

В.Н. Копылов, А.Б. Шерстюков

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ РОССИИ

Создана база данных о температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см по всей территории России, включая зону многолетней мерзлоты, для мониторинга несущей способности фундаментов зданий и технических сооружений в условиях потепления климата. Разработаны алгоритмы контроля качества исходных данных о температуре почвогрунтов на глубинах. Создана технология расчета глубины сезонного протаивания почвогрунтов на глубинах до 320 см. Разработано программное обеспечение расчета, позволяющее получать прогностические оценки глубины сезонного протаивания почвогрунтов.

Алгоритм, база данных, программное обеспечение, технология расчета, данные о температуре почвы, многолетняя мерзлота, глубина протаивания, фундаменты зданий.

Введение

Потепление климата, которое наблюдается несколько последних десятилетий, с одной стороны, создает благоприятные условия для промышленного освоения новых территорий, с другой — сопровождается негативными последствиями: увеличением глубины сезонного протаивания мерзлых почвогрунтов и ослаблением несущей способности фундаментов сооружений, построенных на мерзлоте.

Промышленные и жилые здания, нефтяные вышки, трубопроводы, дороги, опоры мостов, взлетно-посадочные полосы, построенные на многолетней мерзлоте, рассчитаны на эксплуатацию в определенном диапазоне изменения температуры. Непредвиденное потепление, увеличение сезонного протаивания и деградация мерзлоты приводят к ослаблению несущей способности свайных фундаментов, оснований и опор [1, 4, 16], повреждению объектов инфраструктуры [1, 4, 8]. Климатогенные разрушения инфраструктуры могут иметь опасные, в том числе катастрофические, последствия [1, 6]. В результате повышения температуры многолетнемерзлых пород большинство сооружений, построенных на мерзлых почвогрунтах, деформируются [15]. Оттаивание мерзлых пород сопровождается просадками земной поверхности. В опасной зоне многолетней мерзлоты России находится множество инженерных сооружений нефтегазового комплекса [6].

В условиях меняющегося климата возникает необходимость более глубокого исследования термических процессов в почвогрунтах на глубинах заложения фундаментов [12]. Исходной информацией для исследования и расчетов может служить массив данных ежедневных наблюдений за температурой почвогрунтов на глубинах до 320 см, проводимых на метеорологических станциях России. В ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» создана база данных таких наблюдений, начинающихся с 1963 г. [3, 18]. База данных позволяет проводить расчеты состояния многолетнемерзлых пород по запросам потребителей, а также получать оценки текущих и будущих изменений температурного и прочностного состояния почвогрунтов, которые могут быть полезны при проектно-строительных работах, в том числе в районах добычи полезных ископаемых.

Далее приведены основные характеристики базы данных, алгоритмы контроля, технология создания, а также примеры практического применения мас-

сива данных ежедневных наблюдений за температурой почвогрунтов на глубинах до 320 см.

Технология создания массива данных наблюдений за температурой почвогрунтов на глубинах до 320 см

Гидрометеорологической службой России за более чем столетний период наблюдений собран большой массив данных о температуре почвогрунтов. Старейшие метеорологические станции на территории страны были организованы еще в XVIII в., но измерения температуры почвогрунтов долгое время в программу наблюдений не входили. Сегодня наблюдения за температурой почвогрунтов на глубинах выполняются на ограниченном числе метеорологических станций [3]. До недавнего времени серьезной проблемой была доступность массивов таких наблюдений и возможность их анализа при помощи вычислительных средств.

Созданный массив данных о температуре почвогрунтов на глубинах в некоторой степени снимает эти проблемы. Появилась возможность оценить изменение пространственного положения характерных изотерм в почвогрунтах за последние годы, рассчитать тренды температур в почвогрунтах, вычислить изменения глубины сезонного протаивания и т.д. Сведения о температуре почвогрунтов более точно отражают одно из условий существования мерзлоты на глубинах, чем сведения о температуре воздуха, которые более доступны. С использованием массива можно изучать корреляцию между этими температурами и оценивать, как температура воздуха влияет на температуру почвогрунтов.

В массиве содержатся данные о температуре почвы под естественным покровом на глубинах 2, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 120, 160, 240, 320 см по 458 станциям международного обмена на территории РФ. На рис. 1 показана сеть станций, по которым созданы массивы данных о температуре почвогрунтов.

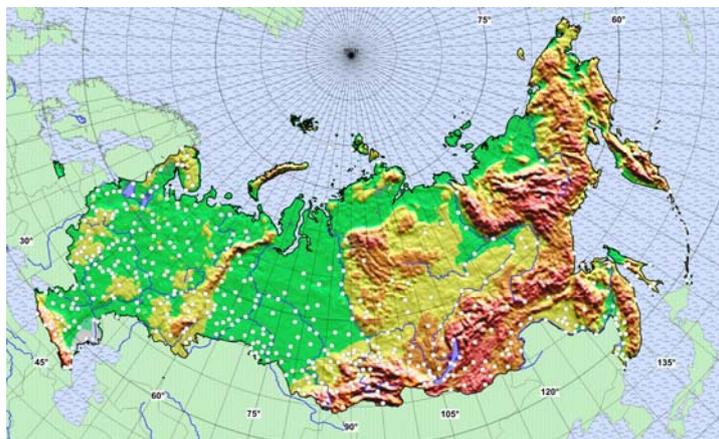


Рис. 1. Сеть метеорологических станций международного обмена по температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см на территории РФ

Массив создавался на основе данных наблюдений под естественным покровом по вытяжным термометрам. Технология создания первичного массива данных в электронном виде не предусматривала выявления случайных ошибок в данных, которые неизбежно появляются по разным причинам, связанным как с ручной обработкой данных на некоторых этапах (за период до 1977 г.), так и с техническими сбоями и возможными технологическими нарушениями при перезаписи данных на новые технические носители и при переходе от одной техно-

логии к другой. Технологии кардинально изменялись в 1977 и в 1984 гг., дополнительные менее существенные изменения вносились и в последующие годы.

Контроль данных является неотъемлемой частью процесса создания массивов на технических носителях. Существует несколько примеров решения этой проблемы [3, 12], отличающихся глубиной проработки и спецификой применения к конкретным данным.

Сбор данных о температуре почвогрунтов за все годы наблюдений выполнен впервые, ряды суточных данных за весь период наблюдений ранее не контролировались. Предварительный визуальный анализ первичных данных показал наличие ошибок разного рода и происхождения. Прежде всего, обнаружались случайные значения, выходящие за допустимые пределы возможных значений. Выявлены случаи нарушения плавности межсуточных изменений температуры. Статистическое выявление таких ошибок может быть построено на основе сравнения каждого отдельного значения температуры с предельными значениями межгодовых изменений температуры на фиксированной глубине и в фиксированный день года, а также на основе предельных значений межсуточных изменений температуры по соседним суткам. При разработке алгоритмов контроля по предельным значениям главной задачей является определение пределов, позволяющих отсеять ошибочные значения и не забраковать реальные экстремальные значения.

Для контроля предложена совокупность из четырех алгоритмов.

Как известно, статистические методы дают более точные (хорошо трактуемые, понятные) результаты, если применять их к непрерывному последовательному ряду значений (идеальный случай). На практике же последовательный ряд наблюдений имеет пропуски значений, т.е. некоторые данные отсутствуют. Особенностью первичного массива данных о температуре почвогрунтов является большое количество пропусков в данных. Вследствие этого при выполнении контроля приходилось прибегать к некоторым ограничениям применимости того или иного алгоритма контроля или к ограничениям на выполнение каких-либо внутренних расчетов внутри алгоритма. Это делалось, чтобы избежать некорректного контроля, в случаях, если недостаточно данных для выполнения конкретного алгоритма контроля. Эти ограничения часто приводили к тому, что те или иные значения оставались не проконтролированы каким-то из алгоритмов. Во всех таких случаях в массиве ставились пометки в виде флагов (признак качества) рядом с каждым значением, указывающие на это обстоятельство.

Далее описаны общие идеи каждого из четырех алгоритмов, которые использовались при создании проконтролированного массива суточных данных о температуре почвогрунтов.

Алгоритм 1. «Применение гистограмм»

Алгоритм предназначен для обнаружения грубых ошибок, выходящих за допустимые пределы правильных экстремальных значений. Он основан на анализе гистограмм распределения температуры по градациям. Гистограмма отражает повторяемость температуры по отдельным градациям температуры. Повторяемость — это число случаев с температурой в градации, деленное на общее число членов ряда. При достаточном количестве данных гистограмма должна быть гладкой на краях, а ее значения на краях слева и справа должны плавно переходить в нули.

Общая идея алгоритма заключается в определении граничных минимальной и максимальной градаций безошибочных значений температуры с целью последующего отсека значений, которые существенно выходят за пределы

этих граничных значений. Предполагается, что ошибочные значения превышают экстремальные правильные значения на величину более чем одна градация. Такие ошибочные значения должны выходить за пределы правильных значений температуры и отделяться от основных градациями с нулевой повторяемостью в левой и правой частях гистограммы. Значения считаются ошибочными, если на краях гистограммы они попадают в градации, следующие после градации с нулевой повторяемостью.

Примечание: алгоритм применяется на каждой станции и на каждой глубине отдельно.

Алгоритм 2. «Проверка на сигмы»

Идея алгоритма заключается в том, что при отсутствии ошибок в исходных данных среднеквадратическое отклонение (σ) всех исходных данных температуры характеризует наиболее вероятные пределы отклонений исходных данных от среднего значения (нормы). В связи с этим алгоритм 2 применяется после алгоритма 1, к данным, которые признаны корректными по алгоритму 1,— это позволяет снизить влияние грубых ошибок на вычисление среднеквадратического отклонения (σ). В интервале $\pm 4\sigma$ (количество сигм подобрано эмпирически) от среднего значения находятся практически все правильные исходные данные (в предположении, что температура имеет нормальное распределение).

Алгоритм 3. «Проверка на связанность соседних по времени значений»

Значения температуры в соседние дни не могут сильно отличаться друг от друга из-за инерционности изменения температуры почвогрунтов. Это свойство используется для выявления скачкообразных ошибок, при анализе последовательных дней.

Идея алгоритма заключается в том, чтобы проверить каждое суточное значение температуры на допустимые пределы отклонений от линейного изменения температуры между предыдущим и последующим днем. Для проверки каждого суточного значения температуры вычисляется соответствующее ему интерполированное значение температуры между предыдущим и последующим днем. Так, например, для проверки температуры 2 января вычисляется интерполированное значение t_i на этот день по данным за первое T_{i-1} и третье января T_{i+1} .

$$t_i = (T_{i+1} - T_{i-1})/2,$$

где i — номер дня года; T_{i+1} — температура в последующий день; T_{i-1} — температура в предшествующий день; t_i — интерполированная температура на проверяемый день.

Вычисленное t_i и фактическое T_i значения на 2 января могут отличаться в некоторых пределах. Необходимо определить допустимые пределы величины $\Delta T_i = T_i - t_i$, при которых T_i можно признать правильным значением. Допустимые пределы определяются по анализу среднеквадратического отклонения $\sigma_o(i)$ значений ΔT_i на проверяемый день за все годы. Если ΔT_i выходит за установленные пределы $\pm 4\sigma_o(i)$, то соответствующее проверяемое значение температуры признается некорректным (в нашем примере некорректным признается исходное значение на 2 января).

Алгоритм 3 применяется после алгоритма 1, к данным, которые признаны корректными по алгоритму 1. Это позволяет снизить влияние грубых ошибок на вычисление среднеквадратического отклонения ($\sigma_o(i)$). Интервал $\pm 4\sigma_o$ подобран эмпирически.

Алгоритм 4. «Проверка соседних значений на ошибку обратного знака»

Является дополнительным к первым трем алгоритмам. Это очень простой алгоритм контроля, призванный найти единичные ошибки «в знаке» значения.

В исходном массиве очень редко встречаются такие ошибки, когда в ряду положительных температур вдруг попадает такое же по величине число, но с обратным знаком.

Алгоритм 4 применяется, как и алгоритм 1, к исходному массиву, в отличие от алгоритмов 2 и 3, которые применяются к массиву, проконтролированному алгоритмом 1. В каждом трех последовательных значениях температуры проверяется соответствие знака второго значения знаку первого и третьего значения температуры. Если знак второго значения отличается, то выполнятся сравнение значений, чтобы определить, переход это через 0 °С (т.е. корректное значение) или же это появление одиночного резкого выброса (т.е. ошибки). Конечно, возможно появление неверного знака и в других различных сочетаниях (например, два последовательных числа с неверным знаком подряд и т.д.) — такие ситуации этот алгоритм не учитывает, но они редки.

Последовательное применение четырех алгоритмов позволяет выявить существенную часть ошибок. В процессе проведения контроля визуальный графический анализ выборочных выявленных ошибок показал, что совокупность предложенных четырех алгоритмов в большинстве случаев позволила правильно идентифицировать ошибочные значения. Вместе с тем некоторого рода ошибки остались не зафиксированы ни одним из четырех алгоритмов. К таким незафиксированным ошибкам относится последовательность явно ошибочных одинаковых в течение нескольких месяцев значений, укладывающихся в предельные значения. Но подобные ошибки единичны, происхождение их не выяснено.

В целом предложенные алгоритмы показали хорошую чувствительность к ошибкам разного происхождения. Они универсальны по применимости к другим временным рядам, обладающим определенной инерционностью межгодовых и межсуточных изменений. Однако для каждого метеорологического ряда необходима своя настройка критериев, которые зависят как от длины ряда, так и от характера исследуемых физических величин.

Технология подготовки данных и их обработки представляет собой комплекс программ, последовательно выполняющих контроль исходных данных, исследование их полноты на разных глубинах, выделение территории с многолетней мерзлотой и вычисление глубины сезонного протаивания на метеорологических станциях в зоне многолетней мерзлоты.

Для реализации предложенных алгоритмов контроля качества исходных данных использовалось авторское программное обеспечение, созданное в среде программирования Delphi. Для каждого алгоритма создан соответствующий программный модуль, который позволяет настраивать те или иные параметры алгоритма для получения оптимального результата по каждому алгоритму, а также объединять и обобщать результаты работы отдельных модулей контроля в единое целое — конечный результат применения всех алгоритмов контроля качества данных.

Разработаны методика и программное обеспечение, которые позволяют определять глубину сезонного протаивания почвогрунтов на основе проконтролированного массива суточных значений температуры почвы на глубинах до 320 см.

Дополнительно отдельным блоком реализована технология получения региональных прогностических оценок изменения глубины сезонного протаивания на период до 2–3 десятилетий. Прогностическая часть технологии работает на основе выделения и экстраполяции многолетних скрытых ритмов климатической системы.

Таким образом, совокупность данных по температуре почвогрунтов, накопленных в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», методик работы с этими данными, а также информационных технологий и программного обеспечения по контролю качества позволили получить уникальную базу данных наблюдений с непрерывными данными о температуре почвогрунтов по всем станциям Росгидромета, на которых проводятся такие наблюдения.

На основе базы данных можно проводить исследования как научного, так и прикладного характера, получать оценки текущих и будущих изменений температурного и прочностного состояния почвогрунтов.

Далее приведены результаты использования данного массива для мониторинга состояния почвогрунтов в зоне многолетней мерзлоты России, а также изменения глубины протаивания почвогрунтов и их последствий.

Изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на глубинах в последние десятилетия

Главной характеристикой термического состояния мерзлоты является среднегодовая температура почвогрунтов, а ее многолетние изменения могут служить характеристикой изменений состояния мерзлоты. Многолетнее изменение термического состояния почвогрунтов оценивалось величиной линейного тренда среднегодовой температуры за 1965–2006 гг. в пересчете на 10 лет ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). Далее представлено краткое описание результатов для глубин 80, 160, 320 см.

На глубине 80 см положительные тренды температуры почвогрунтов охватывают всю территорию России. Повышенные значения трендов $0,2$ – $0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет наблюдаются на севере европейской территории России, в Сибири и на Дальнем Востоке. Статистически достоверные положительные тренды охватывают всю южную половину Сибири (южнее 62° с.ш.) и долины рек Лены и Вилюя. В этих районах преобладают тренды $0,3$ – $0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет.

На глубине 160 см также по всей России преобладают положительные тренды, но область повышенных значений ($> 0,2$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет) сужается по долготе и охватывает в основном только территорию Сибири от Урала до р. Лены. Статистически достоверное потепление ($> 0,3$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет) также наблюдается в южной половине Сибири и на реках Лене и Вилюе.

На глубине 320 см (рис. 2), как и в вышележащих слоях, тренды преимущественно положительные, область повышенных значений ($> 0,2$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет) еще более сужается. Значимые величины трендов $> 0,3$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет наблюдаются в основном на группе станций в среднем течении Оби и Иртыша и вблизи меридианов 100 – 105° с.ш., а также на Вилюе.

Из сопоставления результатов для глубин 80, 160, 320 см (карта приведена только для глубины 320 см) можно сделать вывод, что потепление климата проникает в почвогрунты с ослаблением по глубине. Наибольшие и значимые потепления почвогрунтов, проникающие до нижней анализируемой глубины 320 см, наблюдаются в центральной и южной частях Сибири от Оби до Лены. Самое существенное потепление на глубине 320 см со значимыми трендами от $0,4$ до $0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет наблюдается в районе Ангары и на Вилюе.

В указанном обширном районе южной половины Сибири расположены почти все крупные сибирские промышленные центры и проживает большая часть населения Сибири. В южной части этого же района состояние многолетнемерзлых почвогрунтов наименее устойчиво и поэтому, возможно, более чувствительно к потеплению климата. Потепление создает предпосылки для протаивания верхних многолетнемерзлых почвогрунтов, а также для негативных последствий в инфраструктуре и хозяйственной деятельности человека. Деградация мерзлоты является серьезной экологической проблемой Сибири.

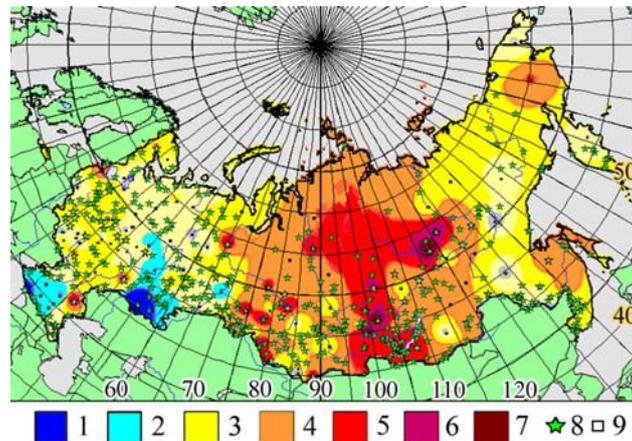


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 320 см за 1965–2006 гг.:
 1 — $-0,3 \leq k < -0,1$; 2 — $-0,1 \leq k < 0$; 3 — $0 < k \leq 0,1$; 4 — $0,1 < k \leq 0,2$; 5 — $0,2 < k \leq 0,3$;
 6 — $0,3 < k \leq 0,4$; 7 — $0,4 < k \leq 0,6$; 8 — станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$;
 9 — станции с незначимым трендом

Проблема устойчивости зданий и сооружений, построенных на многолетней мерзлоте в меняющемся климате

Одной из обострившихся в последние годы проблем является деструктивное воздействие климатически обусловленной деградации многолетней мерзлоты на инфраструктуру территорий [1, 4, 8]. Изменения параметров природной среды, выходящие за рамки расчетного диапазона, могут вызвать повреждение объектов инфраструктуры, их частичное или полное разрушение, что может иметь опасные, в том числе катастрофические, последствия [1, 6].

В Якутске за период с начала 1970-х гг. более 300 зданий получили серьезные повреждения в результате просадок мерзлых почвогрунтов. Статистика свидетельствует, что в период с 1990 по 1999 г. в Норильске число зданий, получивших различного рода повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось [1]. При этом причины таких повреждений различны: это и современные изменения климата, и различные антропогенные воздействия, вызывающие ускоренный износ фундаментов.

Более 75 % всех зданий и сооружений в зоне многолетней мерзлоты построено и эксплуатируется по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований [4]. Согласно этому принципу [14], многолетнемерзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения. Однако этот принцип строительства не учитывает современные изменения климата, которые оказывают влияние на многолетнемерзлые почвогрунты.

В последнее десятилетие деструктивное воздействие увеличения глубины сезонного протаивания поверхностного слоя почвогрунтов на сооружения в области распространения многолетней мерзлоты усилилось [1].

Расчет изменения глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов как характеристики возможной неустойчивости фундаментов зданий и сооружений

Наиболее изучаемой и достаточно востребованной для практических целей характеристикой в регионах, занимаемых многолетней мерзлотой, явля-

ется глубина сезонного протаивания [7, 9]. Глубина, до которой заметны сезонные изменения температуры, определяет глубины сезонного протаивания почвогрунтов в зоне мерзлоты и промерзания почвогрунтов на остальной территории. Глубины сезонного промерзания и протаивания являются важнейшими характеристиками при строительстве фундаментов всех сооружений. Особое значение глубина сезонного протаивания приобретает в зоне мерзлоты со специфическими особенностями почвогрунтов, зависящими от климата. Поэтому очень важно определить изменения в годовом ходе температуры почвогрунтов на разных глубинах, произошедшие за последние десятилетия интенсивных изменений климата.

Данные мониторинга глубин сезонного протаивания неоднократно анализировались [5, 10, 11, 13], особенно подробный анализ выполнен для регионов Западной Сибири. Результаты этого анализа убедительно показывают, что с конца XX в. в Западной Сибири происходит повышение температуры многолетнемерзлых почвогрунтов и наблюдается слабое увеличение глубин сезонного протаивания [9].

Глубина летнего протаивания определяет выбор глубины заложения фундаментов сооружений и некоторые их конструктивные особенности. Причиной возникновения значительных деформаций сооружений в условиях многолетнемерзлых почвогрунтов является также неравномерное и значительное по величине морозное пучение верхних слоев почвогрунтов и выпучивание фундаментов при промерзании окружающих их почвогрунтов [17]. Однако здесь рассматривается только влияние сезонного протаивания, которое, по данным [2], представляет собой наиболее существенный отрицательный фактор. Просадки почвогрунтов являются главной причиной недопустимых деформаций сооружений, возводимых на многолетнемерзлых почвогрунтах [17].

Известно, что процесс сезонного протаивания происходит исключительно в теплый сезон [13] (на глубинах теплый сезон наступает с запаздыванием относительно самых теплых месяцев по температуре воздуха), поэтому при изучении глубины протаивания важными являются оценки трендов температуры почвогрунтов в теплые месяцы. Для обнаружения изменений температуры почвогрунтов на глубинах в теплые месяцы года по современным данным (за период с 1965 по 2005 г.) выполнен анализ трендов температуры почвогрунтов на глубинах 80, 160 и 320 см. Учитывая запаздывание по глубинам наступления максимума и минимума годового хода температуры почвогрунтов, анализ летних температурных состояний проводился по данным со сдвигом. Величина сдвига определялась на каждой станции по положению максимума осредненного годового хода температуры на анализируемой глубине. Для этого осредненный годовой ход температуры почвогрунтов вычислялся за 1965–2005 гг. Далее по каждой станции строились ряды температуры почвогрунтов средней за три самых теплых месяца (теплый сезон). Ряды строились по данным на каждой глубине — 80, 160 и 320 см по сезонам, границы которых определялись на каждой глубине тремя самыми теплыми месяцами. По этим рядам температур теплого сезона на указанных глубинах по каждой станции вычислялись значения линейных трендов за период 1965–2005 гг. По полученным значениям построены карты пространственного распределения коэффициентов линейного тренда температуры почвогрунтов теплого сезона. Оценка достоверности трендов проводилась на основе критерия Стьюдента. Ниже описано пространственное распределение трендов, которое в основных очагах подтверждается достоверными трендами с вероятностью 95 %.

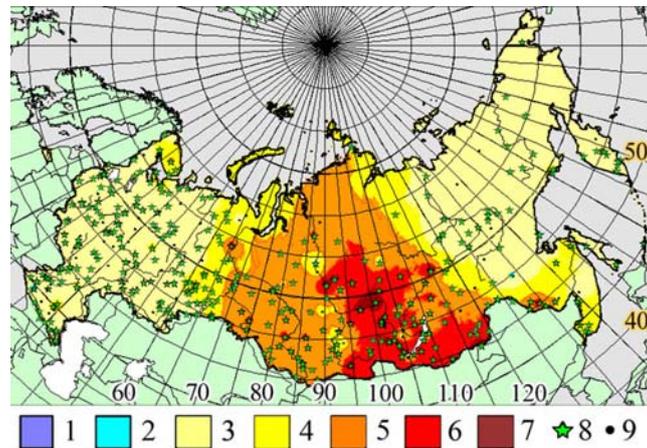


Рис. 3. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда температуры почвогрунтов ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) за период 1965–2005 гг. на глубине 320 см. Теплый сезон:
 1 — $-0,2 \leq k < -0,1$; 2 — $-0,1 \leq k < 0$; 3 — $0 < k \leq 0,1$; 4 — $0,1 < k \leq 0,3$; 5 — $0,3 < k \leq 0,4$; 6 — $0,4 < k \leq 0,5$;
 7 — $0,5 < k \leq 0,6$; 8 — станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 9 — станции с незначимым трендом

В теплые месяцы года тренды температуры почвогрунтов на глубинах 80–320 см являются преимущественно положительными и статистически достоверными. Наибольшее потепление почвогрунтов в теплый сезон наблюдается в Сибири и составляет $0,4\text{--}0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет. На глубине 80 и 160 см тренды температуры почвогрунтов $0,5\text{--}0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет встречаются на станциях в южной половине Сибири и в Средней Сибири, а на глубине 320 см (рис. 3) тренды с большими значениями ($0,5\text{--}0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет) встречаются только на станциях южной части Восточной Сибири, в районе Ангары, Предбайкалья и Забайкалья.

Таким образом, имеются благоприятные условия для увеличения глубины сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты при сложившихся тенденциях изменения климата.

Глубина сезонного протаивания почвогрунтов вычислялась по данным наблюдений за температурой почвогрунтов на фиксированных глубинах до 320 см путем сглаженной логарифмической интерполяции. Максимальное за год протаивание определялось по максимальным за год значениям температуры почвогрунтов на глубинах. Интерполяция выполнялась по средним многолетним вертикальным профилям максимальных значений температуры почвогрунтов. В теплый сезон температура в верхнем слое положительная и убывает с увеличением глубины, достигая на некоторой глубине нулевого значения. Глубина, на которой сглаженный вертикальный профиль максимальной температуры принимает нулевое значение, фиксируется как глубина протаивания.

Логарифмическая аппроксимация является наилучшим приближением вертикальных профилей температуры и более плавно показывает понижение температуры с увеличением глубины. Глубины сезонного протаивания вычислялись для двух периодов лет. Сопоставление вертикальных профилей температуры для двух выборок лет позволяет определить современное изменение глубины сезонного протаивания почвогрунтов, связанное с изменением климата. Для примера на рис. 4 и 5 показаны аппроксимации вертикальных профилей максимальных температур почвогрунтов для двух регионов Сибири, уязвимых с точки зрения увеличения глубины сезонного протаивания.

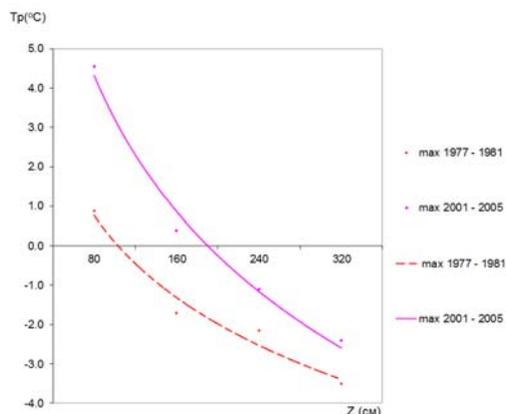


Рис. 4. Изменение сезонного протаивания почвогрунтов. Максимальные (max) значения в годовом ходе температуры на глубинах (Z) по средним данным для 1977–1981 и 2001–2005 гг. Норильск

В Норильске (Красноярский край) глубина сезонного протаивания увеличилась за период 2001–2005 гг. по сравнению с периодом 1977–1981 гг. примерно на 80 см (рис. 4), что способствует возрастанию числа случаев просадок фундаментов. Увеличение количества зданий в Норильске, получивших различного рода повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов за рассматриваемый период, отмечено в [1].

В Верхоянске (Саха — Якутия) изменения глубины сезонного протаивания не так ярко выражены, как в Жиганске, но тем не менее глубина сезонного протаивания увеличилась приблизительно на 40 см (рис. 5). Такое увеличение также способствует значительному уменьшению устойчивости зданий и сооружений, построенных ранее. Особенностью изменений экстремумов на станции Верхоянск является понижение минимальных за год температур и повышение максимальных, что показывает увеличение амплитуды годового хода температуры почвогрунтов на всех глубинах до 320 см.

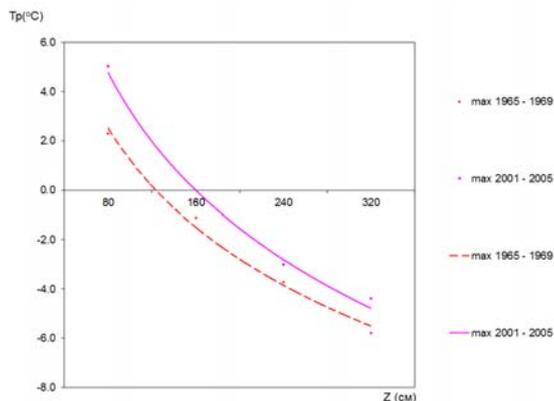


Рис. 5. Изменение сезонного протаивания почвогрунтов. Максимальные (max) значения в годовом ходе температуры на глубинах (Z) по средним данным для 1965–1969 и 2001–2005 гг. Верхоянск

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что последствиями современных изменений климата является общая тенденция увеличения глубины сезонного протаивания почвогрунтов на огромной территории России. Климатообусловленное увеличение глубины протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов в основаниях зданий и сооружений создает деформации фундаментов и надфундаментных строений. Противоположную тенденцию на отдельных станциях можно рассматривать как исключение из общей закономерности, связанное с некоторыми региональными особенностями.

Заключение

Современное потепление климата сопровождается повышением среднегодовой температуры почвогрунтов и ведет к изменению состояния многолетней мерзлоты, при этом актуальной проблемой является увеличение глубины сезонного протаивания почвогрунтов. Анализ многолетних изменений температуры почвогрунтов на глубинах до 320 см показал, что в условиях потепления климата сложились благоприятные условия для увеличения глубины сезонного протаивания почвогрунтов в зоне многолетней мерзлоты, особенно в ее южной части. Увеличение глубины сезонного протаивания ведет к нарушению устойчивости зданий и технических сооружений, построенных на многолетнемерзлых почвогрунтах, осложняя устойчивое развитие регионов.

Для исследования несущей способности фундаментов зданий и технических сооружений в условиях потепления климата создана база данных о температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см по всей территории России, включая зону многолетней мерзлоты.

Разработаны алгоритмы контроля качества исходных данных о температуре почвогрунтов на глубинах и технология создания проконтролированного массива.

Создана технология расчета глубины сезонного протаивания почвогрунтов на основе проконтролированного массива суточных значений температуры почвы на глубинах до 320 см. Разработано программное обеспечение расчета, позволяющее получать прогностические оценки глубины сезонного протаивания почвогрунтов.

Представлены результаты использования созданной базы данных о температуре почвогрунтов для мониторинга состояния и изменения глубины протаивания почвогрунтов в зоне многолетней мерзлоты России.

Данные регулярных наблюдений на метеорологических станциях за температурой почвогрунтов являются информационной основой мониторинга устойчивости зданий и технических сооружений в зоне многолетней мерзлоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анисимов О.А., Белолицкая М.А.* Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. 2006. № 6. С. 15–22.
2. *Белин П.Н., Гребенец В.И., Керимов А.Г. и др.* Зданиям в Заполярье нужны подвалы // Химия и жизнь — XXI век. 2006 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www.informnauka.ru/rus/2006/2006-05-26-06_168_r.htm.
3. *Быховец С.С., Сороковиков В.А., Мартуганов Р.А. и др.* История наблюдений за температурой почвы на сети метеорологических станций // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 1. С. 7–20.
4. *Гребенец В.И.* Негативные последствия деградации мерзлоты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2007. № 3. С. 18–21.

5. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России // Метеорология и гидрология. 1999. № 1. С. 18–26.
6. Клименко В.В., Хрусталева Л.Н., Микушина О.В. и др. Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 3. С. 3–13.
7. Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Угаров И.С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли. 2006. Т. X, № 3. С. 15–22.
8. Котляков В.М., Агранат Г.А. Российский Север — край больших возможностей // Вестн. РАН. 1999. Т. 69, № 1. С. 3–15.
9. Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д. и др. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 1. С. 29–36.
10. Павлов А.В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: Наблюдения и прогноз // Изв. РАН. Сер. геогр. 2003. № 6. С. 42–50.
11. Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С. и др. Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на Севере России // Криосфера Земли. 2002. Т. VI, № 4. С. 30–39.
12. Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России: Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск: Гео, 2005. 54 с.
13. Павлов А.В., Скачков Ю.Б., Какунов Н.Б. Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII, № 4. С. 3–11.
14. СНиП II-18-76. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Стройиздат, 1977. 48 с.
15. Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В., Кауркин В.Д. Усовершенствование методики прогноза ожидаемых мерзлотно-климатических изменений на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2003. Т. VII, № 2. С. 23–29.
16. Хрусталева Л.Н., Давыдова И.В. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 2. С. 68–75.
17. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. шк., 1973. 448 с.
18. Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 1. С. 79–87.

V.N. Kopylov, A.B. Sherstyukov

The monitoring information support regarding stability of buildings and constructions in the permafrost zone of Russia

Subject to creation being a data base on the temperature of soils at the depths up to 320 cm throughout territory of Russia, including the permafrost zone, for monitoring a bearing capacity of foundations of buildings and technical constructions under the global warming. They developed algorithms of quality control of the initial data about the temperature of soils at the depths, creating technology to calculate the depth of a seasonal melt at the depths up to 320 cm. Subject to development being computation software, allowing to obtain prognostic assessments regarding the depth of the soils' seasonal melt.

Algorithm, data base, software, calculation technology, data on soil temperature, permafrost, melting depth, foundations of buildings.