

УДК 551.341:551.343.7

ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ГОРИЗОНТАМИ ПОЧВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГЛУБИННЫХ СКВАЖИН

Ботыгин Игорь Александрович¹,
bia@tpu.ru

Крутиков Владимир Алексеевич²,
sherstneva@tpu.ru

Шерстнева Анна Игоревна¹,
sherstneva@tpu.ru

Демешко Мария Владимировна¹,
demeshkomaria@gmail.com

Канаева Ирина Александровна¹,
irk-2009@yandex.ru

Солтаганов Николай Андреевич¹,
nasoltaganov@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634055, г. Томск, Академический пр., 10/3.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения геологических объектов путем прямых геофизических измерений их параметров и применения полученных данных и результатов математической обработки для решения задач рационального природопользования. Эффективное решение этих задач особенно важно при исследовании влияния метеорологических параметров на водно-тепловой режим горных пород в районах с глубоким сезонным промерзанием.

Цель: разработать и провести испытания геофизического комплекса для определения пространственного распределения температуры в грунте, динамики изменения этого распределения во времени и корреляционные соотношения его промерзания на различных горизонтах в условиях Сибири и Крайнего Севера.

Объекты: федеральная автомобильная дорога «Сургут–Салехард» в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа и дорога территориального значения «Коротчаево–Уренгой».

Методы: методы анализа статистических данных для изучения взаимосвязей между значениями переменных, включая исследование статистической взаимосвязи двух или более случайных величин (корреляционный анализ), методы функционального анализа для исследования статистических данных в частотно-временном диапазоне (вейвлет-преобразование).

Результаты. Показано, что с увеличением глубины грунта, график значений температур промерзания принимает более плоский характер и с увеличением удаленности между горизонтами наблюдений уменьшается температурная корреляционная связь между ними. В частности, в слоях грунта 1,9–2,1 м значения коэффициентов температурной корреляции практически не изменяются на всех временных масштабах выборки. В слоях грунта 0,9–1,2 м, 1,2–1,5 м, 1,5–1,8 м на средних временных масштабах выборки наблюдается незначительное изменение коэффициентов температурной корреляции, а максимальное отклонение коэффициентов корреляции наблюдается на больших временных масштабах выборки. В слоях грунта 0,3–2,1 м, 0,3–1,8 м, 0,6–2,1 м на средних временных масштабах выборки наблюдается значительное отклонение коэффициентов температурной корреляции, а максимальное отклонение коэффициентов температурной корреляции также наблюдается на больших масштабах выборки. На базе полученных температурных рядов были построены спектрограммы вейвлет-преобразований для классических базисных вейвлетов (вейвлет Морле, DOG-вейвлет, вейвлет Пауля), косвенно демонстрирующие волнообразное «продвижение» фронта (фазы) холода в грунте.

Ключевые слова:

Геологическая среда, корреляционный анализ, рациональное природопользование, вейвлет-преобразование, метод малоглубинных скважин, геофизическое исследование, термический режим горных пород,

Введение

Актуальность исследования геофизических пространственных данных очень важна в практической геологии и, особенно, в инженерном геофизическом исследовании для прогноза и мониторинга состояния геологической среды изучаемой территории. Одним из способов получения таких знаний является применение геостатистических методов, базирующихся на обширной номенклатуре аппаратно-программных

средств при проведении инженерно-геодезических и инженерно-геологических работ. Наблюдения при геофизическом исследовании различных участков таких объектов позволяют получить не только знания о структуре геологического разреза, но и определить физические характеристики грунта, необходимые при проектировании инженерных сооружений.

Стоит отметить, что решением Правительства Российской Федерации «специализированное

прогнозно-минералогическое, геолого-геофизическое и геолого-геохимическое изучение приоритетных территорий для создания поискового задела» объявлено одним из важнейших направлений региональных и тематических геологических исследований в период до 2035 г., а также что первичная и интерпретированная геологическая информация, полученная при выполнении полевых работ, является одним из важнейших компонентов в едином фонде геологической информации о недрах [1].

Одним из важных подходов исследования пород является изучение их водно-теплового режима как определяющего фактора, особенно для многих почвенно-климатических явлений [2–4]. Здесь необходимо отметить, что именно российские ученые еще в конце XIX – начале XX вв. заложили основы современной концепции «почвенного климата», объясняющей глобальную эколого-климатообразующую роль почвенного покрова. Даже беглый взгляд на интернет-версии исторических музеев основных российских университетов позволяет однозначно в этом убедиться. Это и В.В. Докучаев, обосновавший научный подход к почвоведению и географии почв и открывший основные закономерности генезиса и распространения почв. Это и П.А. Костычев, создавший и развивший школу агрономического почвоведения. Это и Н.М. Сибирцев, предложивший генетическую классификацию почв. Это и М.М. Филатов, сформировавший основы физико-технического представления о грунтах и выдвинувший оригинальную теорию микроструктуры грунтов, и многие другие отечественные ученые.

В отечественных публикациях, связанных с исследованиями температурных режимов почв, обсуждаются различные аспекты их функционирования. Оцениваются изменения температурного режима среднетаежных подзолистых почв [5]. Обсуждаются температурные режимы сезоннопромерзающих почв тундровых ландшафтов [6]. В [7] приведены исследования температурного режима почв северной тайги Западной Сибири, в [8] – Европейской Субарктики (северной окраины Европейского субконтинента), а в [9] рассматривается термический режим почвы пяти хвойных сообществ подзоны средней тайги. Характеристика динамики температуры лугово-черноземной солонцеватой почвы аласной котловины в Центральной Якутии приведена в [10]. Исследуется влияние температуры на минерализацию и гумификацию лесного опада [11]. В [12] исследован температурный режим торфяной почвы в мохово-травяной экосистеме Бакчарского болотного массива, расположенного в южнотаежной зоне Западной Сибири. Результаты изучения температурного прогрева лесных почв в зоне Черноморского побережья Кавказа приведены в [13]. В работе [14] исследуется влияние климата на режимы и свойства почв Прикаспийской равнины и черноземов центрально-европейских и южных регионов России. Исчерпывающее исследование температурного режима комплексного почвенного покрова на полевом материале приведено в монографии [15].

Обширные научные исследования, связанные с различными аспектами влияния температурно-влажностного режима на почву, проводятся и за рубежом. Так, в [16] приведены результаты шестилетних исследований, показывающие, что сезонный температурный градиент в тибетских альпийских экосистемах выше, чем во многих аналогичных экосистемах, и в среднем по Земле. И это необходимо учитывать в моделях ключевых экосистемных процессов, которые выделяют углерод из почвы в виде двуокси углерода.

Исследования, обобщающие трехлетний период наземных наблюдений в Северной Америке [17], выявили нелинейные отношения во времени температуры воздуха и температуры почвы. В частности, приземные температуры воздуха показали большую изменчивость, чем температуры почвы верхнего слоя.

В [18] исследуется влияние температуры на растворение карбоната (солей угольной кислоты) в почвенно-грунтовых системах. Показано, что годовая температура поверхности и содержание воды в почве являются ключевыми параметрами для оценки воспроизведения в почве концентрации углекислого газа.

Исследование изменения температуры почвы на разных глубинах при добавлении постороннего органического вещества (древесного угля из бамбука и рисовой соломы) приведено в [19]. Отмечено демпфирующее действие органических веществ на изменение температуры почвы во времени (уменьшены различия между дневными и ночными температурами), что положительно повлияло на урожайность риса.

В работе [20] определялись и оценивались факторы, контролирующие температурную чувствительность органического вещества почвы в бореальных лесах. Показано, что метаболические способности почвенных микробных сообществ и содержание питательных веществ в почве являются определяющими для температурного изменения таежных почв.

Влияние температуры и корневых добавок на почвенную углеродную и азотную минерализацию, преимущественно в вечномерзлых торфяниках Северо-Восточного Китая, исследовано в [21]. Отмечено, что потепление истощает содержание углерода и стимулирует разложение сложных углеродосодержащих компонентов в органической части торфяников.

В [22] исследован температурный отклик минерализации почвенными органическими веществами в восьми арктических почвенных профилях Норвегии и России. Температурный отклик исследовали по двум параметрам, полученным из простой экспоненциальной модели, – интенсивность минерализации и температурный коэффициент (Q_{10}).

Влияние вулканической тefры и валунов на температуру почвы приведено в [23]. В [24] исследовалась взаимосвязь между температурой почвы

и содержанием почвенной воды на склоне. Мониторинг содержания почвенной воды имеет решающее значение для прогнозирования катастрофических сбоев на склоне. Температура почвы и объемное содержание воды на склоне были измерены во время контролируемых экспериментов с осадками. Показано, что для многих участков отбора проб после начала осадения вместе с объемным содержанием воды повышалась и температура почвы.

В [25] исследовалось влияние температурно-влажностного режима на тепловые свойства ветровых (эоловых) отложений в Южной Африке. Фиксировались такие показатели, как объемная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент диффузии. Выделены три комбинации температуры и содержания влаги, оказывающие значительное влияние на тепловые свойства. Это смачивание сухой почвы с повышением температуры, эффект замораживания и оттаивания, чрезмерное смачивание почв с повышением температуры.

Исследование пространственного распределения температуры почвы, почвенной воды и корней растений в капельно-орошаемом поле с использованием пластиковой мульчи рассмотрено в [26]. Приведены результаты трех полевых экспериментов с различными режимами ирригационной обработки. А в [27] приведены результаты трехлетнего полевого эксперимента по сравнительному исследованию этих же параметров почвы с применением биоразлагаемой пленки для мульчирования. Доказывается эффективность подхода при выращивании озимого рапса.

В статье [28] описано исследование изменения температуры замороженного грунта, вызванного ослаблением связей между льдом и частицами почвы из-за повышения температуры при динамической нагрузке. На базе экспериментов на установке для тестирования динамического напряжения (Split-Hopkinson pressure bar) получены кривые напряжения-деформации мерзлого грунта в разных условиях динамического нагружения.

Работа [29] посвящена применению метода микроградиентного грунтового разреза для расчета потоков энергии атмосферы и почвы в городских районах и пространственного изменения температуры поверхностного слоя грунта, прилегающего к сооружениям и зданиям.

Теоретико-модельное исследование связи основных метеорологических параметров с температурой почвы на разных глубинах приведено в [30]. Для прогнозирования температуры использовались искусственные нейронные сети, вейвлет-нейронные сети и генетические алгоритмы. Оценка эффективности этих подходов осуществлялась с использованием коэффициентов корреляции, средней абсолютной ошибки, среднеквадратичной ошибки и информационного критерия Акаике. Кроме того, для оценки сходства наблюдаемых и прогнозируемых значений температур почвы использовались диаграммы Тейлора. Результаты мо-

дельных исследований влияния температуры на гидравлические свойства грунта с учетом теплового эффекта от поверхностных свойств водных растворов (воды) и характеристик частиц почвы приведены и в [31]. Численное же определение вертикального потока воды на основе температурных профилей почвы описывается в [32]. Использованы две числовые модели, базирующиеся на уравнении конвекции теплопроводности, для расчета распределения температуры в почве и ее изменения во времени.

И завершим обзор ссылкой на перспективный подход применения локальных распределенных измерительных датчиков на базе волоконно-оптических систем (DTS) для измерений параметров грунта [33]. В первой части указанного исследования представлена концепция и принципы комбинационного рассеяния света (эффект Рамана), на которых базируются DTS-системы, компоненты системы DTS, методы измерений, калибровка, интерпретация данных, оценка точности метода DTS для почвоведения. Вторая часть посвящена обсуждению применения DTS-систем для измерения температуры почвы, ее тепловых свойств и влажности. В третьей части рассматриваются ограничения и перспективы применения DTS-систем для дальнейших исследований.

Приведенный выше краткий обзор еще раз подтверждает, что протекание всех почвенно-грунтовых процессов в значительной мере определяется изменением их водно-температурных режимов. В частности, очень актуальна задача исследования температурно-влажностного режима в грунте земляного полотна автомобильных трасс, проложенных в природно-климатических зонах Сибири [34]. Необходимо отметить, исследование геокриологических условий грунта – сложная научная задача, связанная с исследованием химико-минералогических, химико-гранулометрических, а также структурно-текстурных особенностей состава компонентов грунта. При этом очень важно получить и количественные оценки влажностного и температурного состояния грунта, необходимые для построения модели передачи тепла в грунте. Для правильного учета транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных трасс очень важны и данные пространственного распределения температуры в грунте, и динамика изменения этого распределения во времени.

Схема экспериментальных наблюдений

В настоящей работе приведены результаты исследования динамики изменения температуры земляного полотна на федеральной автомобильной дороге «Сургут–Салехард» в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа и на дороге территориального значения «Коротчаево–Уренгой». Осуществлялось вертикальное температурное профилирование с использованием метода малоглубинного скважирования. Исследовалось изменение хода температуры на разных горизонтах и в раз-

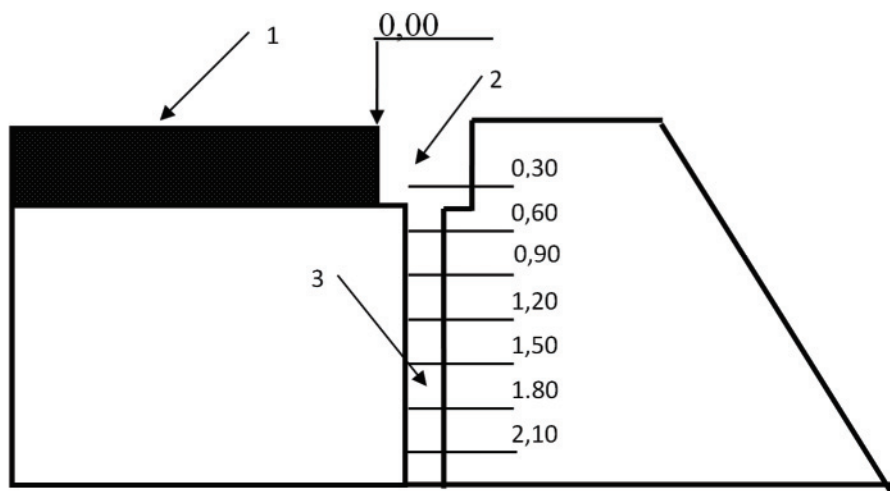


Рис. 1. Схема малоглубинной скважины (1 – дорожная одежда; 2 – шурф; 3 – скважина)

Fig. 1. Scheme of the shallow well (1 is the pavement, 2 is the pier, 3 is the well)

ных пунктах наблюдений экспериментального участка. Наблюдения проводились на 10 постах в период с 15 октября 2006 г. по 24 января 2007 г. Количество датчиков в гирлянде – 7. Расстояние между температурными датчиками в гирлянде – 30 см. В поперечном сечении земляного полотна гирлянды были размещены вертикально у кромки проезжей части. Первый датчик устанавливался на глубине 30 см, последний – на глубине 210 см (рис. 1). Каждый датчик обладал полной энергонезависимостью (до двух лет), имел цифро-

вой термометр для регистрации температуры с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и внутреннюю память для сохранения измерений. Замеры производились каждые 4 часа.

Для работы с действительными значениями температур осуществлялась интерпретация данных из dat-файлов датчиков, а также преобразование значений, записанных во внутреннем формате датчиков, в действительные значения температур в соответствии с их технической документацией. Для использования в расчетах и визуализации

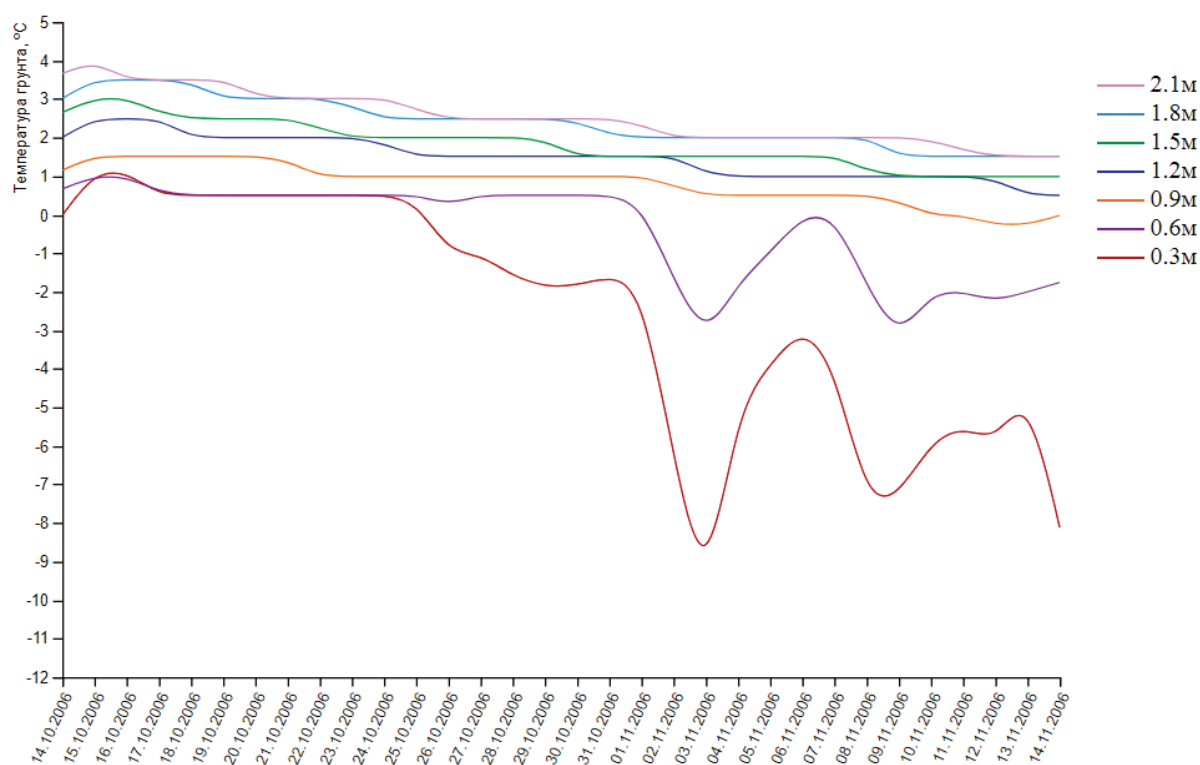


Рис. 2. Фрагмент значений среднемесячных температур грунта

Fig. 2. Fragment of mean monthly temperatures of the soil

данные, сохраненные датчиками в различные промежутки времени, собирались в общий массив и рассчитывались среднесуточные температуры горизонтов грунта.

Ниже приведен фрагмент вычисленных температур (среднесуточных) для одного из постов за 1 месяц наблюдений в графическом формате (рис. 2).

Визуализация метеорологических данных

Для визуализации таких метеорологических данных удобно использовать обычные двумерные графики, показывающие зависимость исследуемого параметра от времени, но может возникнуть следующая проблема: одна элементарная единица отображения (например, пиксель) может содержать в себе несколько точек графика. В таком случае важно сохранить смысловую нагрузку графика и не потерять ключевые значения в результате визуализации. Для этого могут быть использованы различные алгоритмы прореживания данных.

Наиболее простым способом прореживания является отображение каждой n -ой точки (число n будем называть шагом прореживания). Очевидно, что чем больше число n , тем меньше точек будет

содержать результат визуализации. Преимуществом такого подхода является простота реализации, а основным недостатком – возможность потери информативных выбросов. Результат применения такого подхода приведен на рис. 3.

В некоторых случаях бывает удобнее работать с аппроксимированным графиком. На рис. 4 представлен результат визуализации с использованием сплайнов Катмулла–Рома и В-сплайнов.

Визуализация данных позволила наглядно проследить следующее проявление особенности режима промерзания: температурные выбросы, заметные на показаниях датчиков, расположенных ближе к поверхности, гораздо реже наблюдаются в средних горизонтах и практически незаметны в нижних. Другими словами, подтверждена концепция, утверждающая, что для промерзания нижних горизонтов необходимо продолжительное воздействие низких температур на верхние горизонты. Это утверждение доказывается и прогнозными оценками промерзания грунта на разных горизонтах на следующий месяц после прекращения наблюдений. На рис. 5 приведен пример месячного прогноза для одного из постов наблюдений для горизонта 0,9 м.

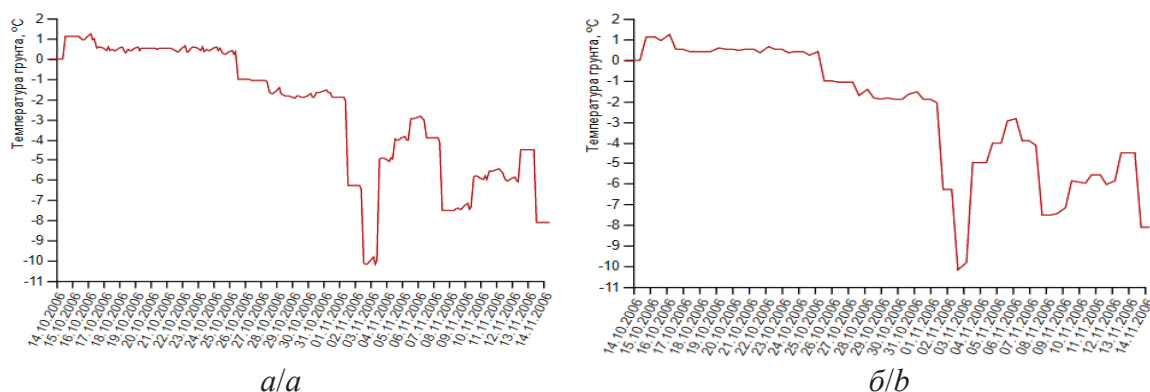


Рис. 3. Графики зависимости температуры грунта от времени на глубине 0,3 м до прореживания (а) и после прореживания с шагом 4 (б)
Fig. 3. Graphs of soil temperature time dependence at depth of 0,3 m before thinning (a) and after thinning in increments of 4 (b)

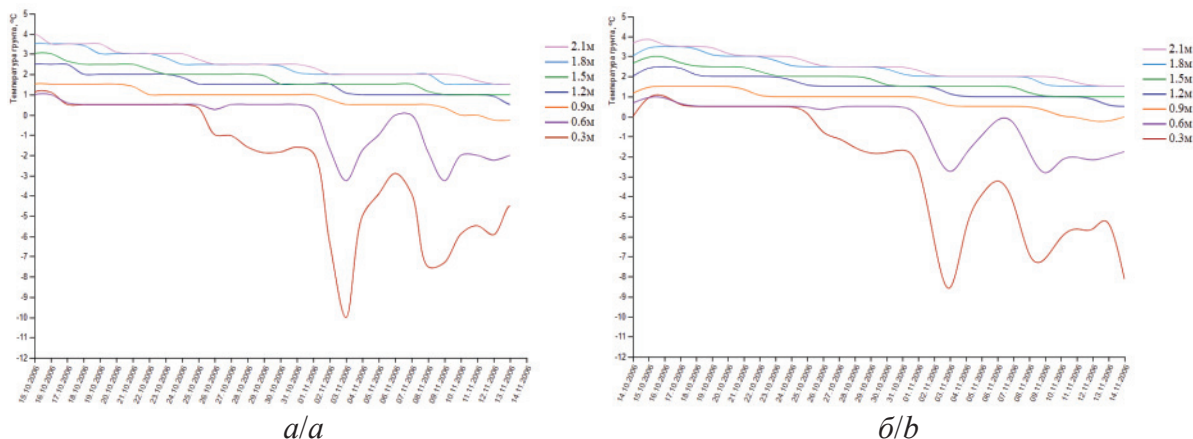


Рис. 4. Температуры грунта на различных глубинах после аппроксимации сплайнами Катмулла–Рома (а) и В-сплайнами (б)
Fig. 4. Soil temperatures at different depths after approximation by Katmull–Rom splines (a) and B-splines (b)

Прогноз был выполнен с использованием библиотеки fbprophet 0.2.1 (Facebook Open Source) [35]. Ось X – время наблюдений, ось Y – необработанные данные с датчика. Использована процедура прогнозирования данных временных рядов на основе аддитивной модели, где нелинейные тренды соответствуют годовой и недельной сезонности. Из-за недостатка данных можно говорить только о качественном характере как прогнозной оценки, так и о ее верхней и нижней границе (рис. 6).

Анализ корреляционных полей температурного состояния грунта

При обработке больших рядов экспериментальных данных для многих целей статистического анализа очень эффективными бывают приближенные оценки измеряемых величин на основе корреляционных соотношений и связей [36–39]. Корреляционные модели и соотношения могут обеспечить приемлемую для практики точность оценки экспериментальных измерений. В таких моделях

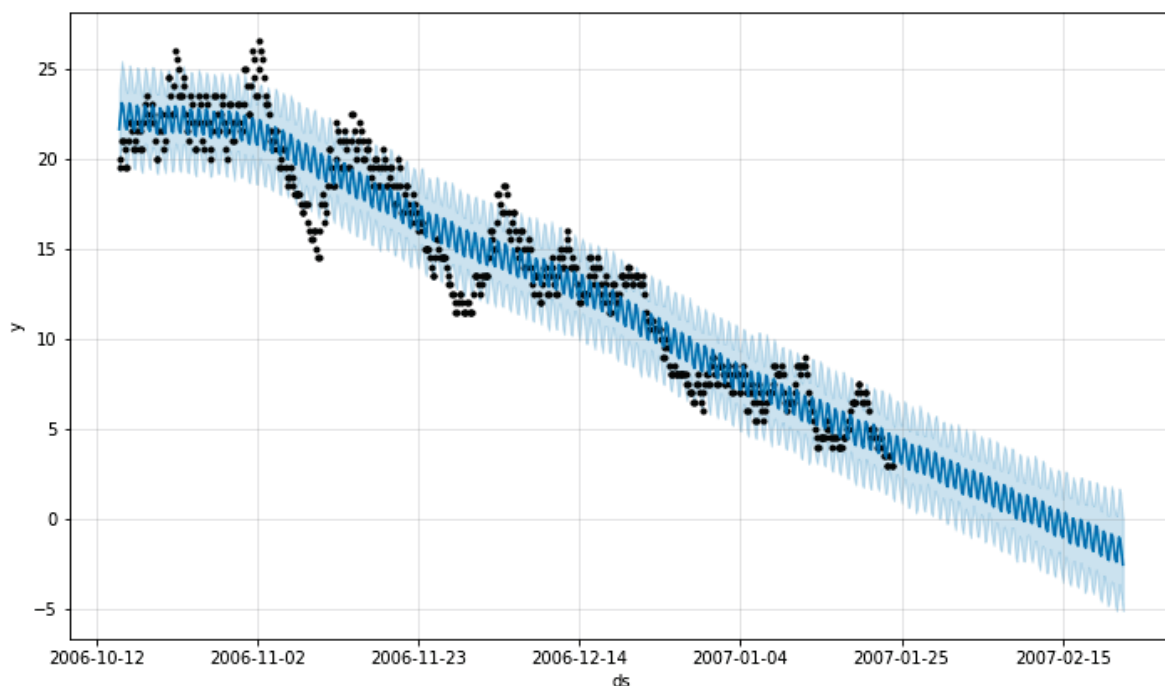


Рис. 5. Реальные и прогнозные оценки температуры грунта на глубине 0,9 м

Fig. 5. Real and predictive estimates of soil temperature at a depth of 0,9 m

Детальный прогноз

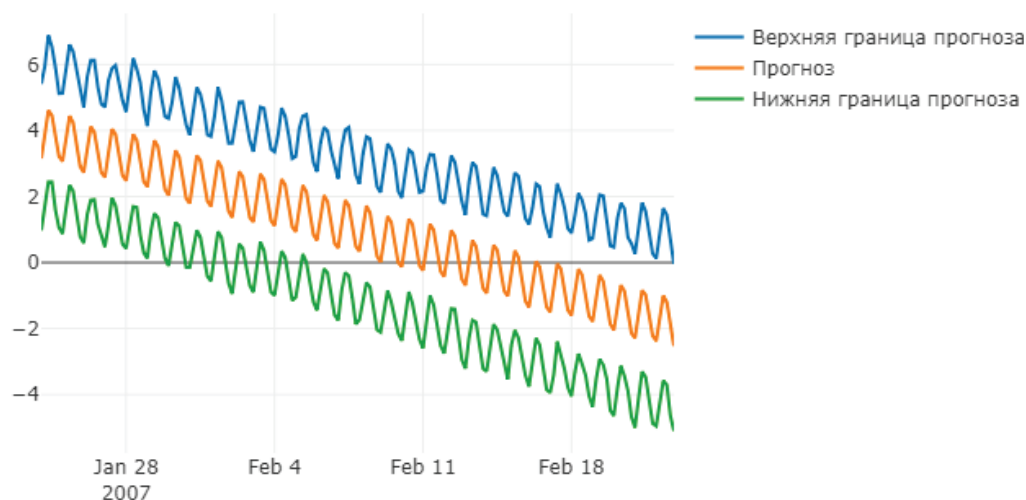


Рис. 6. Детальные прогнозные оценки температуры грунта на глубине 0,9 м

Fig. 6. Detailed predictive estimates of soil temperature at a depth of 0,9 m

не устанавливается явная зависимость между измеряемыми величинами, но прогнозируется синхронность или асинхронность их изменений, что косвенно позволяет оценить и их количественные характеристики. Более того, результаты корреляционного анализа могут предопределять и характер функциональной зависимости прогнозных моделей исследуемых данных, в том числе и робастность некоторых измеряемых величин.

Ниже представлены результаты корреляционного анализа с использованием коэффициента корреляции Пирсона, т. е. результаты корреляции моментов произведений температурных значений на различных глубинах грунта. На рис. 7 представлена матрица частных коэффициентов корреляции значений температур слоев грунта за весь период наблюдений (т. е. в течение 100 дней с начала наблюдений) на горизонтах: 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8 и 2,1 м. Матрицы частных коэффициентов корреляции были рассчитаны на выборках с различными временными масштабами. Первая матрица была построена на основе данных, полученных в течение 10 дней с начала наблюдений. Последующие матрицы строились на основе данных, полученных в течение 20 дней с начала наблюдений, 30 дней с начала наблюдений и т. д. (всего 10 матриц).

На рис. 8 представлен график значений вычисленных матриц частных коэффициентов корреляции.

График изменения коэффициентов корреляции был построен на данных матриц частных коэффициентов корреляций. Точки на графике, расположенные на одном и том же временном масштабе, характеризуют значения, полученные в результате вычисления матриц (всего 10 матриц) частных коэффициентов корреляций за тот или иной период наблюдений. Для анализа частотных компонентов в рядах зарегистрированных температур были построены их вейвлет-спектрограммы для всех горизонтов наблюдений. На рис. 9 представлен вариант полученной плоскости вейвлет-коэффициентов для одного из горизонтов регистрации температуры, а на рис. 10 – их пространственный вариант.

Спектрограмма DOG вейвлет-преобразования (Difference of Gaussians) построена по действительной части вейвлет-коэффициентов. Для формирования изображения в формате BMP использовался язык программирования Java. Ось абсцисс отражает время фиксирования температуры датчиком (параметр сдвига), ось ординат – масштаб вейвлета (период сигнала). Цвет пикселя отображает амплитуду вейвлет-коэффициента. Для спектрограммы в виде 3D-поверхности были использованы возможности библиотеки Jzy3D [40]. Координаты вейвлет-спектрограммы 3D в условных единицах соответствуют значениям спектрограмм в 2D-изображении. Для наглядности положение вейвлет-спектрограмма 3D в пространстве изменено (выполнено вращение вокруг оси уровня).

Корреляционная матрица по данным с поста №10 с 15 октября 2006 г. по 24 января 2007 г.

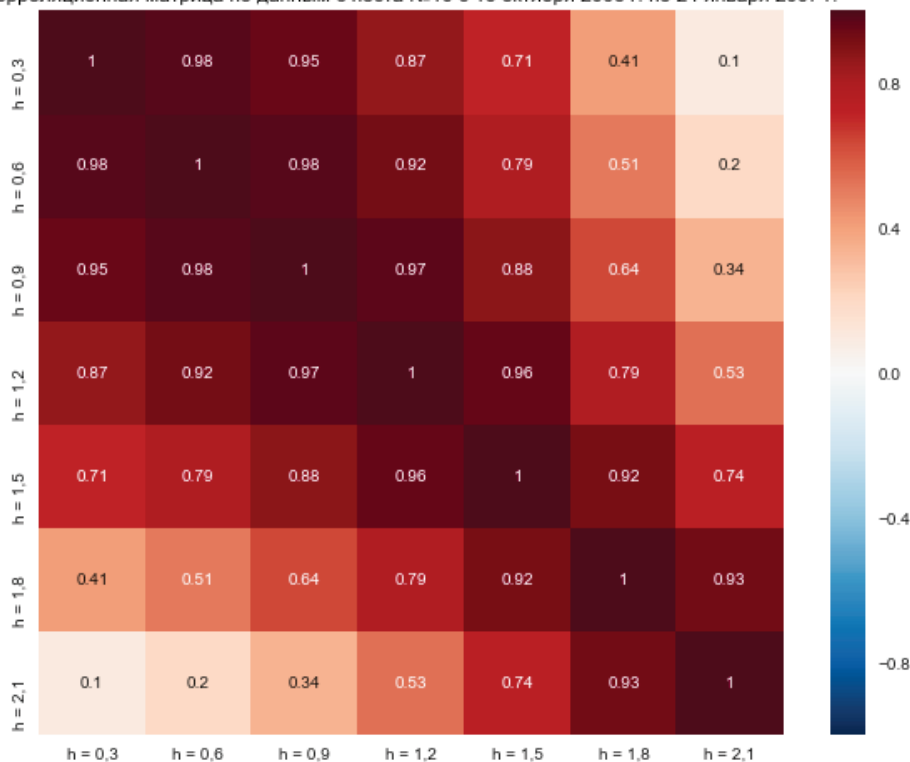


Рис. 7. Матрица частных коэффициентов корреляции

Fig. 7. Correlation coefficients matrix

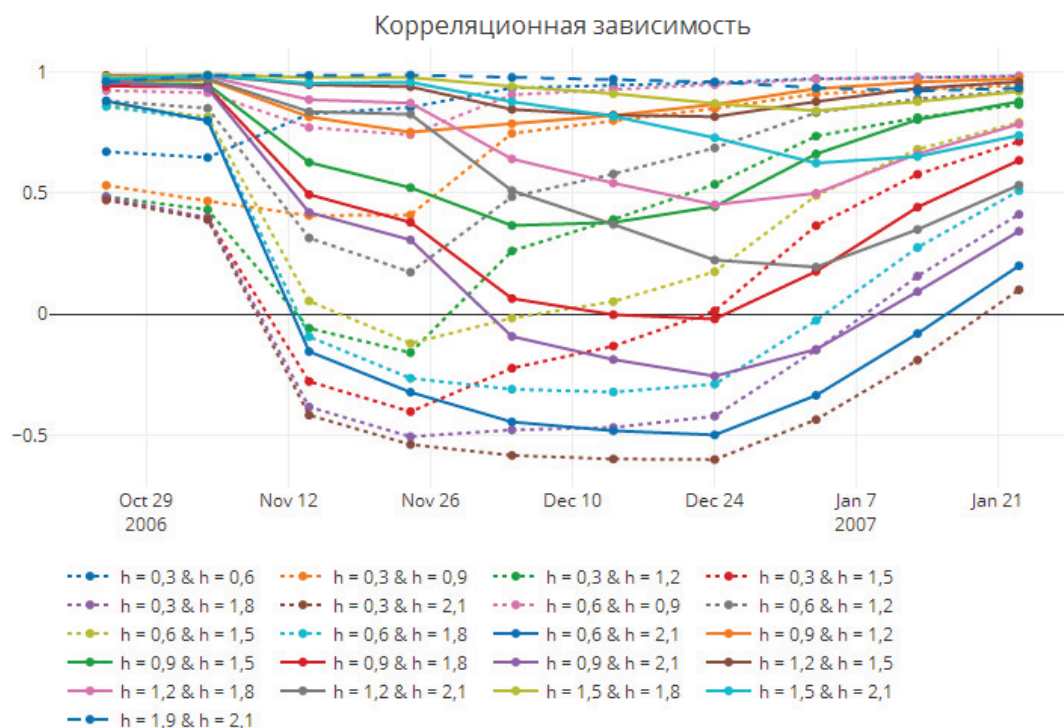


Рис. 8. График значений частных коэффициентов корреляции

Fig. 8. Graph of change in correlation coefficients

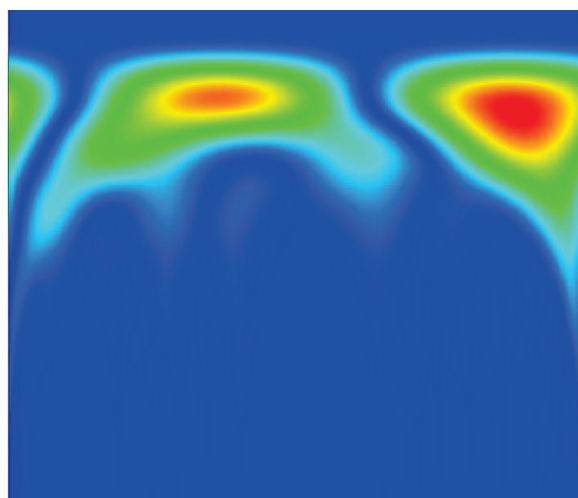


Рис. 9. Вейвлет-спектрограмма 2D

Fig. 9. Wavelet spectrogram 2D

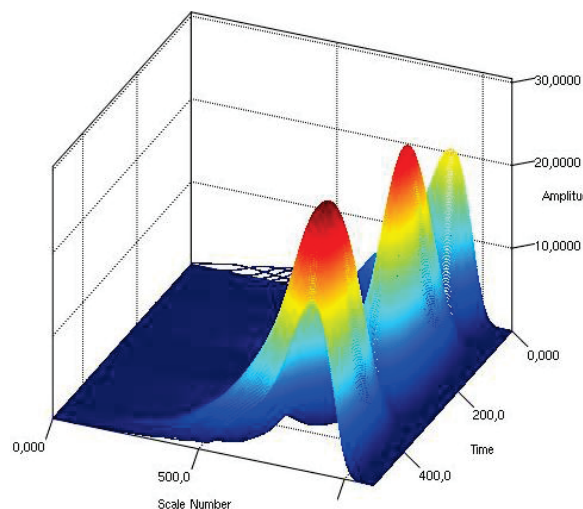


Рис. 10. Вейвлет-спектрограмма 3D

Fig. 10. Wavelet spectrogram 3D

Заключение

С увеличением глубины грунта график значений температур промерзания принимает более плоский характер (количество «ступенек» уменьшается). С увеличением разницы (удаленности) между горизонтами (слоями) грунта уменьшается температурная корреляционная связь между ними.

Расчеты показали (рис. 8), что в горизонтах грунта с самой сильной температурной корреляционной зависимостью, а именно «температура

грунта на глубине 1,9 м – температура грунта на глубине 2,1 м», коэффициент корреляции практически не изменяется на всех временных масштабах выборки.

У горизонтов грунта с менее сильной температурной корреляционной связью, например, «температура грунта на глубине 0,9 м – температура грунта на глубине 1,2 м», «температура грунта на глубине 1,2 м – температура грунта на глубине 1,5 м», «температура грунта на глубине 1,5 м –

температура грунта на глубине 1,8 м» на малых временных масштабах выборки наблюдаются минимальные изменения коэффициентов корреляции, на средних временных масштабах выборки наблюдаются максимальные изменения коэффициентов корреляции (но сохраняется положительная корреляционная зависимость), а на больших временных масштабах выборки наблюдается незначительное изменение коэффициентов корреляции.

У горизонтов грунта со средним коэффициентом температурной корреляции, например, «температура грунта на глубине 0,3 м – температура грунта на глубине 2,1», «температура грунта на глубине 0,3 м – температура грунта на глубине 1,8 м», «температура грунта на глубине 0,6 м – температура грунта на глубине 2,1 м» на малых временных масштабах выборки наблюдаются минимальные изменения коэффициентов корреляции, на средних масштабах временной выборки наблюдаются значительные изменения коэффициентов корреляции, что приводит к переходу от положительной корреляционной зависимости к отрицательной корреляционной зависимости. Это происходит из-за того, что между слоями грунта, залегающими ближе к поверхности земли, и слоями, залегающими на уровне промерзания грунта (или приближенных к нему), в холодный период года происходят разные физические процессы, что обусловлено физико-механическими параметрами грунта.

На больших временных масштабах выборки за счет её увеличения, т. е. добавления в расчеты значений температур слоев грунта за относительно теплые периоды года, наблюдается переход от отрицательной температурной корреляционной зависимости между слоями грунта к положительной.

Во всех парах сравниваемых горизонтов грунта с увеличением временного масштаба выборки наблюдается стабилизация значений коэффициентов температурной корреляции, т. е. статистическая значимость корреляционных связей однозначно определяется объемом выборки.

Измеряемые датчиками значения температур грунта на различных глубинах являются суперпо-

зицией сигналов в широком частотном диапазоне. Поэтому частотно-временной анализ, даже используемый с применением стандартных методов, позволяет получить дополнительную информацию не только о параметрах исследуемого сигнала (температуры), например, с точки зрения «полезный сигнал – шум», но и о свойствах среды, в которой производится его распространение. Кроме того, частотно-временной анализ дает возможность оценить корреляционные зависимости и в частотной области. В частности, по полученным температурным рядам были построены спектрограммы вейвлет-преобразований для классических базисных вейвлетов (вейвлет Морле, DOG-вейвлет, вейвлет Пауля). Визуальный анализ полученных вейвлет-спектрограмм, особенно представленных в виде 3D-поверхностей, выявил дрейф амплитуд вейвлет-коэффициентов по временной оси. Безусловно, для понимания физической причины этого факта и построения его математической модели требуется исследование физико-механических параметров грунта и большой объем измеряемых данных. Тем не менее, можно выдвинуть предположение о волнообразном «продвижении» фронта (фазы) холода в грунте. Вычислительные эксперименты с базисными вейвлетами Морле и Пауля не так наглядно, но тоже подтверждают это предположение. Безусловно, осуществить прямое наблюдение и измерение распространения тепловых волн достаточно сложно, но для косвенной демонстрации их существования проведенных программных экспериментов, может быть, и достаточно.

В целом анализ корреляционных полей температур грунта позволил более точно спрогнозировать значения температур и вне уровней горизонтов регистрирующих датчиков и выработать практические рекомендации для регулирования теплового режима полотна исследуемой автомобильной трассы. В дальнейшем полученные результаты можно использовать в задаче предсказания температурного режима грунтов на соответствующих участках дорог и в задаче установления средней влажности грунта с привлечением данных об атмосферных осадках и среднемесячных температурах воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года». URL: <http://gov.garant.ru/document?id=72038606&byPara=1> (дата обращения: 15.05.2018).
2. Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 341 с.
3. Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове (на примере агросерых почв центральной части Русской равнины): дис. ... д-ра биол. наук. – М., 2008. – 375 с.
4. Апарин Б.Ф. Законы естествознания В.В. Докучаева // Законы почвоведения: новые вызовы: Материалы Междунар. науч. конф. XVI Докучаевские молодежные чтения. – СПб., 2013. – С. 4–13.
5. Дымов А.А., Старцев В.В. Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошнолесосечных рубок // Почвоведение. – 2016. – № 5. – С. 599–608.
6. Каверин Д.А., Пастухов А.В. Особенности температурного режима сезоннопромерзающих почв тундровых ландшафтов европейского Северо-Востока России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – 2017. – № 87. – С. 3–21.
7. Вклад климатических факторов в формирование температурных режимов почв прерывистой криолитозоны северной тайги Западной Сибири / О.Ю. Гончарова, Г.В. Матышак, А.А. Бобрин, Д.Г. Петров, М.О. Тархов, М.М. Удовенко // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – 2017. – № 87. – С. 39–54.

8. Скютте Н.Г., Романис Т.В. Термический режим почв термального урочища Пымвапор // *Естественные науки*. – 2013. – № 4. – С. 30–37.
9. Галенко Э.П. Формирование теплового режима почв хвойных экосистем бореальной зоны в зависимости от лесообразующей породы и типа леса // *Известия Коми научного центра УрО РАН*. – 2013. – Т. 1 (13). – С. 32–37.
10. Десяткин Р.В., Десяткин А.Р. Термический режим мерзлотной лугово-черноземной солонцеватой почвы в многолетнем цикле // *Почвоведение*. – 2017. – № 11. – С. 1344–1354.
11. Влияние температуры и влажности на минерализацию и гумификацию листовного опада в модельном инкубационном эксперименте / А.А. Ларионова, А.Н. Мальцева, В.О. Лопес де Гереню, А.К. Квиткина, С.С. Быховец, Б.Н. Золотарева, В.Н. Кудяров // *Почвоведение*. – 2017. – № 4. – С. 438–448.
12. Киселёв М.В., Воропай Н.Н., Дюкарев Е.А. Температурный режим почв осоково-сфагновой топи верхового болота в южной тайге Западной Сибири // *География и природные ресурсы*. – 2017. – № 3. – С. 110–117.
13. Битюков Н.А. Температурный режим бурых лесных почв под букняками // *Известия Сочинского государственного университета*. – 2012. – № 3 (21). – С. 219–223.
14. Базыкина Г.С. Почвы степной и сухостепной зон в аномальных погодных условиях последних десятилетий // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. – 2014. – № 73. – С. 54–68.
15. Архангельская Т.А. Температурный режим комплексного почвенного покрова. – М.: ГЕОС, 2012. – 282 с.
16. Convergence in temperature sensitivity of soil respiration: Evidence from the Tibetan alpine grasslands / Y. Wang, C. Song, L. Yu, Z. Mi, S. Wang, H. Zeng, C. Fang, J. Li, J. He // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2018. – V. 122. – P. 50–59.
17. Assessment of differences between near-surface air and soil temperatures for reliable detection of high-latitude freeze and thaw states / F. Shati, S. Prakash, H. Norouzi, R. Blake // *Cold Regions Science and Technology*. – 2018. – V. 145. – P. 86–92.
18. Ecosystem controlled soil-rock pCO₂ and carbonate weathering – Constraints by temperature and soil water content / G. Romero-Mujallia, J. Hartmann, J. Borker, J. Gaillardet, D. Calmels // *Chemical Geology*. – 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254118300421?via%3Dihub> (дата обращения: 15.05.2018).
19. Effects of biochar on spatial and temporal changes in soil temperature in cold waterlogged rice paddies / Y. Liu, S. Yang, H. Lu, Y. Wang // *Soil & Tillage Research*. – 2018. – V. 181. – P. 102–109.
20. Soil Physicochemical and Microbial Drivers of Boreal Forest Soils Temperature Sensitivity / B. Klimek, M. Chodak, M. Jazwa, H. Azarbad, M. Niklinska // *Pedosphere*. – 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002016017604004?via%3Dihub> (дата обращения: 15.05.2018).
21. Effects of temperature and root additions on soil carbon and nitrogen mineralization in a predominantly permafrost peatland / Y. Song, C. Song, A. Hou, J. Ren, M. Wang // *Catena*. – 2018. – V. 165. – P. 381–389.
22. Temperature response of soil organic matter mineralisation in arctic soil profiles / C. Moni, T. Lerch, R. Zarruk, L. Strand, D. Rasse // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2015. – V. 88. – P. 236–246.
23. Perez F. Hot soils and cooler stones: Geoecological influence of volcanic tephra and boulders on soil temperature, and significance for plant distribution in Haleakalā Crater (Maui, Hawai'i) // *Catena*. – 2017. – V. 158. – P. 9–19.
24. Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments / M. Yoshioka, S. Takakura, T. Ishizawa, N. Sakai // *Journal of Applied Geophysics*. – 2015. – V. 114. – P. 134–145.
25. Mengistu A., Rensburg L., Mavimbela S. The effect of soil water and temperature on thermal properties of two soils developed from aeolian sands in South Africa // *Catena*. – 2017. – V. 158. – P. 184–193.
26. Spatial distribution of soil water, soil temperature, and plant roots in a drip-irrigated intercropping field with plastic mulch / X. Li, J. Simunek, H. Shi, J. Yan, X. Gond // *European Journal of Agronomy*. – 2017. – V. 83. – P. 47–56.
27. Gu X., Li Y., Du Y. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) // *Soil & Tillage Research*. – 2017. – V. 171. – P. 42–50.
28. Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading / Z. Zhu, G. Kang, Y. Ma, Q. Xie, J. Ning // *Mechanics of Materials*. – 2016. – V. 102. – P. 108–116.
29. Spatial variation of temperature of surface soil layer adjacent to constructions: A theoretical framework for atmosphere-building-soil energy flow systems / H. Zhou, J. Chang, J. Sun, C. Shang, D. Hu // *Building and Environment*. – 2017. – V. 124. – P. 143–152.
30. Wavelet neural networks and gene expression programming models to predict short-term soil temperature at different depths / S. Samadianfard, E. Asadi, S. Jarhan, H. Kazemi, A. Manaf // *Soil and Tillage Research*. – 2018. – V. 175. – P. 37–50.
31. Gao H., Shao M. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties // *Soil & Tillage Research*. – 2015. – V. 153. – P. 145–154.
32. Numerical determination of vertical water flux based on soil temperature profiles / A. Tabbagh, B. Cheviron, H. Henine, R. Guerin, M. Bechkit // *Advances in Water Resources*. – 2017. – V. 105. – P. 217–226.
33. Chapter Five: Distributed Temperature Sensing for Soil Physical Measurements and its Similarity to Heat Pulse Method / H. He, M. Dyck, R. Horton, M. Li, B. Si // *Advances in Agronomy*. – 2018. – V. 148. – P. 173–230.
34. Киряков Е.И., Ефименко В.Н. Уточнение методики прогнозирования параметров водно-теплового режима земляного полотна применительно к районам глубокого сезонного промерзания // *Обеспечение качества автомобильных дорог в условиях Сибири: сб. науч. трудов*. – Кемерово: Изд-во Кузбасс. гос. техн. ун-та, 1997. – С. 32–36.
35. fbprophet 0.2.1. Project description. URL: <https://pypi.org/project/fbprophet/#description> (дата обращения: 15.05.2018).
36. Разработка веб-гис приложения для вычисления коэффициента корреляции для климатических и метеорологических характеристик / Е.П. Гордов, А.Г. Титов, А.А. Притунов, И.А. Ботыгин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 325. – № 5. – С. 91–98.
37. Об одном подходе к кластеризации объектов / И.А. Ботыгин, С.Г. Катаев, В.А. Тартаковский, А.И. Шерстнёва // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 78–86.
38. Гайдадин А.Н., Ефремова С.А., Абакумова Н.Н. Применение корреляционного анализа в технологических расчетах. URL: <http://lit.vstu.ru/ucheba/Metodiki/korr.pdf> (дата обращения: 15.05.2018).
39. Tartakovsky V.A., Botygin I.A., Sherstneva A.I. Synchronous analysis of statistical characteristics of natural climatic processes // *23rd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: Proc. of SPIE*. – Irkutsk, 2017. – V. 10466. – P. 5J1–5J5.
40. Jzy3D – Scientific 3D plotting. URL: <http://www.jzy3d.org/> (дата обращения: 15.05.2018).

Поступила 21.05.2018 г.

Информация об авторах

Ботыгин И.А., кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Крутиков В.А., доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории геоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук.

Шерстнёва А.И., кандидат физико-математических наук, доцент отделения математики и информатики Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Демешко М.В., магистрант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Канаева И.А., магистрант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Солтаганов Н.А., магистрант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.341:551.343.7

COMPUTING OF TEMPERATURE CORRELATIONS BETWEEN SOIL LAYERS IN RESEARCH WITH SHALLOW BOREHOLES

Igor A. Botygin¹,
bia@tpu.ru

Vladimir A. Krutikov²,
krutikov@imces.ru

Anna I. Sherstneva¹,
sherstneva@tpu.ru

Maria V. Demeshko¹,
demeshkomaria@gmail.com

Irina A. Kanaeva¹,
irk-2009@yandex.ru

Nikolay A. Soltaganov¹,
nasoltaganov@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,
10/3, Akademicheskoye avenue, Tomsk, 634055, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to study geological objects by direct geophysical measurements of their parameters and applications of the obtained data and the results of mathematical processing for solving environmental management problems. Effective solution of these problems is especially important when research the influence of meteorological parameters on the water-thermal regime of rocks in areas with deep seasonal freezing.

The main aim of the research is to develop a geophysical complex to determine the spatial distribution of temperature in the ground, to research the dynamics of changes in this distribution over time, to compute correlation of freezing various soil horizons in the conditions of Siberia and the Far North.

Objects of researches are the federal highway «Surgut–Salekhard» within the Yamal–Nenets Autonomous District and the road of territorial importance «Korotchaev–Urengoy».

Methods: methods of analyzing statistical data to research the relationship between the values of variables, including the study of the statistical relationship of two or more random variables (correlation analysis), functional analysis methods for the research of statistical data in the time-frequency range (wavelet transform).

Results. It was shown that with an increase in soil depth the freezing pattern is more flat and with increasing distance between observation horizons the correlation between them decreases. In particular, in soil layers 1,9–2,1 m the values of the coefficients of temperature correlation practically do not change at all time scales of the sample. In the soil layers 0,9–1,2 m, 1,2–1,5 m, 1,5–1,8 m on the average time scales of the sample, there is an insignificant change in the coefficients of temperature correlation, and the maximum deviation of the correlation coefficients is observed at large sample time scales. In the soil layers 0,3–2,1 m, 0,3–1,8 m, 0,6–2,1 m on the average time scales of the sample, there is a significant deviation of the coefficients of temperature correlation, and the maximum deviation of the coefficients of temperature correlation is also observed at large scales of the sample. On the basis of the obtained temperature series, spectrograms of wavelet transforms for classical basic wavelets (Morlet wavelet, DOG wavelet, Paul wavelet) were obtained, which indirectly demonstrate the wavelike «promotion» of the cold front (phase) in the ground.

Key words:

Geological environment, correlation analysis, environmental management, wavelet transform, shallow well method, geophysical research, thermal regime of rocks.

REFERENCES

1. *Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 22 dekabrya 2018 № 2914-p «Strategiya razvitiya mineralno-syryevoy bazy Rossiyskoy Federatsii do 2035 goda»* [Order of the Government of the Russian Federation of December 22, 2018 No. 2914-p «Strategy for development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035». Available at: <http://gov.garant.ru/document?id=72038606&byPara=1> (accessed 15.05.2018).
2. Shulgina A.M. *Klimat pochvy i ego regulirovanie* [Soil climate and its regulation]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 341 p.
3. Arkhangelskaya T.A. *Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya temperatury pochv v kompleksnom pochvennom pokrove (na primere agroserykh pochv tsentralnoy chasti Russkoy ravniny)*. Dis. Doct. nauk [Regularities of spatial distribution of soil temperature in a complex soil cover (on the example of agroserous soils of the central part of the Russian Plain). Dr. Diss.]. Moscow, 2008. 375 p.
4. Aparin B.F. *Zakony estestvoznaniya V.V. Dokuchaeva* [The laws of natural science of V.V. Dokuchaev]. *Zakony pochvovedeniya: novye vyzovy. XVI dokuchaevskie-molodezhnye chteniya. Materi-*

- aly mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Laws of Soil Science: New Challenges: Materials of the International scientific conference XVI Dokuchayevsk youth reading]. St. Petersburg, 2013. pp. 4–13.
5. Dymov A.A., Startsev V.V. Change in the temperature regime of podzolic soils in the process of natural reforestation after clear-cut logging. *Soil Science*, 2016, no. 5, pp. 599–608. In Rus.
 6. Kaverin D.A., Pastukhov A.V. Peculiarities of the temperature regime of seasonally freezing soils in tundra landscapes of the European North-East of Russia. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, vol. 87, pp. 3–21. In Rus.
 7. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Petrov D.G., Tarkhov M.O., Udovenko M.M. The contribution of climatic factors to the formation of temperature regimes of soils of intermittent cryolithozone of the northern taiga of Western Siberia. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, vol. 87, pp. 39–54. In Rus.
 8. Skytte N.G., Romanis T.V. Thermal regime of soils in the thermal tract Pymwashor. *Natural sciences*, 2013, no. 4, pp. 30–37. In Rus.
 9. Galenko E.P. Formation of the thermal regime of soils of coniferous ecosystems in the boreal zone as a function of the forest-forming species and forest type. *Izvestiya Komi Scientific Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 1 (13), pp. 32–37. In Rus.
 10. Desyatkin R.V., Desyatkin A.R. Thermal regime of cryogenic meadow-chnozem solonchous soil in the multi-year cycle. *Soil Science*, 2017, no. 11, pp. 1344–1354. In Rus.
 11. Larionova A.A., Maltseva A.N., Lopez de Gerenyu V.O., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Zolotareva B.N., Kudayarov V.N. Influence of temperature and humidity on mineralization and humification of deciduous litter in a model incubation experiment. *Soil Science*, 2017, no. 4, pp. 438–448. In Rus.
 12. Kiselev M.V., Voropai N.N., Dyukarev E.A. Temperature regime of soils of sedge-sphagnum swamp of a highland bog in the southern taiga of Western Siberia. *Geography and Natural Resources*, 2017, no. 3, pp. 110–117. In Rus.
 13. Bitjukov N.A. Temperature regime of brown forest soils under the birch. *Sochi Journal of Economy*, 2012, no. 3 (21), pp. 219–223. In Rus.
 14. Bazykina G.S. Soils of the steppe and dry steppe zones in the abnormal weather conditions of recent decades. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2014, vol. 73, pp. 54–68. In Rus.
 15. Arkhangelskaya T.A. *Temperaturny rezhim kompleksnogo pochvennogo pokrova* [Temperature regime of the complex soil cover]. Moscow, GEOS Publ., 2012. 282 p.
 16. Wang Y., Song C., Yu L., Mi Z., Wang S., Zeng H., Fang C., Li J., He J. Convergence in temperature sensitivity of soil respiration: Evidence from the Tibetan alpine grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 122, pp. 50–59.
 17. Shati F., Prakash S., Norouzi H., Blake R. Assessment of differences between near-surface air and soil temperatures for reliable detection of high-latitude freeze and thaw states. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, vol. 145, pp. 86–92.
 18. Romero-Mujallia G., Hartmann J., Borker J., Gaillardet J., Calmels D. Ecosystem controlled soil-rock pCO₂ and carbonate weathering – Constraints by temperature and soil water content. *Chemical Geology*, 2018. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254118300421?via%3Dihub> (accessed 15 May 2018).
 19. Liu Y., Yang S., Lu H., Wang Y. Effects of biochar on spatial and temporal changes in soil temperature in cold waterlogged rice paddies. *Soil & Tillage Research*, 2018, vol. 181, pp. 102–109.
 20. Klimek B., Chodak M., Jazwa M., Azarbad H., Niklinska M. Soil Physicochemical and Microbial Drivers of Boreal Forest Soils Temperature Sensitivity. *Pedosphere*, 2017. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002016017604004?via%3Dihub> (accessed 15 May 2018).
 21. Song Y., Song C., Hou A., Ren J., Wang M. Effects of temperature and root additions on soil carbon and nitrogen mineralization in a predominantly permafrost peatland. *Catena*, 2018, vol. 165, pp. 381–389.
 22. Moni C., Lerch T., Zarruk R., Strand L., Rasse D. Temperature response of soil organic matter mineralisation in arctic soil profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, vol. 88, pp. 236–246.
 23. Perez F. Hot soils and cooler stones: Geoeological influence of volcanic tephra and boulders on soil temperature, and significance for plant distribution in Haleakalā Crater (Maui, Hawai'i). *Catena*, 2017, vol. 158, pp. 9–19.
 24. Yoshioka M., Takakura S., Ishizawa T., Sakai N. Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, vol. 114, pp. 134–145.
 25. Mengistu A., Rensburg L., Mavimbela S. The effect of soil water and temperature on thermal properties of two soils developed from aeolian sands in South Africa. *Catena*, 2017, vol. 158, pp. 184–193.
 26. Li X., Simunek J., Shi H., Yan J., Gond X. Spatial distribution of soil water, soil temperature, and plant roots in a drip-irrigated intercropping field with plastic mulch. *European Journal of Agronomy*, 2017, vol. 83, pp. 47–56.
 27. Gu X., Li Y., Du Y. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Soil & Tillage Research*, 2017, vol. 171, pp. 42–50.
 28. Zhu Z., Kang G., Ma Y., Xie Q., Ning J. Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading. *Mechanics of Materials*, 2016, vol. 102, pp. 108–116.
 29. Zhou H., Chang J., Sun J., Shang C., Hu D. Spatial variation of temperature of surface soil layer adjacent to constructions: a theoretical framework for atmosphere-building-soil energy flow systems. *Building and Environment*, 2017, vol. 124, pp. 143–152.
 30. Samadianfard S., Asadi E., Jarhan S., Kazemi H., Manaf A. Wavelet neural networks and gene expression programming models to predict short-term soil temperature at different depths. *Soil and Tillage Research*, 2018, vol. 175, pp. 37–50.
 31. Gao H., Shao M. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties. *Soil & Tillage Research*, 2015, vol. 153, pp. 145–154.
 32. Tabbagh A., Cheviron B., Henine H., Guerin R., Bechkit M. Numerical determination of vertical water flux based on soil temperature profiles. *Advances in Water Resources*, 2017, vol. 105, pp. 217–226.
 33. He H., Dyck M., Horton R., Li M., Si B. Chapter Five: Distributed Temperature Sensing for Soil Physical Measurements and Its Similarity to Heat Pulse Method. *Advances in Agronomy*, 2018, vol. 148, pp. 173–230.
 34. Kiryakov E.I., Efimenko V.N. Utochnenie metodiki prognozirovaniya parametrov vodno-teplovogo rezhima zemlyanogo polotna primenitelno k rayonam glubokogo sezonnogo promerzaniya [Refinement of the methodology for predicting the parameters of the water-thermal regime of the roadbed with reference to areas of deep seasonal freezing]. *Obespechenie kachestva avtomobilnykh dorog v usloviyakh Sibiri. Sbornik nauchnykh trudov* [Maintenance of quality of highways in the conditions of Siberia. Collection scientific works]. Kemerovo, KGTU Publ., 1997. pp. 32–36.
 35. *fbprophet 0.2.1. Project description*. Available at: <https://py-pi.org/project/fbprophet/#description> (accessed 15 May 2018).
 36. Gordov E.P., Titov A.G., Pritupov A.A., Botygin I.A. Developing web applications to calculate correlation coefficient for climatic and meteorological parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 5, pp. 91–98. In Rus.
 37. Botygin I.A., Kataev S.G., Tartakovskiy V.F., Sherstneva A.I. An approach to clustering objects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 78–86. In Rus.

38. Gaydadin A.N., Efremova S.A., Abakumova N.N. *Primenenie korrelyatsionnogo analiza v tekhnologicheskikh raschetakh* [The use of correlation analysis in technological calculations]. Available at: <http://lit.vstu.ru/ucheba/Metodiki/korr.pdf> (accessed 15 May 2018).
39. Tartakovsky V.A., Botygin I.A., Sherstneva A.I. Synchronous analysis of statistical characteristics of natural climatic processes. *23rd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: Proc. of SPIE*, 2017, vol. 10466, pp. 5J1–5J5.
40. *Jzy3D – Scientific 3D plotting*. Available at: <http://www.jzy3d.org/> (accessed 15 May 2018).

Received: 21 May 2018.

Information about the authors

Igor A. Botygin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir A. Krutikov, Dr. Sc., Head of Department of Geophysical Research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS.

Anna I. Sherstneva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Maria V. Demeshko, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Irina A. Kanaeva, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay A. Soltaganov, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.