

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 550.361.4

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(46-57)

**ИЗМЕНЕНИЕ ФОНОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
В ЯКУТСКЕ В ПЕРИОД ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В СИБИРИ (1976–2011)****Л.Г. Нерадовский***Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; leoner@mpi.ysn.ru*

Приводятся результаты анализа данных термометрии скважин, полученных в г. Якутске в период потепления климата Земли (1976–2011) и в период, когда его не было (1930–1940). Сравнительный анализ данных показал, что потепление климата привело к росту фоновой температуры мерзлых грунтов в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10–15 м в центральной части г. Якутска и его окрестностях на 4.0 и 1.2 °С с темпом прироста 0.056 и 0.017 °С/год. Различие темпов роста температуры обусловлено неодинаковым влиянием антропогенно-техногенных факторов, регулирующих процесс затенения и охлаждения дневной поверхности. Несмотря на длительное потепление климата с середины 1960-х гг., температура мерзлых грунтов в 1976–2011 гг. на глубине 10–15 м в целом по г. Якутску не достигала критических значений (–0.1...–0.5 °С) и с вероятностью 80–85 % изменялась от –1.0 до –6.0 °С. Такие температуры мерзлых грунтов, сложенных на глубине установки свайных фундаментов инженерных сооружений нельдистыми незасоленными песками, достаточны для сохранения их механической прочности.

*Якутск, термометрия скважин, мерзлые грунты, температура, фоновые значения, потепление климата, вероятность*

**CHANGES OF THE BACKGROUND PERMAFROST TEMPERATURE IN YAKUTSK  
DURING THE CURRENT PERIOD OF CLIMATE WARMING IN SIBERIA (1976–2011)****L.G. Neradovskii***Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,  
36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; leoner@mpi.ysn.ru*

This paper presents results of the statistical analysis of borehole temperature data obtained in Yakutsk during the observed global warming period (1976–2011) against the period with no warming (1930–1940). The comparative analysis of the data sets has revealed a climate warming effect on the background temperatures of permafrost as a 4.0 °C increase at the depths of 10–15 m in the downtown area and a 1.2 °C increase in the suburbs, at a rate of 0.056 and 0.017 °C/year, respectively. The difference in temperature increase is attributed to different inputs of some anthropogenic factors that control ground surface shadowing and cooling. Despite the persistent climate warming which began in the mid-1960s, the permafrost temperatures did not reach critically high values (–0.1 to –0.5 °C) at a depth of 10–15 m in the period between 1976 and 2011 and varied from –1.0 to –6.0 °C with 80–85 % probability for Yakutsk. These temperatures are sufficiently low for foundation soils composed of ice-poor, non-saline sands at the pile embedment depth, to maintain their mechanical strength.

*Yakutsk, borehole temperature measurements, permafrost, temperature, background values, climate warming, probability*

**ВВЕДЕНИЕ**

Реакция многолетнемерзлых пород на изменение климата Земли находится в центре внимания ученых со времени возникновения науки мерзлотоведения [Конищев, 2009]. Интерес к этой теме усилился во второй половине XX в. в связи с очередным потеплением климата, когда на первый план выдвинулись прикладные задачи изучения изменения теплового состояния многолетнемерзлых пород при их взаимодействии с инженерными сооружениями. Цель настоящей статьи – показать результат влияния потепления на многолетне-

мерзлые породы (далее – мерзлые грунты), слагающие основания свайных фундаментов инженерных сооружений в г. Якутске. Для достижения этой цели необходимо было решить несколько задач статистического и сравнительного анализа, используя данные по термометрии скважин, полученные до 1930–1940 гг. и в период потепления климата 1976–2011 гг. По этим данным были вычислены и сопоставлены фоновые значения температуры мерзлых грунтов в наиболее важной для строительства и эксплуатации инженерных соору-

жений нижней части слоя годовых теплооборотов (СГТ) на глубине 10–15 м<sup>1</sup> в двух основных функциональных частях г. Якутска – центральной и в ее окрестностях.

Прежде чем перейти к дальнейшему изложению, необходимо пояснить смысл понятия “фоновое значение температуры”. Оно нередко употребляется в области наук о Земле, но точного определения ему нет. Применительно к изучению температурного поля с позиции теории вероятности и математической статистики это понятие означает не любое среднее значение, а только среднее арифметическое значение температуры, оцененное по достаточно большому количеству данных, вероятностное распределение которых реально или теоретически описывается нормальным (гауссовым) законом. При таком определении фоновое значение температуры с той или иной мерой общности и точности является выборочной репрезентативной оценкой математического ожидания истинного среднего значения температуры в недоступной для практического изучения генеральной совокупности, состоящей из очень большого числа данных термометрии скважин на территории г. Якутска.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что Якутск начал строиться в 1632 г. под руководством казака Петра Бекетова в расширенной левобережной части долины р. Лены, называемой местным населением Туймаада. Протяженность долины между Табагинским (на юге) и Кангаласским (на севере) мысами составляет почти 70 км, а ширина достигает 11–15 км. В геоморфологическом отношении г. Якутск занимает две надпойменные голоценовые террасы [Коржуев, 1959; Соловьев, 1959; Гриненко и др., 1995]. Историко-современный центр города находится на первой террасе – Якутской, окрестности центральной части расположены на более высокой второй террасе – Сергеляхской.

Такой привычной схемой геоморфологического районирования до сих пор руководствуются в практической деятельности геологи. Однако данные детальных исследований стратиграфии аллювия долины Туймаада [Спектор и др., 2008] указывают на то, что Якутск находится на одной разновысотной надпойменной дриас-голоценовой террасе, денудационно-аккумулятивная поверхность которой имеет сложное строение микрорельефа и гидрографической сети (стариц, проток, озер).

Пойменная часть долины Туймаада остается до настоящего времени незастроенной. Исключение – два экспериментальных участка строительства 202-го и 203-го кварталов города на искус-

ственно возведенной толще намывных песчаных грунтов.

Несмотря на разные представления геоморфологов о строении долины Туймаада, мощность мерзлых аллювиальных и озерно-болотных отложений в целом возрастает в направлении от русла р. Лены к выходу на дневную поверхность ее коренного основания<sup>2</sup>, сложенного осадочными породами юрского возраста (песчаниками, алевролитами, алевролитами). По данным буровых и геофизических работ, эти породы в г. Якутске преимущественно залегают на глубине 16–23 м.

Мощность мерзлой толщи в Якутске составляет 250–300 м. Температура в нижней части СГТ на глубине 10–15 м очень изменчива в горизонтальном направлении. Нередки случаи, когда на расстоянии в первые десятки метров температура грунтов может измениться на несколько градусов, что, конечно же, затрудняет изучение закономерностей динамики температуры мерзлых грунтов по площади г. Якутска. Такая неблагоприятная особенность для принятия инженерно-управленческих решений порождена не природным разнообразием теплообмена мерзлых грунтов с поверхностью земли, а влиянием сложно построенной системы инженерных сооружений и коммуникаций (домов, дорог, лотков кабелей электропитания, канализационных коллекторов и др.).

По данным Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЯкутГИСИЗ), обобщенный инженерно-геологический разрез г. Якутска имеет следующее строение:

1) культурный слой (кирпичи, известка, навоз, опилки и прочий мусор прежнего и настоящего времени). Мощность слоя изменяется от 0.4 до 3.7 м при среднем значении 1.5 м. Вероятность встречи слоя в разрезе 25 %;

2) слой в разной степени засоленных глинистых грунтов (суглинков и супесей) мощностью 1.2–4.1 м со средним значением 2.6 м. Средняя глубина залегания границ слоя равна 0.6–3.2 м. Вероятность встречи слоя в разрезе 86 %;

3) слой нельдистых песков с массивной криотекстурой мощностью 8.7–16.2 м со средним значением 14.7 м. Средняя глубина залегания границ песчаного слоя 3.7–18.4 м. Вероятность встречи в слое слабозасоленных пылеватых песков с включением растительных остатков и детрита, а также мелкозернистых, в большинстве случаев незасоленных, песков с небольшим количеством растительных остатков равна 31 и 37 %. Незасоленные чистые (без примесей органики) и однородные по грансоставу средне- и крупнозернистые пески встречаются в слое с вероятностью 92 и 70 % соответственно;

<sup>1</sup> Как правило, до этой глубины, совпадающей с заглублением свайных фундаментов инженерных сооружений, бурились проектно-изыскательские скважины.

<sup>2</sup> В виде уступа эрозионной поверхности Приленского плато высотой 100–120 м над долиной Туймаада.

4) слой крупнообломочных грунтов (гравия и гальки). Мощность слоя изменяется от 0.7 до 4.2 м при среднем значении 2.7 м. Глубина залегания 17.3–20.0 м. Вероятность встречи – 100 %;

5) слой коренных осадочных пород. Глубина залегания границ слоя равна 11.0–28.9 м со средним значением 21.5 м. Вероятность встречи слоя в разрезе 100 %.

Таким образом, начиная с глубины около 4 м, свайные фундаменты инженерных сооружений г. Якутска в большинстве случаев опираются на прочную литогенную основу – нельдистые и незасоленные мерзлые пески средней и крупной зернистости.

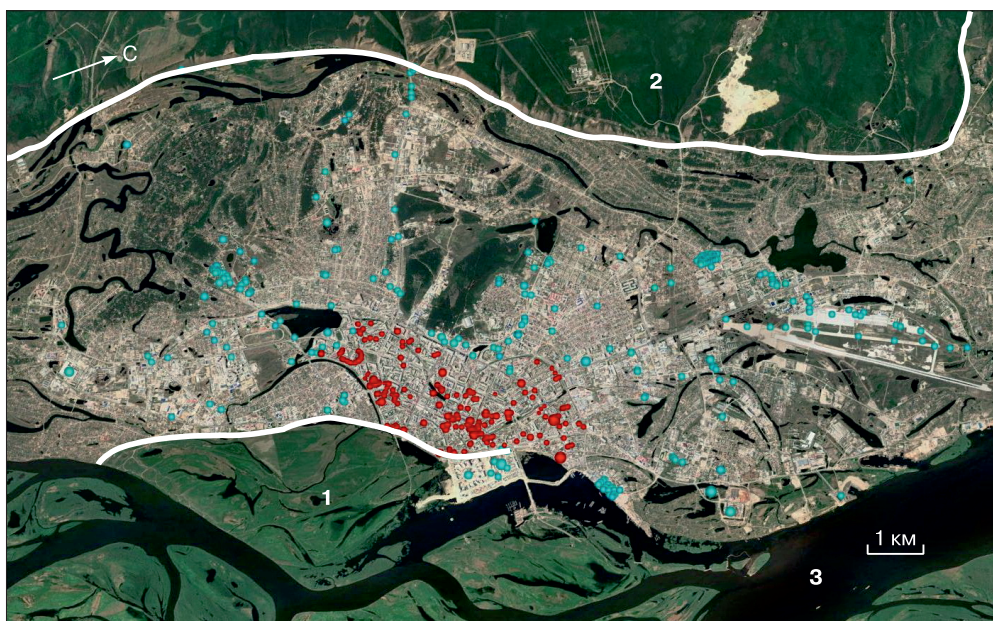
Кратко коснемся истории строительства в Якутске. В 1911 г. по проекту архитектора К.А. Лешевича был построен первый каменный дом на ленточном фундаменте с проветриваемым подпольем. За ним были построены другие дома на фундаменте такого же типа, но уже с применением бутового камня вместо кирпича. Успешное строительство в 1936 г. трестом “Якутстрой” здания тепловой электростанции послужило стимулом для строительства домов на сваях с бетонными башмаками, установленными на глубине залегания кров-

ли мерзлоты (не глубже 3 м). Технологическим прорывом (по показателям производительности, экономичности, надежности) в середине 1970-х гг. стало массовое строительство каменных домов в северо-восточной части арктической и субарктической зон России (Норильске, Воркуте, Игарке). В ходе строительства применялся свайный фундамент, устанавливаемый буроопускным способом в мерзлые скальные или дисперсные грунты [Растегаев и др., 2009]. В Якутске торец свай устанавливался и продолжает устанавливаться в нижнюю часть СГТ (зону термического покоя), преимущественно на глубину 10–15 м, где, за исключением редких случаев, залегают прочные твердомерзлые нельдистые незасоленные пески.

### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Материал был собран в архиве ЯкутГИСИЗ<sup>3</sup> из отчетов по инженерно-геологическим изысканиям, выполненным на 282 объектах строительства и эксплуатации инженерных сооружений в 1976–2011 гг.

Материал содержит данные термометрии по 1123 скважинам с одноразовыми измерениями в разных местах г. Якутска и в разное время темпе-



**Рис. 1.** Расположение объектов инженерно-геологических изысканий с термометрией скважин в 1976–2011 гг. в центральной части (красные точки) и окрестностях (голубые точки) г. Якутска.

1 – пойма Зеленый Луг; 2 – высокий берег Приленского плато; 3 – река Лена и ее протоки.

<sup>3</sup> ЯкутГИСИЗ в прошлом веке был базовым трестом НПО “Стройизыскания” Госстроя РСФСР и выполнял инженерно-строительные изыскания на всей территории Якутии. Архив ЯкутГИСИЗ содержал огромный объем инженерно-геологической и иной информации, включая данные термометрии скважин по г. Якутску. В конце 2014 г. ЯкутГИСИЗ был признан банкротом и перестал осуществлять свою деятельность. К сожалению, местонахождение архива ЯкутГИСИЗ в настоящее время остается неизвестным.



ратуры мерзлых грунтов в нижней части СГТ на глубине 10–15 м ( $t_{10-15}$ ), где, как сказано выше, чаще всего были установлены торцы свайных фундаментов инженерных сооружений.

До 1980-х гг. температура в скважинах измерялась в Якутске с помощью вытяжных заливочных ртутных термометров<sup>4</sup> с погрешностью порядка 0.1 °С. Позже применялся более точный, экологически чистый и удобный в практическом применении способ преобразования значений электросопротивления полупроводниковых датчиков (терморезисторов) в значения температуры по градуировочным таблицам, которые создавались на ЭВМ для каждого терморезистора. Технология градуировки терморезисторов была разработана в ИМЗ СО РАН [Балобаев и др., 1985] для региональной геотермии глубоких скважин в криолитозоне России и обеспечивала точность определения температуры до 0.01 °С. В настоящее время преобразование измеренных значений электросопротивления терморезисторов в значения температуры выполняется автоматически специализированными устройствами (логгерами) с такой же или меньшей точностью, с последующей записью результатов в память компьютеров. В целом порядок и содержание работ, выполняемых при термометрии скважин с прямым измерением температуры по шкале ртутных термометров или путем косвенной оценки температуры по электросопротивлению терморезисторов, регламентированы правилами и требованиями ГОСТ 25358-2012 [2013].

Места одноразовых измерений температуры  $t_{10-15}$  в группах из 3–5 и более скважин, пробуренных в 1976–2011 гг. на объектах инженерно-геологических изысканий г. Якутска, показаны на рис. 1. Несмотря на неравномерность распределения, объекты изысканий с термометрией скважин охватывают всю площадь Якутска между поймой (называемой “Зеленым Лугом”) и высоким берегом долины р. Лены. Благодаря распределению объектов изысканий по всей площади г. Якутска, удалось выполнить корректный статистический анализ площадной изменчивости температуры  $t_{10-15}$  с учетом всевозможных сочетаний условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений в 1976–2011 гг.

Неравномерное распределение собранного материала наблюдается и по годам проведения изысканий (рис. 2). Этот недостаток устранить практически невозможно, так как он порожден

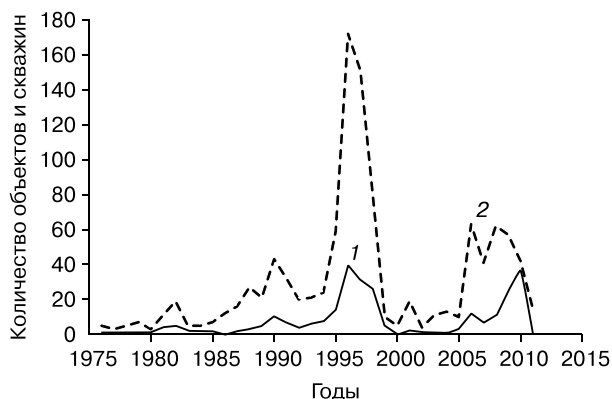


Рис. 2. Временная динамика числа объектов (1) инженерно-геологических изысканий и количества скважин (2) одноразовой термометрии на этих объектах.

действием объективных причин и, отчасти, возникновением непредвиденных субъективных обстоятельств, затруднявших сбор данных в архиве ЯкутГИСИЗ. Действие объективных причин относится к 1987–1999 и 2005–2010 гг., когда объем изысканий в г. Якутске с буровыми работами и термометрией скважин был неожиданно очень большим.

#### АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Анализ выполнен для среднегодовой температуры приземного воздуха ( $t_w$ ) в период потепления климата, которое в Якутске началось в середине прошлого века [Скачков, 2000]. С этого времени в межгодовой изменчивости  $t_w$  наблюдалась тенденция роста, которая приблизительно описывалась линейными уравнениями регрессии (линейными трендами). На основе временного ряда значений  $t_w$  [Справочно-информационный портал..., 2020], сглаженного робастным способом Хубера с окном сглаживания Епанечникова<sup>5</sup>, отмечено несколько этапов развития процесса потепления климата в г. Якутске с разными темпами роста (коэффициентами линейных трендов)  $t_w$  и мерой детерминации (коэффициентами множественной корреляции). Начальный этап (1965–1975) – темп роста 0.045 °С/год, температура от –10.5 до –10.0 °С; второй этап (1975–1990) – темп роста 0.082 °С/год, температура от –10.0 до –8.9 °С; третий этап (1990–2000) – темп роста 0.033 °С/год и незначительное изменение темпе-

<sup>4</sup> Термометры установлены в дюралюминиевый корпус, закупоренный спрессованными стружками из пробок винных бутылок. Сверху и снизу корпус термометров заливался воском. Такая конструкция существенно увеличивала тепловую инерцию термометра и позволяла измерять температуру не опасаясь, что она сильно изменится в процессе вытягивания термометров из скважин.

<sup>5</sup> Операция сглаживания межгодовых вариаций значений  $t_w$  выполнена с использованием программы STADIA [Кулаичев, 2006].

ратуры  $-8.9...-8.6$  °С; четвертый этап (2000–2009) – темп роста  $0.091$  °С/год, температура от  $-8.6$  до  $-7.7$  °С; пятый этап (2009–2019) – темп роста  $0.064$  °С/год, температура от  $-7.7$  до  $-7.1$  °С.

Таким образом, процесс потепления климата, начавшийся в 1965 г., развивался неравномерно и носил пульсирующий, циклический характер с чередованием в среднем через 12 лет<sup>6</sup> этапов с большей или меньшей силой теплового воздействия на мерзлые грунты Якутска. В течение 26 лет (1975–1990 и 2000–2011 гг.) воздействие было сравнительно сильным и косвенно выражалось темпом роста  $t_w$  от  $0.082$  до  $0.091$  °С/год. В течение 33 лет сила воздействия существенно снижалась (на 42–85 %) с темпом роста  $t_w$  от  $0.033$  до  $0.059$  °С/год.

В период 1976–2011 гг. темп роста  $t_w$  по средневзвешенному показателю был равен  $0.077$  °С/год.

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ТЕРМОМЕТРИИ СКВАЖИН

Цель статистического анализа заключалась в изучении закона и характеристик вероятностного распределения значений  $t_{10-15}$ , измеренных в 1976–2011 гг. по всему Якутску и в его главных функциональных частях промышленно-гражданской инфраструктуры, т. е. в центральной части и ее окрестности. Для достижения этой цели и решения сопутствующих задач с помощью теории вероятности и математической статистики применялся пакет статанализа Microsoft Excel и программа STADIA [Кулаишев, 2006].

Статистический анализ выполнялся в два этапа. На первом этапе по всему фактическому материалу, состоящему из 1123 скважин термометрии, выполнялся анализ изменчивости  $t_{10-15}$  по площади всего г. Якутска. На втором этапе фактический материал разделялся на две группы. В первой группе, состоящей из 626 скважин, анализировалась изменчивость  $t_{10-15}$  в центральной части города. Во второй группе, состоящей из 497 скважин, анализировалась изменчивость  $t_{10-15}$  в окрестности центра города. В математической статистике такие числовые образования принято рассматривать как общие и частные выборочные совокупности, которые по разным схемам, способам и приемам извлекаются из генеральной совокупности. В конкретном случае генеральная совокупность теоретически представляет собой очень большое число значений  $t_{10-15}$  в любой точке г. Якутска за всю историю его существования.

Тестовая проверка по трем критериям (Колмогорова, омега-квадрат, хи-квадрат) показала,

что в общей и частных выборочных совокупностях нулевая гипотеза не подтверждается ни в целом по г. Якутску, ни в его центральной части и ее окрестностях. Формально это означает, что разновременное вероятностное распределение на территории Якутска значений  $t_{10-15}$  в точности не может быть описано нормальным (гауссовым) законом. Однако из этого не следует, что в фактическом материале полностью отсутствует вероятностное распределение значений  $t_{10-15}$ , сформированное в соответствии с действием этого фундаментального закона, явно или неявно существующего в виде подложки в любом неравномерном распределении любой физической величины. Применительно к рассматриваемому фактическому материалу нормальный закон описывает вероятностное распределение значений  $t_{10-15}$  в виде симметричных графиков теоретических вариограмм, построенных по общей (рис. 3, а) и частным (рис. 3, б, в) выборочным совокупностям.

Несимметричные графики гистограмм описывают ту часть вероятностного распределения значений  $t_{10-15}$ , которое отчасти нарушает и ослабляет действие нормального закона, уравнивающего влияние на исследуемое температурное поле мерзлых грунтов на глубине 10–15 м множества сочетаний разнонаправленных климатических, мерзлотно-грунтовых, антропогенных и техногенных факторов, которыми организационно и технически невозможно управлять.

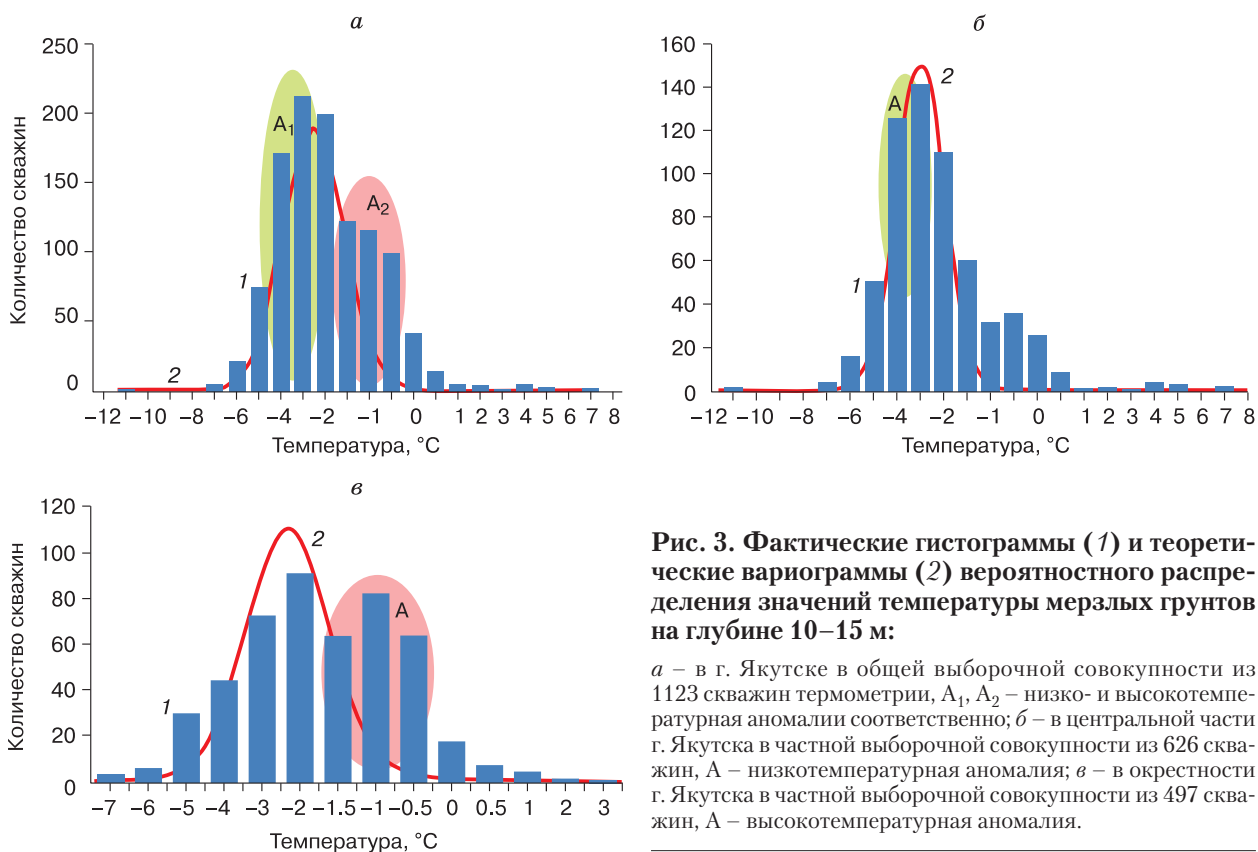
Известно, что геофизические поля Земли, к которым принадлежит и температурное поле, включают нормальную (фоновую) и локальную (аномальную) составляющие. Применительно к рассматриваемому материалу средние арифметические и модальные значения  $t_{10-15}$  (табл. 1), при которых наблюдаются соответственно максимумы вариограмм и гистограмм, характеризуют фоновую и аномальную составляющие температурного поля, сформировавшегося в мерзлых грунтах на глубине 10–15 м в г. Якутске в 1976–2011 гг.

Аномальную составляющую температурного поля мы можем интерпретировать как тенденции изменения фоновых значений  $t_{10-15}$  в сторону понижения или повышения. Такие тенденции на территории Якутска проявляют себя на общей гистограмме двумя максимумами слева и справа от максимума вариограммы (см. рис. 3, а). К сожалению, точно неизвестны не только время и место образования тенденции, но и особенности их развития в период потепления климата<sup>7</sup>.

По результатам детального гистограммного анализа присутствие аномальной составляющей

<sup>6</sup> По данным спектрального анализа методом Фурье, выполненного программой STADIA [Кулаишев, 2006].

<sup>7</sup> Используемый в статье фактический материал разновременной и неравномерной по площади термометрии скважин не позволяет этого сделать путем построения карты температурного поля с разделением на фоновую и аномальную составляющие.



**Рис. 3. Фактические гистограммы (1) и теоретические вариограммы (2) вероятностного распределения значений температуры мерзлых грунтов на глубине 10–15 м:**

*a* – в г. Якутске в общей выборочной совокупности из 1123 скважин термометрии,  $A_1$ ,  $A_2$  – низко- и высокотемпературная аномалии соответственно; *б* – в центральной части г. Якутска в частной выборочной совокупности из 626 скважин,  $A$  – низкотемпературная аномалия; *в* – в окрестности г. Якутска в частной выборочной совокупности из 497 скважин,  $A$  – высокотемпературная аномалия.

температурного поля с тенденцией понижения его фонового значения  $t_{10-15}$  до  $-4.3$  °C установлено в центральной части г. Якутска (см. рис. 3, б, табл. 1). В статистическом смысле это означает, что среди типичных значений  $t_{10-15}$ , распределенных по нормальному закону и составляющих общий фон температурного поля, равный  $-3.0$  °C, появляется группа часто встречающихся ненормально распределенных значений, сосредоточенных вблизи среднего модального значения  $-4.3$  °C. Максимум гистограммы, соответствующий такому значению, удостоверяет, что в центральной части Якутска основания фундаментов инженерных сооружений на глубине 10–15 м находятся чаще всего в низкотемпературном твердомерзлом состоянии. Аналогичные рассуждения применимы и для окрестностей центра Якутска с фоновыми значениями  $t_{10-15}$ , равными  $-2.3$  °C, где, судя по отчетливо выраженному максимуму в правой части гистограммы со средним модальным значением  $-1.2$  °C (см. рис. 3, в, табл. 1), действует тенденция роста значений  $t_{10-15}$ . Здесь, в отличие от центральной части города, мерзлые грунты находятся в состоянии, близком к высокотемпературному.

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

В целом по г. Якутску и его центральной части в 1976–2011 гг. значения  $t_{10-15}$  изменялись от

$-11.9$  до  $6.8$  °C (см. табл. 1). В окрестности центра города разброс значений  $t_{10-15}$  уменьшается до  $-7.3$  и  $2.8$  °C. Меньший разброс косвенно указывает, что в окрестностях города со вспомогательной промышленной инфраструктурой, дачными поселками, приусадебными участками земли мерзлые грунты, с одной стороны, в меньшей степени подвержены влиянию аномально высоких техно-

**Таблица 1. Описательная статистика вероятностного распределения температуры мерзлых грунтов на глубине 10–15 м**

| Описательные статистики         | $t_{10-15}$ , °C  |                          |                    |
|---------------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|
|                                 | Весь город Якутск | Центральная часть города | Окрестность города |
| Среднее арифметическое ( $AP$ ) | -2.7              | -3.0                     | -2.3               |
| Стандартная ошибка $AP$         | 0.06              | 0.08                     | 0.10               |
| Среднее медианное               | -2.6              | -3.2                     | -2.0               |
| Среднее модальное               | -2.3              | -4.3                     | -1.2               |
| Стандартное отклонение          | 1.8               | 1.9                      | 1.6                |
| Коэффициент вариации, %         | 68.4              | 65.3                     | 70.6               |
| Минимальное значение            | -11.9             | -11.9                    | -7.3               |
| Максимальное значение           | 6.8               | 6.8                      | 2.8                |
| Количество скважин              | 1123              | 626                      | 497                |
| Погрешность $AP$ (95 %)         | $\pm 0.108$       | $\pm 0.152$              | $\pm 0.146$        |

генных тепловых нагрузок, а с другой – имеют более высокие природные значения температуры.

Детальный анализ вероятностного распределения значений  $t_{10-15}$  с дискретизацией в 1.0 и 0.5 °С в области, примыкающей к фазовым переходам льда в воду (табл. 2), показывает, что в 1976–2011 гг. на территории Якутска на глубине 10–15 м существовали разные температурные условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений. В центральной части Якутска и ее окрестностях вероятность встречи на этой глубине талых грунтов со значениями  $t_{10-15} = 0.5–7.0$  °С равна 3.2–3.5 %.

Более редким событием (вероятность не более 1 %) в указанных частях города является встреча мерзлых грунтов с очень низкой температурой  $t_{10-15} = -7.0$  °С и ниже, которая наблюдалась в Якутске в XVII–XIX вв. В XX и XXI вв. низкие значения  $t_{10-15} = -7.0...-4.0$  °С еще встречаются в центральной части города с вероятностью 30.8 %, а в окрестности города с вероятностью 16.7 %. С большей вероятностью (40.1 и 33.2 %) в этих частях города встречаются умеренные значения

$t_{10-15} = -4.0...-2.0$  °С. Повышенные значения  $t_{10-15} = -2.0...-1.0$  °С встречаются с вероятностью 14.7 и 29.6 %. Пограничные значения  $t_{10-15} = -1.0...0.0$  °С, близкие к фазовым переходам льда в воду в мерзлых дисперсных грунтах, встречаются с вероятностью 9.4 и 15.7 %. В целом, как это следует из табл. 2, значения  $t_{10-15} = -6.0...-1.0$  °С встречаются в г. Якутске с вероятностью от 85.5 до 79.5 %.

Таким образом, несмотря на потепление климата, мерзлые грунты в период 1976–2011 гг. сохранили на глубине установки свайных фундаментов температуру, достаточную для продолжения строительства и эксплуатации инженерных сооружений по первому принципу, т. е. с сохранением мерзлых грунтов в основании свайных фундаментов. Речь идет о температуре, при которой сохраняется механически прочное твердомерзлое состояние мерзлых грунтов. Не останавливаясь подробно на этом важном вопросе, заметим, что по стандартам [ГОСТ 25100-2011, 2013] и строительным правилам [СП 25.13330.2012, 2012] мерзлые пески<sup>8</sup> находятся в твердомерзлом состоянии при температуре не выше  $-0.1...-0.3$  °С.

Таблица 2. Статистическая характеристика температурных условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений в г. Якутске на глубине 10–15 м в 1976–2011 гг.

| Условия строительства и эксплуатации | Категория значений температуры | Температура грунтов, °С | Вероятность встречаемости значений температуры, % |             |                    |             |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---|-------------|--------------------|-------------|
|                                      |                                |                         | Центральная часть города                          |             | Окрестности города |             |
| Благоприятные                        | Очень низкие                   | -12...-11               | 0.3   |             | 0.0                |             |
|                                      |                                | -11...-10               | 0.0   |             | 0.0                |             |
|                                      |                                | -10...-9                | 0.0   | <b>0.9</b>  | 0.0                | <b>0.8</b>  |
|                                      |                                | -9...-8                 | 0.0   |             | 0.0                |             |
|                                      |                                | -8...-7                 | 0.6   |             | 0.8                |             |
|                                      | Низкие                         | -7...-6                 | 2.6   |             | 1.4                |             |
| -6...-5                              |                                | 8.1                     | <b>30.8</b>                                       | 6.2         | <b>16.7</b>        |             |
| -5...-4                              |                                | 20.1                    |   | 9.1         |                    |             |
| Умеренные                            | -4...-3                        | 22.5                    |   | 14.7        |                    |             |
|                                      | -3...-2                        | 17.6                    | <b>40.1</b>                                       | 18.5        | <b>33.2</b>        |             |
| Допустимые                           | Повышенные                     | -2.0...-1.5             | 9.6   |             | 12.9               |             |
|                                      |                                | -1.5...-1.0             | 5.1   | <b>14.7</b> | 16.7               | <b>29.6</b> |
| Неблагоприятно критические           | Пограничные                    | -1.0...-0.5             | 5.8   |             | 12.9               |             |
|                                      |                                | -0.5...0.0              | 4.2   | <b>10.0</b> | 3.6                | <b>16.5</b> |
| Недопустимо опасные                  | Высокие                        | 0.0...0.5               | 1.4   |             | 1.6                |             |
|                                      |                                | +0.5...+1.0             | 0.2   |             | 1.0                |             |
|                                      | Очень высокие                  | +1...+2                 | 0.3   |             | 0.4                |             |
|                                      |                                | +2...+3                 | 0.2   |             | 0.2                |             |
|                                      |                                | +3...+4                 | 0.6   | <b>3.5</b>  | 0.0                | <b>3.2</b>  |
|                                      |                                | +4...+5                 | 0.5   |             | 0.0                |             |
| +5...+6                              | 0.0                            |                         | 0.0   |             |                    |             |
| +6...+7                              | 0.3                            |                         | 0.0   |             |                    |             |

Примечание. Условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений по первому принципу, с сохранением в основании свайных фундаментов мерзлых грунтов.

<sup>8</sup> Нельдистые и незасоленные мелко-, средне- и крупнозернистые пески. В подавляющем числе случаев такие пески залегают на глубине установки свайных фундаментов зданий и сооружений 10–15 м.

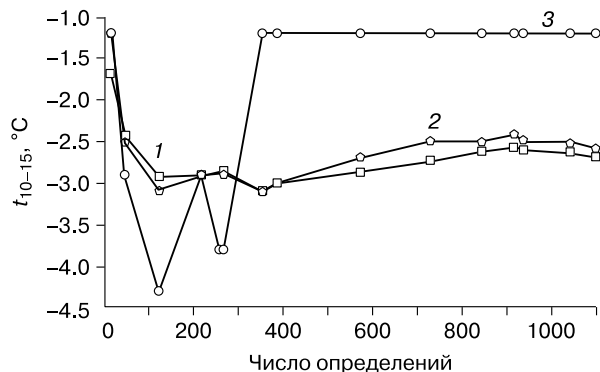


Проверка, сделанная методом последовательного анализа [Вальд, 1960], показала достоверность выборочных оценок средних значений  $t_{10-15}$ . На рис. 4 видно, что общая выборочная совокупность из 1123 скважин термометрии удовлетворяет критерию достоверности, при котором выборочные оценки средних значений  $t_{10-15}$  постоянны или слабо изменчивы в нарастающей численности случайных по времени, месту и числу повторных выборок скважин термометрии из достаточно большой по объему выборочной совокупности.

В рассматриваемом случае распределение выборочных оценок средних значений  $t_{10-15}$  обретает черты стабильности при числе скважин термометрии более 300–350. За этой границей случайное изменение выборочных оценок модальных средних значений  $t_{10-15}$  кардинально меняется и становится постоянным со значением  $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такая особенность, не часто наблюдаемая в вероятностных распределениях физических величин, подтверждает данные гистограммного анализа по окрестности г. Якутска (см. рис. 3, в).

Иная динамика наблюдается у выборочных оценок средних арифметических и медианных значений  $t_{10-15}$  (см. рис. 4). Они не так сильно изменяются при небольших выборках, но их асимптотическая стабилизация происходит при больших выборках. Неизменность выборочных средних оценок  $t_{10-15}$  в интервале  $-2.5...-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  наступает тогда, когда в повторных выборках количество скважин термометрии превышает 843. При таком количестве, согласно закону больших чисел [Пасхавер, 1974], выборочные оценки среднего арифметического значения  $t_{10-15}$  близки к оценке математического ожидания среднего значения в генеральной совокупности при бесконечно большом числе скважин.

Меру близости выборочных оценок среднего к теоретической оценке неизвестного истинного среднего значения нетрудно вычислить по известной формуле [Общая теория..., 1974]. Зададим для решения этой задачи уровень доверительной вероятности 95 %. При таком высоком уровне доверия и большом числе (1123) скважин термометрии погрешность выборочных оценок среднего арифметического значения  $t_{10-15}$  в целом по Якутску равна  $\pm 0.107\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в центральной части города и ее окрестностях с числом скважин 626 и 497 равна  $\pm 0.152$  и  $\pm 0.146\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно. Как видим, погрешности выборочных оценок фоновых значений  $t_{10-15}$ , характеризующих фон температурного поля, незначительны и с округлением до десятых долей градуса практически равны погрешности термометрии скважин в полевых условиях.



**Рис. 4. Вероятностное распределение выборочных средних значений температуры мерзлых грунтов на глубине 10–15 м ( $t_{10-15}$ ) в общей выборочной совокупности из 1123 скважин термометрии на территории г. Якутска.**

1 – среднее арифметическое, 2 – среднее медианное, 3 – среднее модальное значение.

Для того чтобы понять, насколько и в какую сторону изменились фоновые значения  $t_{10-15}$  в г. Якутске в период потепления климата 1976–2011 гг., необходимо их сравнить с аналогичными оценками, полученными до начала потепления климата. Единственной информацией для этого сравнения являются данные режимной термометрии скважин, полученные в 1930–1940 гг., систематизированные и обобщенные в работе П.А. Соловьева [1958]. К сожалению, в этой работе, ставшей уже библиографической редкостью, нет дополнительных и важных для сравнительного анализа сведений. Например, какой тип ртутных термометров использовался, с какой точностью измерялась температура в скважинах, сколько сезонных циклов было включено в режимные наблюдения температурного поля, по какому числу скважин и каким способом<sup>9</sup> вычислены среднегодовые значения температуры мерзлых грунтов на глубине 10–15 м.

Такая неопределенность не позволяла корректно сравнить данные режимной термометрии скважин 1930–1940 гг. с данными одноразовой термометрии скважин 1976–2011 гг. Несмотря на этот серьезный недостаток, процедура сравнения все же была выполнена. Оправданием является не только отсутствие иных фактических данных по термометрии скважин, но и надежность, и высокая точность выборочных оценок фоновых значений  $t_{10-15}$ , полученных в 1976–2011 гг., а также авторитетные оценки значений  $t_{10-15}$ , собранных и проанализированных за 1930–1940 гг.

<sup>9</sup> Скорее всего, вычисления были сделаны распространенным в то время и привычным для большинства мерзлотоведов способом арифметического среднего.



Таблица 3. Сравнительный анализ изменчивости фоновой температуры мерзлых грунтов г. Якутска на глубине 10–15 м

| Объект<br>термометрии     | Возраст<br>застройки, лет | $t_{10-15}$ , °C                  |                              | Различие значений |      |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------|------|
|                           |                           | 1930–1940 гг.<br>[Соловьев, 1958] | 1976–2011 гг.<br>(ЯкутГИСИЗ) | °C                | %    |
| Центральная часть города  | 200–300                   | –7.0                              | –3.0                         | 4.0               | 80.0 |
| Окрестности центра города | Менее 20                  | –3.5                              | –2.3                         | 1.2               | 41.4 |

известным в отечественном мерзлотоведении ученым П.А. Соловьевым. Среднегодовые значения температуры мерзлых грунтов, полученные по массовым измерениям в этот период, рассматриваются как фоновые значения температурного поля на глубине 10–15 м.

Результаты сравнения (табл. 3) свидетельствуют, что мерзлые грунты на глубине 10–15 м отреагировали на потепление климата ростом фоновых значений  $t_{10-15}$ . По отношению к 1930–1940 гг. эти значения в центральной части г. Якутска выросли на 4.0 °C, а в ее окрестности – на 1.2 °C. Темп роста фоновых значений  $t_{10-15}$  в этих частях города за 72 года (1940–2011) составил 0.056 и 0.017 °C/год.

Чем объяснить неодинаковый рост фоновой температуры  $t_{10-15}$  мерзлых грунтов в разных частях г. Якутска при одинаковом влиянии потепления климата со средневзвешенным показателем темпа роста среднегодовой температуры 0.077 °C/год?

Неодинаковая температурная реакция объясняется разной силой влияния некоторых техногенно-антропогенных факторов, которые охлаждают мерзлые грунты путем защиты дневной поверхности городской территории от нагревания теплом солнечных лучей. Изучением неординарного влияния антропогенно-техногенных факторов, понижающих в нижней части СГТ температуру мерзлых озерно-болотных и аллювиальных отложений в г. Якутске и Центрально-Якутской низменности, занимались И.Д. Белокрылов [Белокрылов, Ефимов, 1960], С.В. Шимановский [1942], Н.И. Салтыков [1946], П.И. Мельников [1951] и др.

Из числа антропогенных факторов основным фактором охлаждения дневной поверхности и понижения температуры мерзлых грунтов в нижней части СГТ И.Д. Белокрылов и Н.И. Салтыков считали культурный слой. П.И. Мельников видел в рассматриваемом явлении главным образом действие соленых фекальных вод, циркулирующих в сезонноталом слое. Другие ученые приводили убе-

дительные аргументы в пользу иных факторов, но все они так или иначе сводились к выводу, который сформулировал П.А. Соловьев [1958]: “Одним из главных факторов, вызывающих усиленное охлаждение грунтов в поселке<sup>10</sup>, является, по видимому, затенение, прекращение прогревания прямыми лучами Солнца. Одновременно этот фактор является наиболее универсальным, действуя в поселениях любого типа и возраста” (с. 188).

Обращая внимание на универсальность фактора<sup>11</sup> затенения, который действует и в природных условиях, П.А. Соловьев делает заключение, что охлаждение дневной поверхности сильнее в более обжитых населенных пунктах, т. е. зависит от времени их освоения. Здесь с учетом первого принципа строительства и эксплуатации, т. е. с сохранением в основаниях инженерных сооружений мерзлых грунтов, прослеживается закономерность. А именно, чем больше в населенных пунктах зданий и сооружений и чем ближе они расположены друг к другу, тем больше площадь затенения дневной поверхности. Следовательно, в сочетании с другими факторами, сильнее воздействие фактора понижения температуры мерзлых грунтов в нижней части СГТ.

В работе П.А. Соловьева есть таблица соответствия между возрастом застройки г. Якутска и среднегодовыми значениями температуры мерзлых грунтов в нижней части СГТ на глубине 10 м ( $t_{10}$ ) [Соловьев, 1958, с. 186].

В 1930–1940 гг. на незастроенной окрестности города, где еще не происходило антропогенного охлаждения поверхности земли, значение  $t_{10}$  было около –2 °C<sup>12</sup>. В окрестности центра города с возрастом застройки 20–30 лет в 1940 г. (период освоения 1910–1920 гг.) антропогенное охлаждение за счет затенения дневной поверхности зданиями и сооружениями, а также термоизоляции культурным слоем понизило  $t_{10}$  до –3...–4 °C. Еще сильнее антропогенный процесс охлаждения дневной поверхности с дополнительным влиянием техногенных факторов понизил  $t_{10}$  в обжитой центральной части города с возрастом застройки

<sup>10</sup> Подразумевается г. Якутск.

<sup>11</sup> Было бы точнее назвать фактор затенения процессом затенения, так как именно в нем находит свое сконцентрированное выражение результат общего действия природных и техногенно-антропогенных факторов.

<sup>12</sup> В сравнении с ним фоновое значение  $t_{10-15}$  в окрестностях г. Якутска почти не изменилось (–2.3 °C в 1976–2011 гг.).

200–300 лет в 1940 г. (период освоения 1640–1740 гг.). В этой части города значение  $t_{10}$  к 1930–1940 гг. достигло самых низких значений, равных  $-6...-8$  °С (см. табл. 3).

В центральной части г. Якутска антропогенно-техногенный процесс затенения дневной поверхности с понижением температуры мерзлых грунтов в нижней части СГТ не только продолжился, но и усилился в 1976–2011 гг. благодаря многократному росту суммарной площади затенения городской территории большим числом расположенных недалеко друг от друга зданий и сооружений. Понижению температуры мерзлых грунтов в немалой степени способствовало также устройство в зданиях и сооружениях проветриваемого подполья и систем искусственного охлаждения мерзлых грунтов. Усилилась и термозащита мерзлых грунтов со стороны культурного слоя с добавлением к нему слоя техногенных отложений, суммарная мощность которых после 1932 г. в среднем увеличилась более чем на  $3.7 \text{ м}^{13}$  [Макаров, Торговкин, 2018].

Все вместе взятое, а также прогноз о постепенном переходе потепления климата в длительный период похолодания не только в г. Якутске, но и на территории всей Якутии [Балобаев и др., 2009; Нерадовский, Скачков, 2011], позволяют сделать вывод о том, что температура  $t_{10-15}$  в Якутске не превысит  $-1$  °С, т. е. пограничного (критического) значения, за которым начинается быстрая потеря механической прочности мерзлых песчаных грунтов.

Таким образом, есть объективное основание ожидать, что в течение нескольких десятков лет фундаменты инженерных сооружений будут опираться на прочную в механическом отношении литогенную основу в виде твердомерзлых нельдистых незасоленных песчаных грунтов. Разумеется, при соблюдении правил производства проектно-изыскательских работ, а также правил строительства и эксплуатации инженерных сооружений на мерзлых грунтах в криолитозоне России.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потепление климата, начавшееся в г. Якутске в 1965 г., с ростом среднегодовой температуры приземного воздуха ( $t_w$ ) привело к росту фоновой температуры мерзлых грунтов в нижней части СГТ на глубине 10–15 м ( $t_{10-15}$ ). На этой глубине в зоне установки свайных фундаментов инженерных сооружений на этапе потепления климата в 1976–2011 гг. с темпом роста значений  $t_w$ , равным  $0.077$  °С/год, фоновые значения  $t_{10-15}$  в центральной части г. Якутска и ее окрестности были равны

$-3.0$  и  $-2.3$  °С. В сравнении с фоновыми значениями  $t_{10-15}$ , полученными в 1930–1940 гг. и равными  $-7.0$  и  $3.5$  °С, рост фона температурного поля мерзлых грунтов на глубине 10–15 м составил  $4.0$  и  $1.2$  °С при темпе годового прироста  $0.056$  и  $0.017$  °С/год. Такая разница в центральной части и окрестности Якутска обусловлена неодинаковым влиянием антропогенно-техногенных факторов, регулирующих процесс затенения дневной поверхности городской территории с понижением температуры мерзлых грунтов в нижней части СГТ.

Степень затенения дневной поверхности зависит от обжитости городской территории и степени ее застройки. В хорошо обжитой и плотно застроенной центральной части города с возрастом застройки 271–371 лет (по состоянию на 2011 г.) процесс затенения дневной поверхности действует наиболее сильно, понижая в 28 % случаев фоновую температуру мерзлых грунтов до  $-4.3$  °С. В менее обжитой и неплотно застроенной окрестности центральной части города с возрастом около 100 лет (по состоянию на 2011 г.) действие процесса затенения дневной поверхности ослабевает. В результате появляется тенденция отепления, повышающая в 33 % случаев фоновую температуру мерзлых грунтов до  $-1.2$  °С.

Несмотря на потепление климата, мерзлые грунты в Якутске на глубине 10–15 м с вероятностью 80–85 % имеют температуру  $-1...-6$  °С. Такие температуры вполне достаточны для сохранения механической прочности грунтов, сложенных на глубине установки свайных фундаментов зданий и сооружений нельдистыми незасоленными твердомерзлыми песками.

Ожидаемый в ближайшие годы спад потепления климата в Якутии с переходом в длительную фазу похолодания и благоприятные температурные условия на глубине 10–15 м позволяют надеяться на то, что литогенная основа мерзлых оснований инженерных сооружений г. Якутска сохранит свою механическую прочность в ближайшие несколько десятилетий.

*Низко кланяюсь ушедшему в мир иной управляющему ЯкутГИСИЗ П.Ф. Федорову, благодаря которому удалось собрать обширный фактический материал по термометрии скважин в г. Якутске и на его основе написать эту статью.*

### Литература

**Балобаев В.Т.** Руководство по применению полупроводниковых резисторов для геотермических измерений / В.Т. Балобаев, Б.В. Володько, В.Н. Девяткин и др. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, 48 с.

<sup>13</sup> Точное значение суммарной мощности в 1976–2011 гг. и в настоящее время неизвестно.

**Балобаев В.Т., Скачков Ю.Б., Шендер Н.И.** Прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород Центральной Якутии до 2200 г. // География и природ. ресурсы, 2009, № 2, с. 50–55.

**Белокрылов И.Д.** Многолетнемерзлые породы зоны железорудных и каменноугольных месторождений Южной Якутии / И.Д. Белокрылов, А.Е. Ефимов. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1960, 76 с.

**Вальд А.** Последовательный анализ: Пер. с англ. М., Физматгиз, 1960, 328 с.

**ГОСТ 25100-2011.** Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2013, 38 с.

**ГОСТ 25358-2012.** Грунты. Метод полевого определения температуры. М., Стандартинформ, 2013, 12 с.

**Гриненко В.С., Камалетдинов В.А., Сластенов Ю.Л., Щербаков О.И.** Геологическое строение Большого Якутска // Региональная геология Якутии. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 1995, с. 3–20.

**Конищев В.Н.** Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2009, № 4, с. 10–20.

**Коржуев С.С.** Геоморфология долины средней Лены и прилегающих районов. М., АН СССР, 1959, 151 с.

**Кулаичев А.П.** Методы и средства комплексного анализа данных. М., ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006, 512 с.

**Макаров В.Н., Торговкин Н.В.** Геохимические особенности техногенных отложений в городе Якутске // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 3, с. 27–39.

**Мельников П.И.** Мерзлотно-геологические условия возведения гражданских и промышленных зданий на территории Центральной Якутии и опыт строительства. М., АН СССР, 1951, 136 с.

**Нерадовский Л.Г., Скачков Ю.Б.** Прогноз температуры воздуха в Якутии до 2050 года // Материалы IX Междунар. симпозиума “Проблемы инженерного мерзлотоведения” (Мирный, 3–7 сент. 2011 г.). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2011, с. 389–393.

**Общая теория статистики (альбом наглядных пособий).** М., Стандартинформ, 1974, 72 с.

**Пасхавер И.С.** Закон больших чисел и статистические закономерности. М., Статистика, 1974, 152 с.

**Растегаев И.К.** Свайное фундаментостроение в криолитозоне / И.К. Растегаев, Д.С. Бакшеев, Р.М. Каменский. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 279 с.

**Салтыков Н.И.** О фундаментах зданий г. Якутска // Тр. ИНМЕРО. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1946, т. I, с. 102–136.

**Скачков Ю.Б.** Современные изменения климата Центральной Якутии // Климат и мерзлота: комплексные исследования в Якутии. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2000, с. 55–63.

**Соловьев П.А.** О влиянии застройки города Якутска на температуру многолетнемерзлых горных пород // Тр. Северо-Вост. отд-ния Ин-та мерзлотоведения (вып. 1). Якутск, Якут. респ. тип., 1958, с. 179–191.

**Соловьев П.А.** Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М., АН СССР, 1959, 144 с.

**Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б.** Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на “Якутском разбье” // Геоморфология, 2008, № 1, с. 87–94.

**СП 25.13330.2012.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. М., 2012, 42 с.

**Справочно-информационный портал “Погода и климат”.** – <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959.htm> (дата обращения: 12.02.2020).

**Шимановский С.В.** Влияние покрытий на тепловой режим грунтов // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. Якутск, ИНМЕРО, 1942, вып. 1, с. 44–55.

## References

Balobaev V.T., Volodko B.V., Devyatkin V.N. et al. Rukovodstvo po primeneniyu poluprovodnikovyykh rezistorov dlya geotermicheskikh izmerenii [Guide for Using Semiconductor Thermistors in Geothermal Measurements]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1985, 48 p. (in Russian).

Balobaev V.T., Skachkov Yu.B., Shender N.I. Forecast of climate changes and of the permafrost soil depth for Central Yakutia till 2200. Geografiya i Prirodnye Resursy [Geography and Natural Resources], 2009, No. 2, p. 50–55 (in Russian).

Belokrylov I.D., Efimov A.E. Mnogoletnemerzlye porody zony zhelezorudnykh i kamennoudol'nykh mestorozhdenii Yuzhnoi Yakutii [Permafrost Zone of Iron Ore and Coal Deposits of Southern Yakutia]. Moscow; Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1960, 76 p. (in Russian).

Wald A. Sequential Analysis. Trans. from English. Moscow, Fizmatgiz, 1960, 328 p. (in Russian).

State Standard GOST 25100-2011. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 2013, 38 p. (in Russian).

State Standard GOST 25358-2012. Soils. Field Method of Determining the Temperature. Moscow, Standartinform, 2013, 12 p. (in Russian).

Grinenko V.S., Kamal'dinov V.A., Slastenov Y.L., Shcherbakov O.I. Geological structure of the Bolshoy Yakutsk. In: Regional'naya geologiya Yakutii [Regional Geology of Yakutia]. Yakutsk, Yakutsk State University, 1995, p. 3–20 (in Russian).

Konishchev V.N. Permafrost response on climate warming. Bulletin MGU. Series 5. Geography, 2009, No. 4, p. 10–20 (in Russian).

Korzhuiev S.S. Geomorfologiya doliny srednei Leny i prilegayushchikh raionov [Geomorphology of the Middle Lena Valley and Adjacent Areas]. Moscow, AN SSSR, 1959, 151 p. (in Russian).

Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and Tools for Integrated Data Analysis]. Moscow, FORUM: INFRA-M, 2006, 512 p. (in Russian).

Makarov V.N., Torgovkin N.V. The geochemistry of anthropogenic deposits in Yakutsk. Earth's Cryosphere, 2018, vol. XXII, No. 4, p. 24–35.

Melnikov P.I. Merzlotno-geologicheskie usloviya vozvedeniya grazhdanskikh i promyshlennykh zdaniy na territorii Tsentral'noi Yakutii i opyt stroitel'stva [Permafrost-Geological Conditions and Case Studies of Civil and Industrial Construction in Central Yakutia]. Moscow, AN SSSR, 1951, 136 p. (in Russian).

Neradovskii L.G., Skachkov Yu.B. Prediction of air temperature in Yakutia up to 2050. In: Proc. of IX Intern. Symposium on Permafrost Engineering (Mirny, Sept. 3–7, 2011). Yakutsk, IMZ SO RAN, 2011, p. 389–393 (in Russian).

Obshchaya teoriya statistiki (Al'bom naglyadnykh posobii) [General Theory of Statistics (Album of Visual Aids)]. Moscow, Standartinform, 1974, 72 p. (in Russian).

Paskhaver I.S. Zakon bol'shykh chisel i statisticheskie zakonomernosti [Law of Large Numbers and Statistical Regularities]. Moscow, Statistika, 1974, 152 p. (in Russian).

- Rastegaev I.K., Baksheev D.S., Kamensky R.M. Svainoe fundametostrornie v kriolitozone [Pile Foundation Engineering in Permafrost Areas]. Novosibirsk, Academic Publishing House "Geo", 2009, 279 p. (in Russian).
- Saltykov N.I. Building foundations in Yakutsk. In: Trudy INMERO. Moscow; Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1946, vol. I, p. 102–136 (in Russian).
- Skachkov Y.B. Recent climate change trends in Central Yakutia. In: Climate and Permafrost: Comprehensive Studies in Yakutia. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2000, p. 55–63 (in Russian).
- Soloviev P.A. About the influence of the development of the city of Yakutsk on the temperature of permafrost. In: Trudy Severo-Vost. otddeleniya Instituta Merzlotovedeniya [Proceedings of the North-Eastern Branch of the Permafrost Institute]. Yakutsk, Yakutian Republic Printing House, 1958, vol. 1, p. 179–191 (in Russian).
- Soloviev P.A. Kriolitozona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhurechiya [Permafrost in the Northern Part of the Lena-Amga Watershed]. Moscow, AN SSSR, 1959, 144 p. (in Russian).
- Spektor V.V., Bakulina N.T., Spektor V.B. Relief and age of the alluvial cover in the Lena River Valley at the "Yakutskii Razboi". Geomorfologiya [Geomorphology], 2008, No. 1, p. 87–94 (in Russian).
- Building Code SP 25.13330.2012. Bases and Foundations on Permafrost Soils. Updated version of BC 2.02.04-88. Moscow, 2012, 42 p. (in Russian).
- Spravочно-Informatsionnyi Portal "Pogoda i Klimat" [Weather and Climate Data portal]. – <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959.htm> (last visited: 12.02.2020).
- Shimanovskij S.V. Effect of pavements on the ground thermal regime. In: Issledovanie vechnoi merzlotu v Yakutskoi Respublike [Permafrost Investigations in the Yakut Republic]. Yakutsk, 1942, vol. 1, p. 44–55 (in Russian).

*Поступила в редакцию 18 октября 2019 г.,  
после доработки – 25 февраля 2020 г.,  
принята к публикации 26 марта 2020 г.*