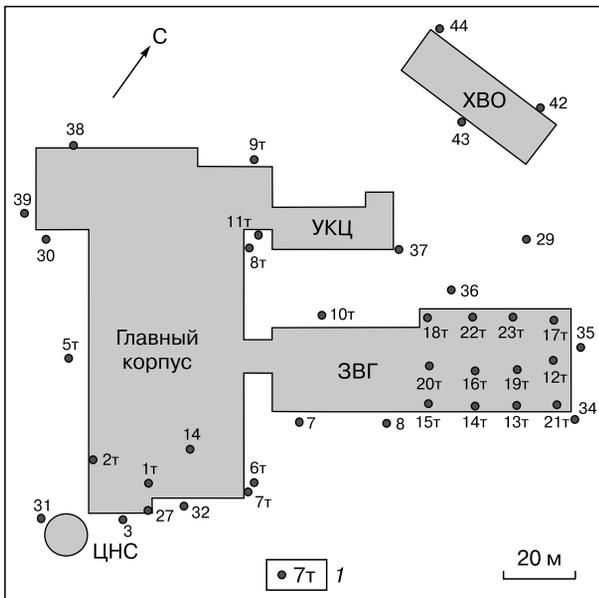
В результате воздействия многих факторов на территории ЯТЭЦ сформировалась довольно сложная мерзлотная обстановка. Для выяснения степени влияния каждого сооружения и возможности восстановления предпостроечного состояния грунтов в их основаниях Институт мерзлотоведения (ИМЗ) СО АН СССР начал проводить там исследования: с 1982 по 1986 г. – ежемесячно, с 2002 по 2006 г. – в отдельные периоды, а с ноября 2007 по декабрь 2011 г. – вновь ежемесячно.

В последние годы измерения температуры грунтов проводились в 36 скважинах глубиной от 4 до 16 м, в том числе в 15 – непосредственно под зданиями (рис. 6). В 2008–2009 гг. измерения про-

водились с помощью полупроводниковых терморезисторов, смонтированных в специальные термоустановки в соответствии с Руководством, разработанным в ИМЗ СО РАН [Балобаев и др., 1977], в 2010–2011 гг. – электронными датчиками.

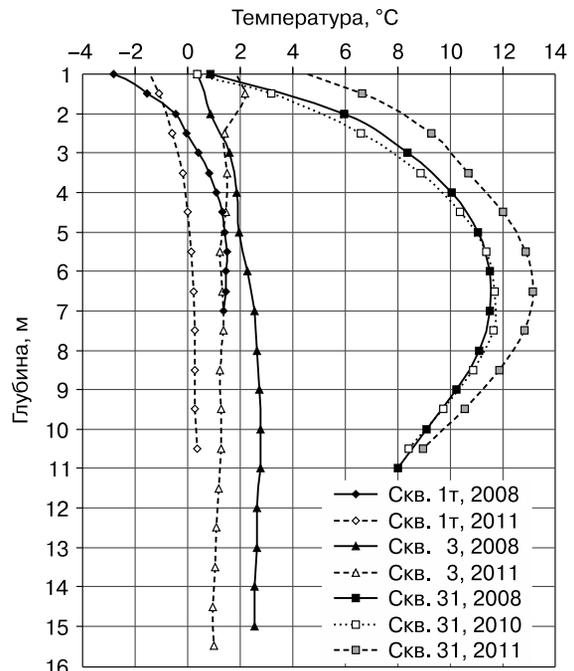
За более чем 70-летний период эксплуатации целого комплекса зданий и сооружений произошли существенные изменения температуры грунтов как в основании фундаментов, так и на примыкающих к ним участках. Площади таликов значительно сократились, при этом они остались и в тех же местах, и образовались под вновь построенными сооружениями.

Наиболее высокая температура в оттаявших грунтах сохранилась вокруг заглубленного здания циркуляционной насосной станции. Отапливаемое помещение станции является постоянным источником тепла большой мощности. Длительное тепловое излучение из нее привело к тому, что грунты вокруг оттаяли на значительную глубину. В июле 2005 г. при бурении скважины 31, расположенной в непосредственной близости от станции, было установлено, что грунты оттаяли до глубины 23 м, а таликовая зона вокруг нее распространилась не менее чем на 25 м и захватила южный угол главного корпуса. В 2008 г. средняя годовая температура грунтов на глубине 6–7 м достигала +11.5 °С. К 2010 г. она сверху немного понизилась, однако в 2011 г. вновь повысилась по всей глубине скважины, достигнув +13.2 °С на глубине 6.5 м (рис. 7, скв. 31).



**Рис. 6. Схема расположения скважин, в которых проводились измерения температуры в 2008–2011 гг.**

1 – скважина и ее номер. ХВО – химводоочистка; ЗВГ – здание водогрейных котлов; ЦНС – циркуляционная насосная станция; УКЦ – углекислотный цех.



**Рис. 7. Изменение средней годовой температуры грунтов в талике вокруг циркуляционной насосной станции.**

Около стены главного корпуса средняя годовая температура грунтов была намного ниже и в 2008 г. изменялась от нулевых значений вблизи поверхности до 2.8 °С в интервале 9.5–11.0 м. В последующие годы продолжалось постепенное охлаждение грунтов в этом месте. В 2011 г. средняя годовая температура грунтов на глубине заложения фундаментов не превышала 1.5–1.6 °С, а глубже 13.5 м стала равной 1.0 °С (см. рис. 7, скв. 3).

Непосредственно под главным корпусом измерения температуры производились вблизи краевой части талика. Если в 2008 г. глубже 4 м средняя годовая температура грунтов была еще достаточно высокой и изменялась от 1.3 до 1.5 °С, то в 2011 г. она понизилась до 0.1–0.3 °С (см. рис. 7, скв. 1т).

Достаточно мощный талик сформировался под восточной частью первой очереди здания водогрейных котлов (ЗВГ-1). В 1986 г. мощность талика в непосредственной близости от восточного торца ЗВГ-1 (см. рис. 3, скв. 9) составляла 24.5 м. В 1989 г. к ЗВГ-1 был пристроен новый корпус ЗВГ-2, немного больший предыдущего. К сожалению, при подготовке котлована 25-метровой скважина 9 и скв. 28 были уничтожены (см. рис. 3). Вместо них пробурено 12 новых скважин, но 4-метровой глубины (см. рис. 6, скв. 12т–23т). Хотя перед возведением нового корпуса котлован промораживался в зимнее время, талик сохранился здесь и до настоящего времени. В 2008 г. он находился под большей частью ЗВГ-2 и простирался далеко за его пределы. Средняя годовая температура грунтов под ЗВГ-2 с 2008 по 2011 г. на глубине 4 м изменялась от 0.3 до 2.9 °С (рис. 8). Мощность этого талика оценить невозможно из-за малой глубины скважин.

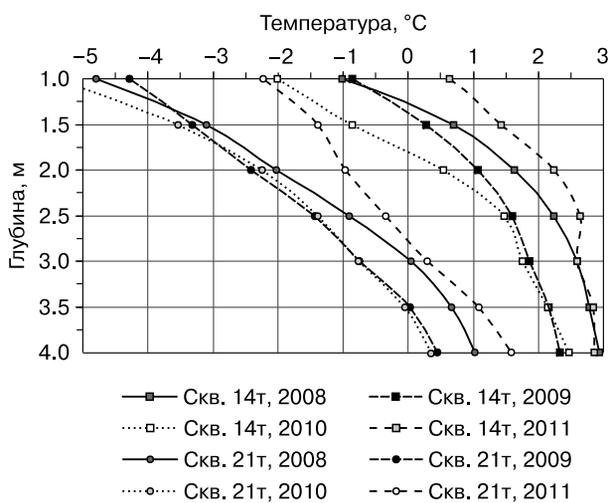


Рис. 8. Изменение средней годовой температуры грунтов под зданием водогрейных котлов (ЗВГ-2).

Вокруг ЗВГ-2 в 2005 г. первым автором были пробурены три скважины: скв. 34, 36 глубиной 10.5 м и скв. 35 глубиной 16.0 м (см. рис. 6). Все они вскрыли талик, нижняя граница которого не была достигнута. В исследуемый период средняя годовая температура грунтов была положительной. С 2008 по 2011 г. происходило постепенное охлаждение грунтов. Вблизи северо-западной стены ЗВГ-2 средняя годовая температура грунтов понизилась с 0.9–1.8 до 0.2–0.8 °С (рис. 9, скв. 36), а около восточного угла – с 2.1–2.6 до 1.3–1.6 °С (рис. 9, скв. 34). Около северного угла ЗВГ-2 с 2008 по 2010 г. также происходило охлаждение грунтов и средняя годовая температура грунтов в интервале 4.5–15.9 м понизилась с 0.4–1.0 до 0.1–0.6 °С. Однако 29 марта 2011 г. в интервале 3.0–5.5 м был зафиксирован резкий скачок температуры грунтов: за 33 дня после предыдущего замера она увеличилась от –0.6 – +0.25 до 34.3 – +35.8 °С. Это можно объяснить только утечкой горячей воды, так как температура воздуха в это время была ниже –10 °С (рис. 9–10, скв. 35). Мощность талика при бурении скважин не была установлена. Судя по измерениям температуры, она не превышает 20 м.

Талик образовался также под южной частью углекислотного цеха (УКЦ). В 2008 г. его мощность составляла 11.5 м, а средняя годовая температура грунтов не превышала 1.8 °С. В последующие два года происходило растепление грунтов, причем на наибольшую величину (до 3.0–3.1 °С) в интервале 8–10 м. В 2011 г. началось восстановление температурного режима грунтов, однако их средняя годовая температура оставалась достаточно высокой и изменялась от 1.7 до 2.6 °С (рис. 11).

Талик находится и под зданием химводочистки (ХВО). Его особенностью является то,

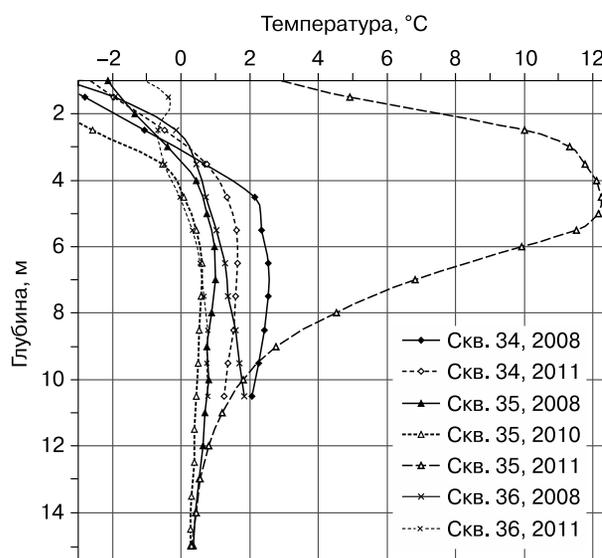


Рис. 9. Изменение средней годовой температуры грунтов в таликовой зоне вблизи ЗВГ-2.

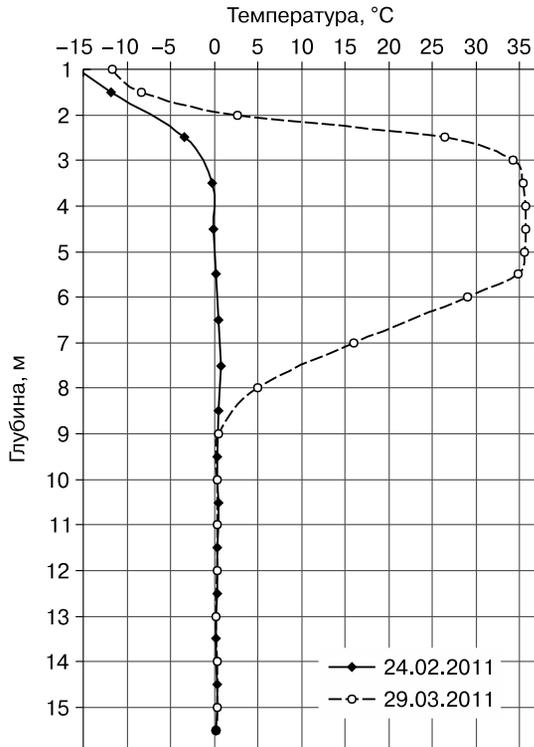


Рис. 10. Влияние утечек горячей воды зимой 2011 г. на температуру грунтов около северного угла ЗВГ-2 (скв. 35).

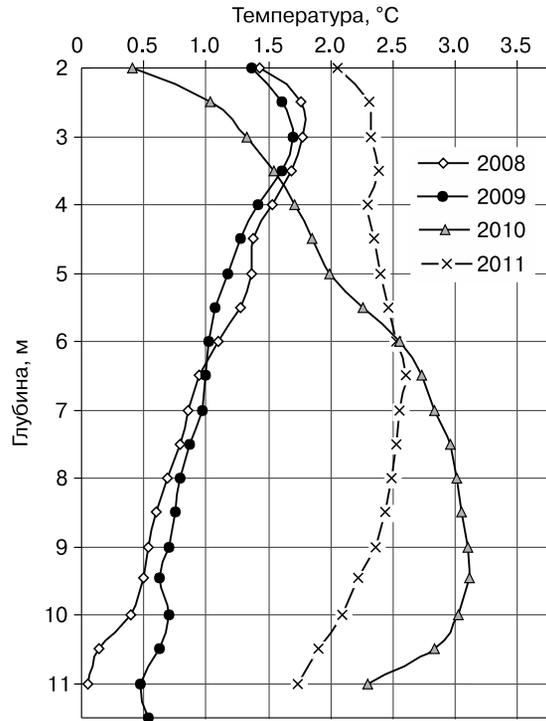


Рис. 11. Влияние утечек горячей воды на температуру грунтов около углекислотного цеха (скв. 11г).

что он расположен на глубине более 6.5 м. При проходке скважин его мощность не была установлена. Не удалось определить ее и по результатам геотермических измерений, так как температура грунтов с глубиной только повышается (рис. 12).

Талик располагается только под восточной частью здания ХВО и вблизи него. Средняя годовая температура грунтов (СГТГ) в интервале 10–11 м в 2008 г. изменялась от 0.9 до 1.5 °С. В течение трех лет происходило постепенное понижение температуры грунтов, и в 2011 г. она не превышала 0.5 °С, а оттаявшие грунты промерзли сверху до глубины 8–9.5 м (см. рис. 12, скв. 42, 43).

Под западной частью ХВО грунты полностью проморожены. С 2008 по 2011 г. средняя годовая температура грунтов здесь, наоборот, повысилась на 0.1–0.2 °С. Самые высокие значения были на глубине 9.5 м – от –0.5 до –0.3 °С (см. рис. 12, скв. 44).

Несмотря на то что в некоторых местах грунты оттаяли на значительную глубину, фундаменты большей части зданий опираются на мерзлое основание.

Самые низкие значения СГТГ отмечались вокруг западного угла главного корпуса. В 2008 г. глубже 4.5 м они изменялись от –2.5 до –3.5 °С. В течение 2009–2010 гг. температура понизилась

до –2.8...–4.1 °С, а в 2011 г. вновь повысилась почти до значений 2008 г. (рис. 13, а, скв. 30, 39). Это свидетельствует о том, что под этой частью здания и вокруг почти восстановилось предпостроечное состояние ММП. Такие низкие температуры обусловлены тем, что в этой части главного корпуса располагаются только административные службы

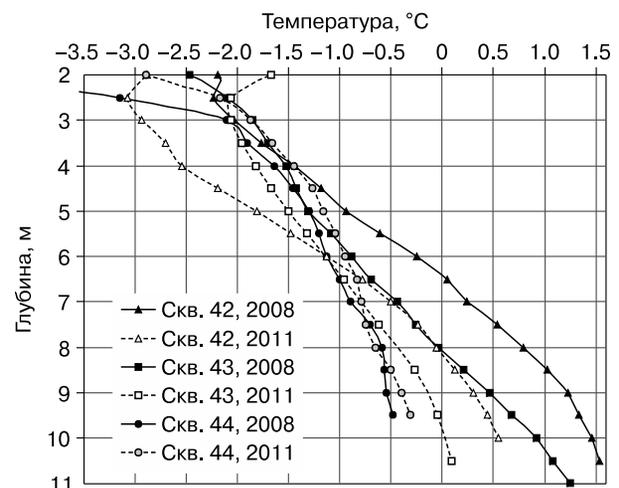
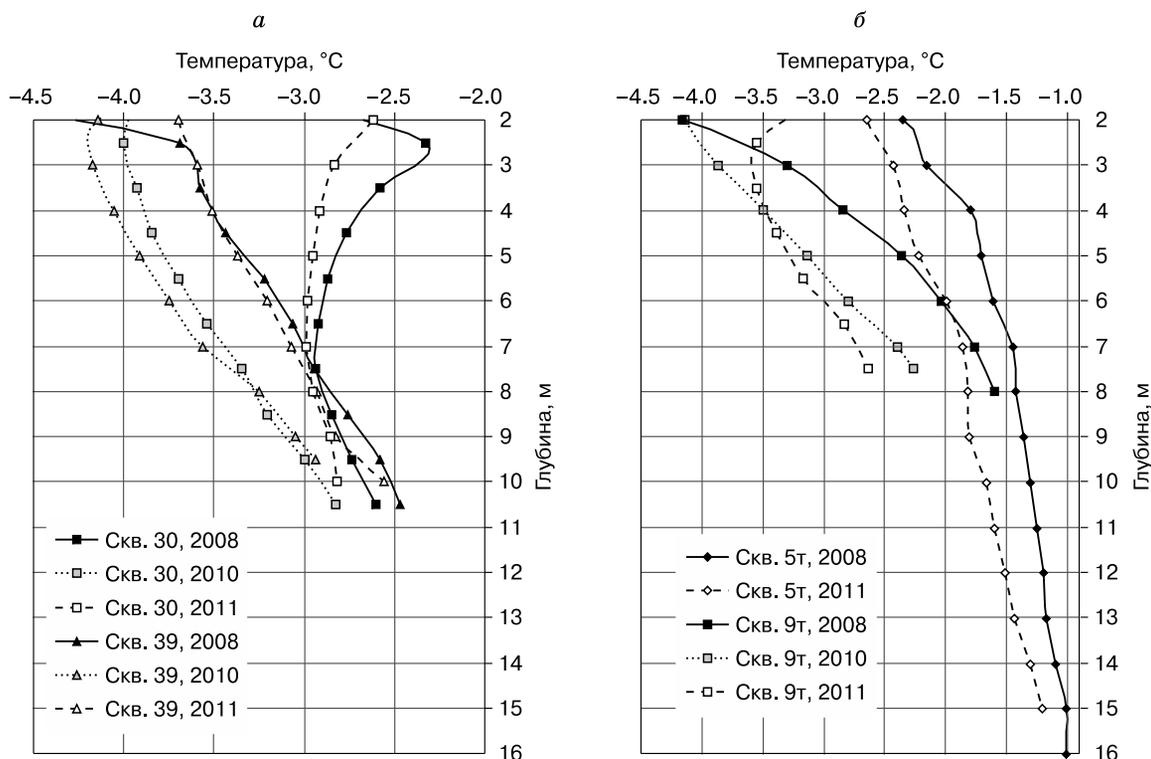


Рис. 12. Изменение средней годовой температуры грунтов вокруг здания химводоочистки.



**Рис. 13. Средние годовые температуры грунтов около главного корпуса:**

*а* – западный угол здания; *б* – северный угол и юго-западная стена.

и нет агрегатов с большим тепловыделением. Естественно, что здесь влияние здания на подстилающие грунты минимальное.

Достаточно низкие температуры ММП наблюдались и вдоль северо-западной стены и северной части юго-западной стены главного корпуса. Около северного угла главного корпуса с 2008 по 2011 г. на глубине 7.5–8.0 м СГТГ понизилась от  $-1.6$  до  $-2.6$  °С, а на глубине 4.5 м соответственно от  $-2.6$  до  $-3.4$  °С (см. рис. 13, б, скв. 9т). Вблизи середины юго-западной стены главного корпуса за четыре года наблюдений СГТГ также понизилась с  $-1.0$  до  $-1.2$  °С на глубине 15–16 м и с  $-1.7$  до  $-2.3$  °С на глубине заложения фундаментов (см. рис. 13, б, скв. 5т).

Самые высокие температуры ММП, естественно, наблюдались вблизи таликовых зон. Около восточного угла главного корпуса СГТГ были достаточно низкими и изменялись от  $-1.5$ ... $-1.8$  °С на глубине 11–15 м до  $-1.8$ ... $-2.8$  °С – на 4.5 м (рис. 14, а, скв. 7т).

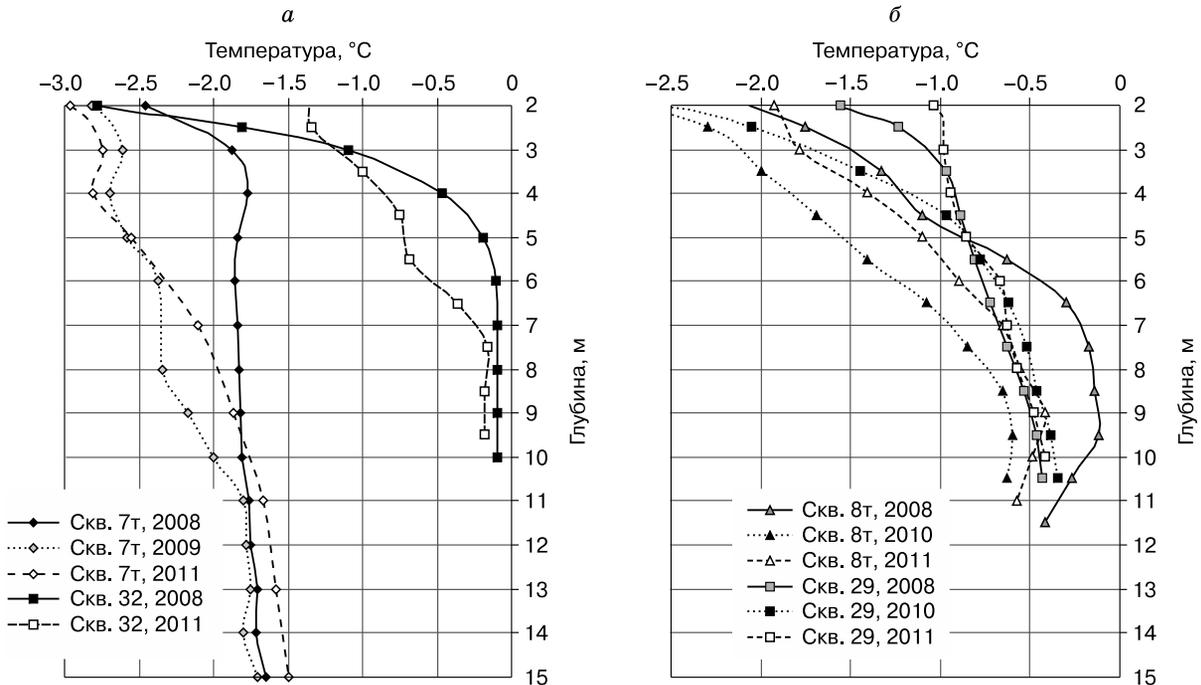
В сторону талика, распространившегося вокруг циркуляционной насосной станции, температуры грунтов стали почти на 2 °С выше. В интервале 7.5–10.0 м СГТГ повысились до  $-0.1$ ... $-0.2$  °С, а на глубине заложения фундаментов они изменялись от  $-0.3$  до  $-0.8$  °С (см. рис. 14, а, скв. 32).

Достаточно высокие температуры грунтов наблюдались около северо-восточной стены главного корпуса вблизи талика, расположенного под УКЦ (см. рис. 6, скв. 8т), и на участке между зданиями водогрейных котлов и химводоочистки (см. рис. 6, скв. 29).

Около стены главного корпуса наиболее высокие значения СГТГ (от  $-0.1$  до  $-0.6$  °С) были на глубине 9 м, а на глубине 4.5 м они изменялись от  $-1.1$  до  $-1.8$  °С (см. рис. 14, б, скв. 8т). На территории, где влияние зданий минимальное, колебания СГТГ были намного меньше. В интервале 6–11 м они составляли всего 0.1–0.3 °С, а на глубине заложения фундаментов (4.5 м) изменялись от  $-0.9$  до  $-1.0$  °С (см. рис. 14, б, скв. 29).

Для оценки состояния грунтов в основании фундаментов ЯТЭЦ и его изменения за весь период измерений были построены температурные поля, отражающие средние годовые температуры грунтов на глубине 4 м. Эта глубина была выбрана не случайно. Главным образом потому, что из 15 сохранившихся под зданиями скважин, только одна имеет глубину 10.5 м, а все остальные – по 4 м. Кроме того, только на 0.5 м ниже находятся основания фундаментов.

В 2008 г. фундаменты опирались на мерзлое основание под большей частью главного корпуса,



**Рис. 14. Средние годовые температуры грунтов около главного корпуса:**

*a* – восточный угол здания; *б* – северо-восточная стена (скв. 8т), между зданиями водогрейных котлов и химводоочистки (скв. 29).

под первой очередью здания водогрейных котлов (ЗВГ-1) и частично под примыкающему к нему ЗВГ-2, а также под северной половиной углекислотного цеха. Причем под северо-западной частью главного корпуса температуры были ниже  $-2^{\circ}\text{C}$ , а на небольших участках ниже  $-3^{\circ}\text{C}$ . Один талик распространялся вокруг циркуляционной насосной станции, захватывая южный угол главного корпуса, второй – под большую часть ЗВГ-2, соединяясь с углекислотным цехом (рис. 15, *a*). Все фундаменты ХВО опирались на мерзлое основание, так как верхняя граница талика под частью этого здания находилась на 2.0–3.5 м ниже.

С 2007 по 2009 г. средняя годовая температура воздуха в Якутске понижалась ежегодно на  $0.2^{\circ}\text{C}$  [Climate..., 2014]. Кроме того, были локализованы утечки воды под здания. Это не могло не сказаться на температурном поле грунтов в основаниях сооружений. Заметно понизились температуры под западной частью главного корпуса, сократилась площадь талика под его южным углом, а также под северной частью ЗВГ-2. Осталась практически неизменной площадь талика под зданием УКЦ (см. рис. 15, *б*).

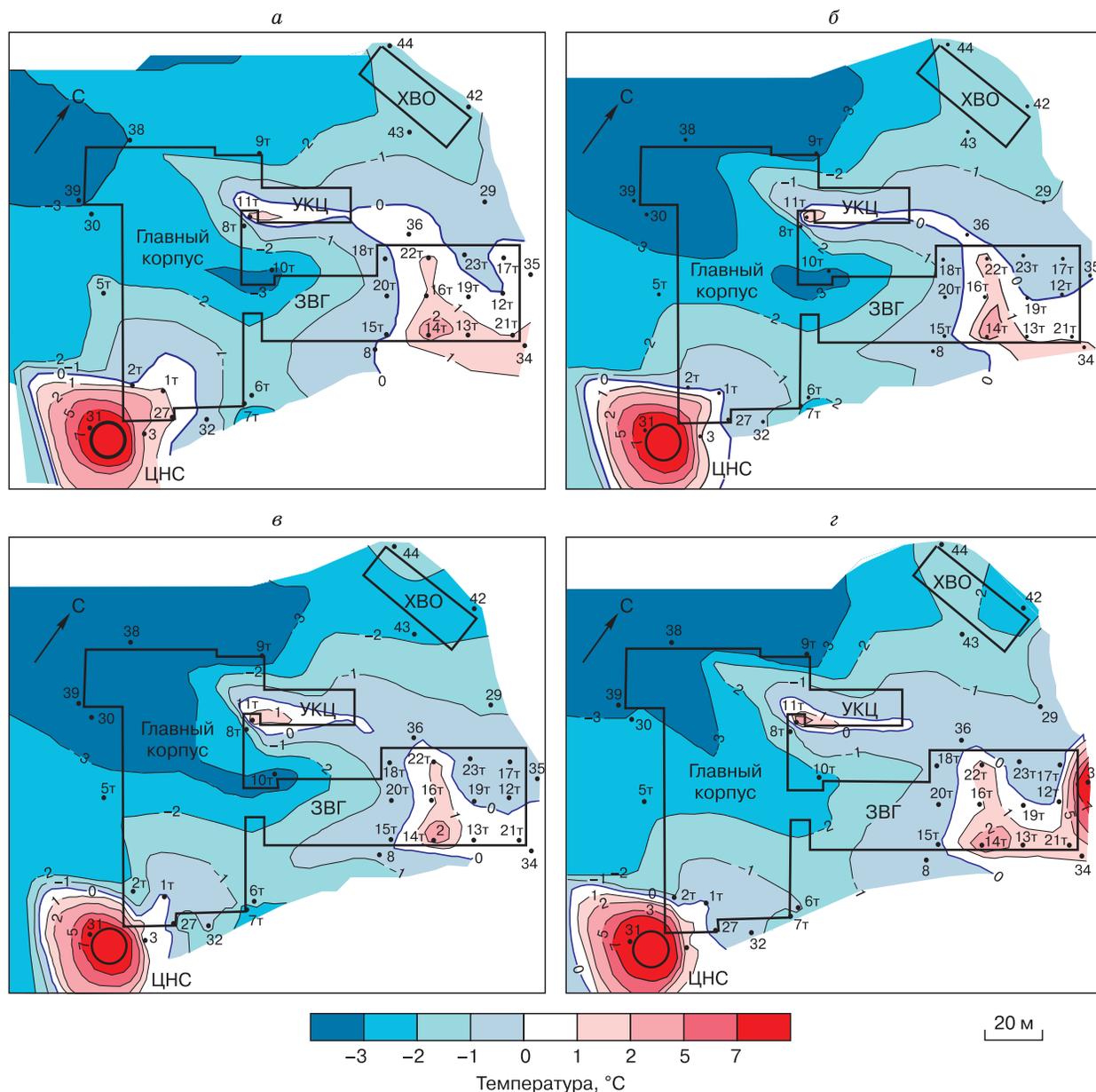
В 2010 г. средняя годовая температура воздуха в Якутске понизилась еще на  $0.3^{\circ}\text{C}$ , поэтому продолжалось медленное восстановление температурного режима грунтов в основаниях фундаментов. Немного расширились площади со сред-

ней годовой температурой грунтов ниже  $-2.0^{\circ}\text{C}$ , сократились площади таликов под главным корпусом и ЗВГ-2, разомкнулся талик между ЗВГ-2 и УКЦ. В то же время площадь талика под углекислотным цехом из-за продолжавшихся утечек воды немного увеличилась (см. рис. 15, *в*).

В 2011 г. средняя годовая температура воздуха осталась такой же, как и в 2010 г. В связи с этим произошли небольшие изменения температурного поля грунтов на глубине 4 м, которые обусловлены в основном наличием теплового воздействия зданий и сооружений. Значительные изменения произошли только вдоль северо-восточной стены ЗВГ-2. Из-за утечек воды в основание этой части здания в марте 2011 г. температура грунтов в интервале 3.0–5.5 м достигала  $34\text{--}36^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 10). В результате СГТГ в этом месте на глубинах 4–5 м превысила  $12^{\circ}\text{C}$ , а талик продвинулся под здание (см. рис. 15, *г*).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние исследования на территории Якутской ТЭЦ показали, что во многих местах произошли значительные изменения температурного режима грунтов. Средняя годовая температура многолетнемерзлых грунтов на глубине заложения фундаментов повысилась от  $-5$  –  $-3^{\circ}\text{C}$  (непосредственно на площади застройки до возведения сооружений) до  $-4$  –  $0^{\circ}\text{C}$  в 2011 г.



**Рис. 15. Средние годовые температуры грунтов на глубине 4 м:**

*а* – 2008 г.; *б* – 2009 г.; *в* – 2010 г.; *з* – 2011 г.

В ряде мест образовались талики глубиной до 25 м, средняя годовая температура грунтов в которых достигала 12–13 °С. Установлено, что талики сохранились под всеми зданиями.

Под зданиями водогрейных котлов и углекислотного цеха талики занимают до 30 % площади, а их размеры почти не меняются из-за практически ежегодных утечек горячей и агрессивной сетевой воды.

Под главным корпусом размеры оттаявшей части основания значительно сократились и не превышают 5 % его общей площади.

Фундаменты здания химводоочистки опираются на мерзлое основание. Талик находился глубже 6.5 м и только под восточной частью здания. В связи с тем, что никаких утечек воды здесь не наблюдалось, в 2011 г. оттаившие грунты промерзли сверху до глубины 8 м.

При оттаивании ММП под некоторыми частями зданий ЯТЭЦ возникали неравномерные осадки отдельных элементов конструкций. При последующем промораживании грунтов, наоборот, происходило их выпучивание. Наблюдаемые с 1982 по 2002 г. вертикальные перемещения фун-

даментов приводили к различного рода деформациям, наиболее характерными из которых являются трещины стен, частичное разрушение оголовков свай и сколы с оголенной арматуры, прогибы рандбалок.

Несмотря на это, состояние всего комплекса сооружений остается достаточно стабильным. Это происходит потому, что при проектировании зданий был заложен достаточно большой запас прочности. В их основании суглинисто-супесчаные грунты были заменены на непучинистые песчаные, кроме того, были предусмотрены достаточно большие размеры башмаков в основании фундаментных колонн, а турбогенераторы и котлы опираются на сплошные бетонные плиты.

### Литература

- Александров Ю.А.** Опыт использования термосвай при строительстве в Воркутинском районе // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1983, с. 88–94.
- Балобаев В.Т.** Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии / В.Т. Балобаев. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.
- Балобаев В.Т., Володько Б.В., Девяткин В.Н., Левченко А.И.** Руководство по градуировке терморезисторов и использованию их при геотермических измерениях. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1977, 39 с.
- Гапеев С.И.** Опыт использования охлаждающих установок в районах распространения вечной мерзлоты // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1983, с. 41–58.
- Заболотник С.И., Новиков Н.И.** Осадка и выпучивание фундаментов Якутской ТЭЦ в процессе 35–50-летней ее эксплуатации // Обеспечение надежности, долговечности зданий и сооружений в холодных регионах. Якутск, Якут-ПНИИС, 2002, с. 51–56.
- Миренбург Ю.С., Федосеев Ю.Г.** Взаимодействие термосвай с промораживаемым основанием // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1983, с. 82–88.
- Над Леной ТЭЦ** – как бригантин / Под ред. Л. Завацкой, Т. Данилевской. Красноярск, Платина, 2007, 136 с.
- Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И.** Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 1, с. 22–32.
- Хрусталева Л.Н., Янченко О.М., Наумова Л.А.** Опыт и перспективы использования автономных парожидкостных охлаждающих устройств в строительстве на вечномерзлых грунтах // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1983, с. 3–12.
- Цытович Н.А.** Фундаменты электростанции на вечной мерзлоте (опыт проектирования, возведения и эксплуатации Якутской центральной электростанции по принципу сохранения вечной мерзлоты) / Н.А. Цытович, Н.И. Салтыков, В.Ф. Жуков, П.И. Мельников. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1947, 104 с.
- Climate Yakutsk from 1933 to 2014.** Data reported by the weather station, 2014. URL: <http://www.tutiempo.net/en/Climate/Yakutsk/249590.htm> (дата обращения: 10.04.2014).
- Zabolotnik S.I., Novikov N.I.** Permafrost Conditions and Vertical Displacements of Foundations at Yakutsk Thermal Power Station for 35–50 Years of Operation // Proc. of the Fifth Intern. Symp. on Permafrost Engineering. Vol. 1. Permafrost Institute Press, Yakutsk, 2002, p. 255–262.
- Zabolotnik S.I., Zabolotnik P.S.** Ground Temperatures beneath the Buildings of the Yakutsk CHP Plant // Proc. of the Eighth Intern. Symp. on Permafrost Engineering (EISOPE). Lanzhou, China, Lanzhou Univ. Press, 2009, p. 318–323.
- Zabolotnik S.I., Zabolotnik P.S.** Changes in the State of Frozen Ground in the Course of Long-term Operation of the Yakutsk Combined Heat and Power (YCHP) Plant // Tenth Intern. Conf. on Permafrost. Vol. 2: Translations of Russian Contributions. Salekhard, The Northern Publ., 2012, p. 537–542.

*Поступила в редакцию  
30 декабря 2014 г.*