

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОПОЛНЕННЫХ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНОГО НЕФТЕПРОВОДА

Владова А.Ю.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д. 65
Avladova@ipu.ru*

Владов Ю.Р.

*Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Россия, г. Оренбург, ул. Набережная д. 29
urvladov@rambler.ru*

Аннотация: Глобальное потепление и местные антропогенное влияние снижают несущую способность многолетнемерзлых грунтов, вызывая изменения пространственного положения трубопроводов и увеличивая количество аварий. Предлагаемый подход к статистическому анализу температур отличается от известных подходов тем, что мы преобразуем имеющийся 4D-массив в 2D-вид без потери информации; добавляем новые признаки, подчеркивающие сезонность и состояние мерзлоты; дополняем данные за счет прогнозирования временных рядов, и, наконец, повторно анализируем температурные интервалы мерзлоты.

Ключевые слова: Временные ряды, эконометрика, геотехническая система мониторинга.

Введение

Строительство и эксплуатация подземных трубопроводов, пролегающих в многолетней мерзлоте, приводит к таянию и снижению несущей способности мерзлого грунта. Незначительные колебания температуры грунтов в диапазоне 2–5 °С способствуют значительным изменениям пространственного положения трубопроводов. Геотехнические системы мониторинга контролируют температурный режим для выявления опасных процессов. Длительное время эксплуатации увеличивает количество вдольтрассовых экзогенных процессов, заставляет эксплуатирующие компании устанавливать дополнительные термоскважины и способствует накоплению большого количества данных, которые трудно проанализировать классическими статистическими методами. Имеющаяся система геотехнического мониторинга включает группы датчиков, установленных в 13 термометрических скважинах вдоль трассы трубопровода. Температурные данные собраны в течение года и представляет собой суточные измерения температуры грунтов в светлое время суток на глубинах до 15 м [1].

Цель этого исследования состоит в том, чтобы предложить быстрый и наглядный подход к обнаружению и прогнозированию потерь тепла подземного нефтепровода. Подход, доступный для специалистов, которые не имеют опыта прогнозирования.

1 Состояние вопроса

На изменение температуры грунтов вокруг нефтепровода влияют сезонные колебания и техногенные воздействия. Гармонический анализ позволил аппроксимировать динамику изменений суммой синусоид с убывающими амплитудой и периодом колебаний [2]. При выборе прогнозной модели проверено, содержат ли исследуемые временные ряды тренд, сезонность, выбросы, непостоянные дисперсии и другие нестационарности [3]. В результате прогноз реализован на основе модели Хольта — Винтерса [4] и трехкомпонентной модели Prophet [5].

2 Постановка задачи

Случайная природа тепловых процессов, происходящих в грунте, вмещающем подземный нефтепровод, требует использования статистических методов обработки данных мониторинга. Поэтому поставлена задача по имеющимся данным, собранным за 11 месяцев года, провести прогнозирование температуры мерзлых грунтов вдоль трассы нефтепровода на один месяц вперед и статистически оценить состояние грунта. Предлагаемый алгоритм решения задачи приведен на рисунке 1.

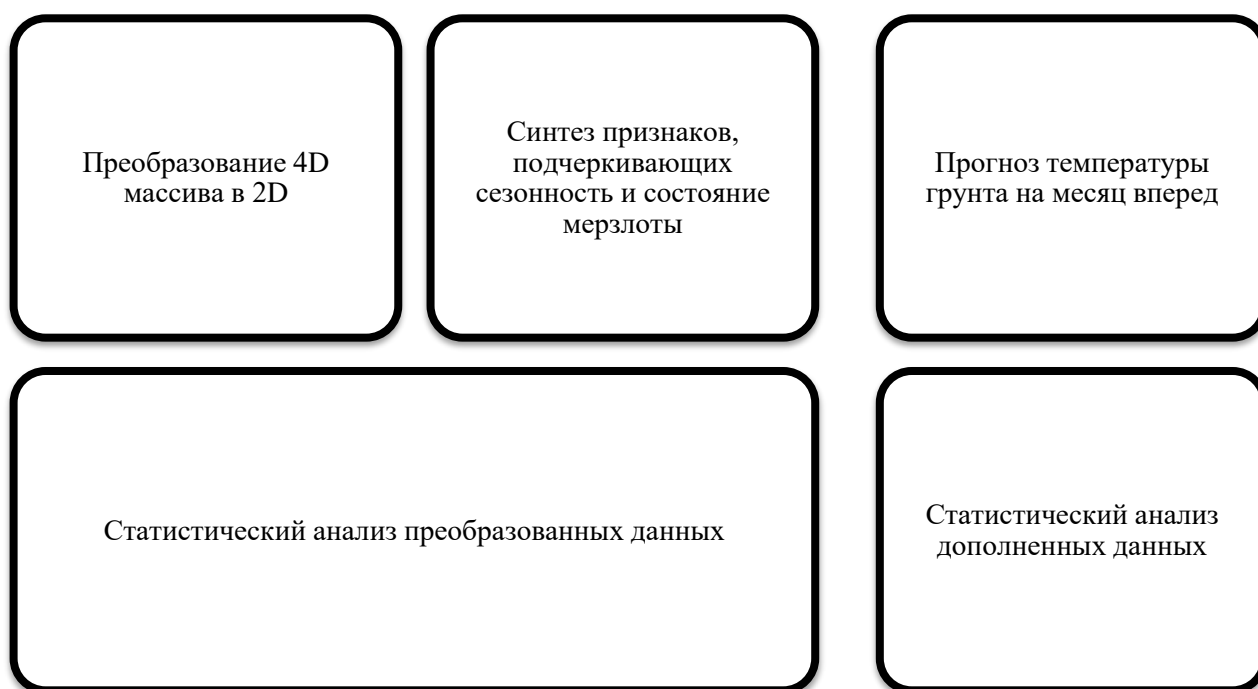


Рис. 1. Алгоритм решения задачи

На первом шаге исходный массив сырых данных преобразован к формату, удобному для обработки; на втором шаге синтезированы дополнительные признаки, подчеркивающие сезонность и состояние мерзлоты, а также суточное время измерения; на третьем шаге проведен статистический анализ температурных измерений грунтов каждой термометрической скважины. Результатом четвертого шага является прогнозная модель температур вдольтрассовых грунтов. На заключительном этапе проводят статистическую оценку состояния грунтов с учетом спрогнозированных данных.

3 Преобразование 4D массива в 2D

Исходные измерения температур представлены в виде 4D-массива со следующими размерностями:

- номера троек термометрических скважин, с установленными гирляндами датчиков температуры;
- расстояние от трубопровода (2, 4, или 10 м) каждой из тройки термометрических скважин;
- глубина (0 - 15 м) установки датчиков температуры на гирлянде;
- суточное время фиксации температуры.

Исходные данные распределены по 51 признаку. В исходном наборе данных (таблица 1) суточные измерения температуры, собранные геотехнической системой мониторинга, естественным образом группируются вокруг даты измерения и числа троек гильз (групп из трех гильз). Это представление данных содержит четыре измерения для каждого данного: местоположение, расстояние от трубы, глубину и время. Это представление называется «широкоформатным» и удобно при использовании в электронных таблицах, таких как Excel.

Таблица 1. Широкий формат исходных данных

Время измерения	№ тройки термоскважин	Температура в 1-й скважине, °С			Температура в 3-й скважине, °С		
		h1.1	...	h1.18	h3.1	...	h3.15
2021-09-28 13:07:00	40.0	8.05		0.06	...	6.47	-0.23

При анализе значительного объема данных широкий формат не удобен для обработки. Поэтому исходный набор преобразуется в «длинный формат», где два столбца работают как идентификаторы (Время измерения и № тройки термоскважин), а остальные столбцы (расстояние от трубы, глубина датчика и температура) обрабатываются как значения (таблица 2).

Таблица 2. Длинный формат исходных данных

Время измерения	№ тройки термоскважин	Расстояние.Глубина	Температура, °С
2021-09-28 13:07:00	40.0	h1.1	8.05
2021-09-28 13:07:00	40.0	h1.18	0.06

4 Синтез признаков, подчеркивающих сезонность и состояние мерзлоты

Для вычисления однородных данных создан мультииндекс, включающий расположение термометрической скважины, расстояние от трубы и глубину датчика:

MultiIndex: 816 entries, (19, 'h1.1', Timestamp('2020-11-30 00:00:00')) to (44, 'h2.7', Timestamp('2021-10-31 00:00:00'))

Рисунок 2 сравнивает температуры грунтов вдоль трассы трубопровода, измеренные тройками термоскважин. Температурные интервалы выбираются на основе классификации мерзлоты (высокая температура $(-2; -0,5]$ °С; высокая температура с преобладающим интервалом $(-0,5; 1,5]$ °С; стабильный температурный интервал $(-3; -2]$ °С; низкая температура с преобладанием интервала $(-5; -3]$ °С; низкотемпературная $(-\infty; -5]$ °С). Интервальное распределение температур на разных глубинах получено с середины ноября предыдущего года по середину октября следующего года. Чтобы обострить разницу температур мерзлоты, сгенерированы дополнительные категориальные признаки, основанные на этих пяти интервалах температур.

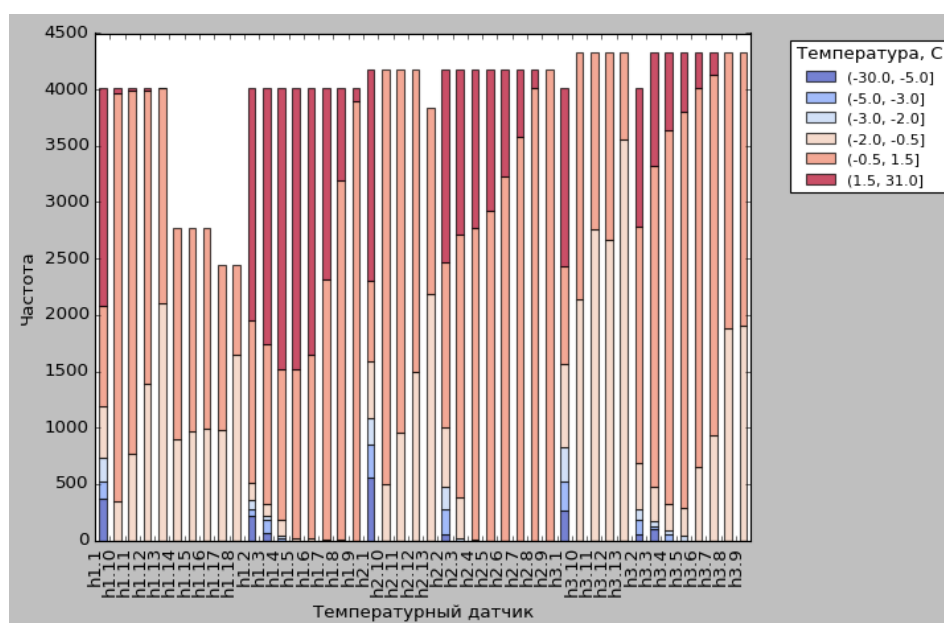


Рис. 2. Интервальное распределение температур

Сравнительный анализ показывает (рис. 3), что грунты находятся в высокотемпературных условиях с преобладанием интервалов $(-2; -0,5]$ °С, $(-0,5; 1,5]$ °С, $(1,5; 31]$ °С.

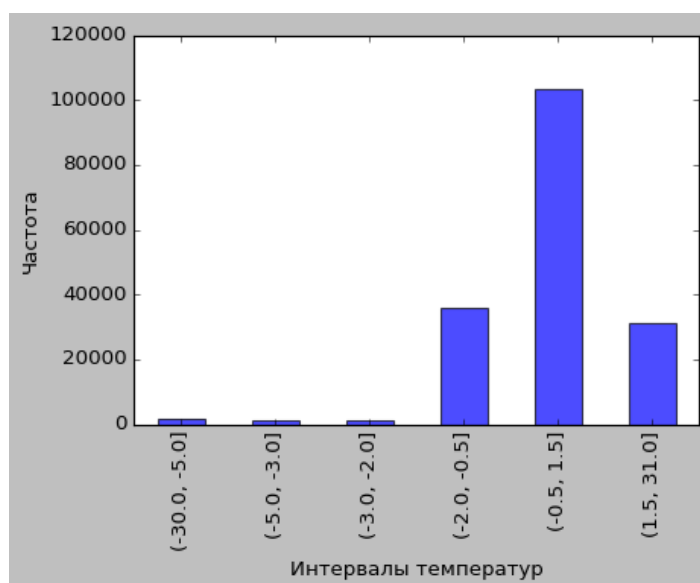


Рис. 3. Анализ температурных интервалов

Рисунок 4 представляет два из шести распределений температур внутри выбранных температурных интервалов.

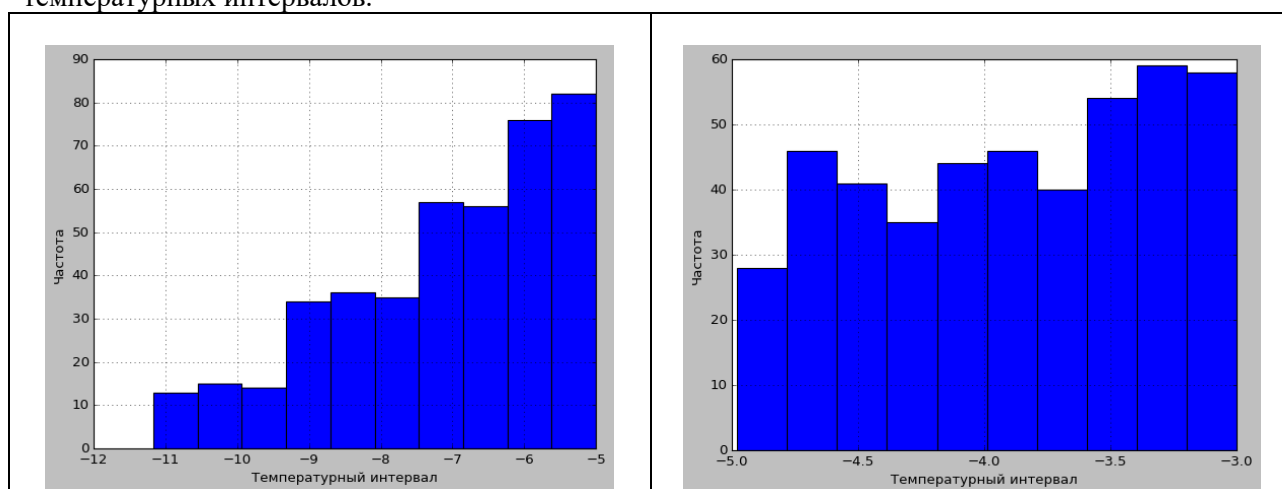


Рис. 4. Распределения температур внутри интервалов

Анализ плотности измерений температуры в разных слоях грунтов определяет переход от двухвершинного распределения (поверхностные температуры) к одновершинному распределению (глубинные температуры) со сдвигом математического ожидания в сторону отрицательных температур и значительным уменьшением стандартного отклонения (рис. 5). Дальнейшее увеличение глубины измерения приводит к мультивершинному распределению. Наиболее значимые значения эксцесса находятся на глубине от 3 до 4 м для среднеудаленных от трубы термоскважин (рис. 5а) и от 2 до 3 м для дальних термоскважин (рис. 5б).

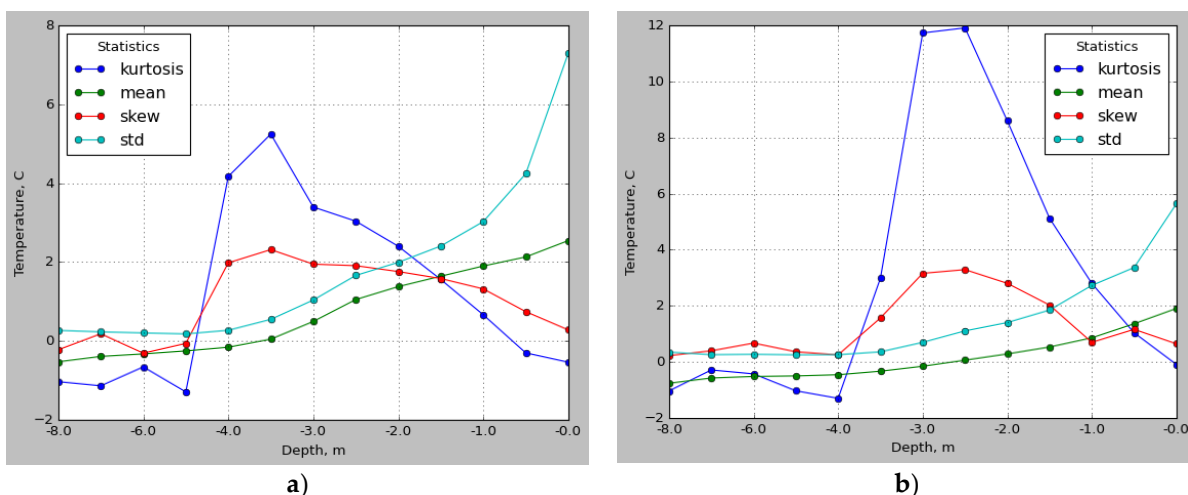


Рис. 5. Изменение параметров распределения температур на различных глубинах: а) на расстоянии 4 м от трубопровода (среднеудаленные термоскважины); б) на расстоянии 10 м от трубопровода (дальние термоскважины).

При этом математическое ожидание от слоя к слою варьируется в меньшей степени. Таким образом, подтверждается нестационарность процесса переноса теплоты в грунтах на разных глубинах [6].

6 Прогноз температуры

Поскольку в данных не представлены температуры за холодный период года, начиная с середины октября по середину ноября, предложено их спрогнозировать. Прогноз температуры выполнен для каждого временного ряда с помощью модели Хольта-Винтера, учитывающей тренд и сезонность. Параметры тренд и сезонность определены декомпозицией временных рядов. Рисунок 6 представляет декомпозицию исходного временного ряда (observed) на глубине 5 м контрольной термоскважины на три составляющие: тренд (trend), сезонность (seasonal) и остаток (residual).

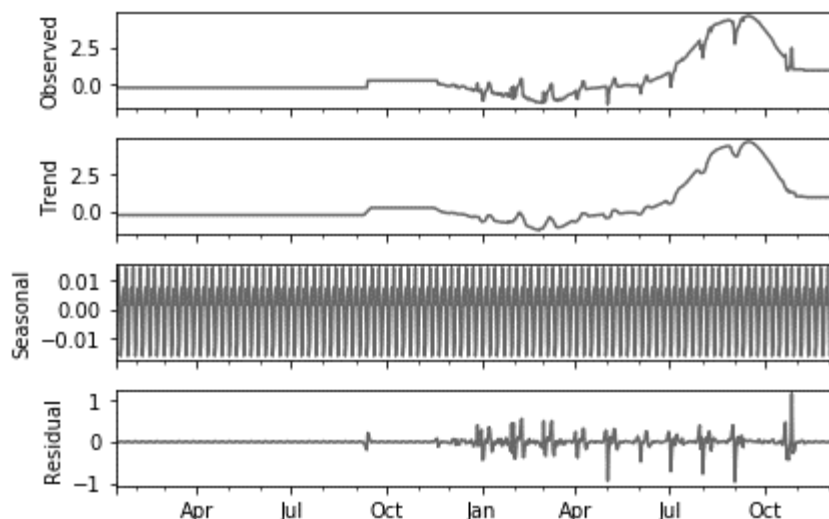


Рис.6. Декомпозиция временного ряда

У температур большинства слоев грунта исходного набора данных трендовый компонент изменяется нелинейно и имеет мультипликативный характер. Амплитуда сезонных колебаний постоянна и имеет аддитивное поведение. Остаток меняется с течением времени, поэтому носит мультипликативный характер.

7 Статистический анализ дополненных данных

Статистический анализ дополненных данных проведен на рис. 7.

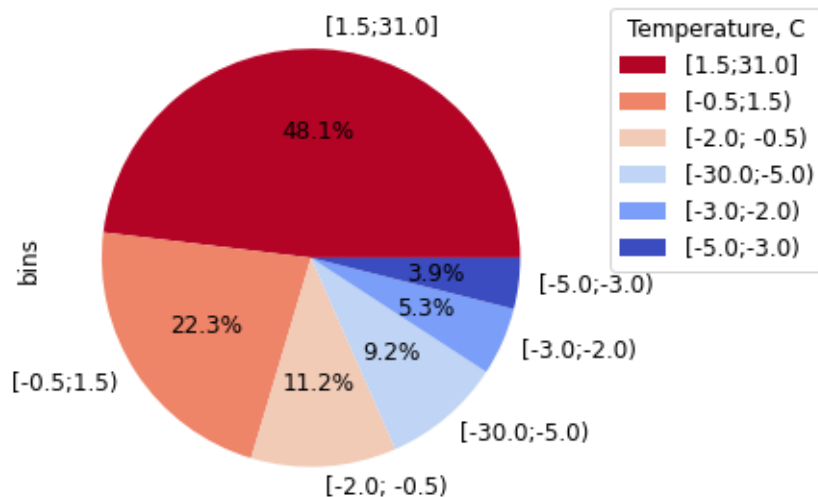


Рис.7. Анализ дополненных данных

Поскольку прогнозировались температуры середины октября-середины ноября, добавился как блок отрицательных близких к поверхности температур так и блок слабоположительных глубинных температур.

Заключение

Подготовлен набор данных по температурным измерениям вдольтрассовых грунтов; размечены данные, синтезированы дополнительные признаки временных рядов, проведено прогнозирование температур, проведен статистический анализ дополненных данных.

Литература

1. Голофаст С.Л., Владова А.Ю. Влияние температурного поля трассы магистрального нефтепровода на прочностную надежность линейных участков // Безопасность труда в промышленности. 2019, № 11. – С. 24–33.
2. Владова А.Ю. Гармонический анализ температур мерзлого грунта полосы отведения линейного объекта // Безопасность труда в промышленности. 2017, № 7. – С. 25–30.
3. Владова А.Ю. Ретроспективный анализ температурного режима грунтов в информационно-измерительной системе // Безопасность труда в промышленности. 2016, № 12. – С. 46–53.
4. Владова А.Ю., Владов Ю.Р. Прогноз температуры грунта трассы линейного протяженного объекта // Безопасность труда в промышленности. 2020, № 6. – С. 14–20.
5. Vladova A.Yu. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline // Mathematics. Vol. 10. 2022, № 11.
6. Владов Ю.Р., Владова А.Ю., Нестеренко Ю.М., Нестеренко М.Ю., Владов М.Ю. Способ мониторинга температурных аномалий в многолетнемерзлом грунте трассы линейного объекта // Пат. RU 2669602 С1, 12.10.2018. Заявка № 2017126860 от 25.07.2017.