

Санкт-Петербургский Государственный университет

РОМАНОВ Георгий Павлович

Выпускная квалификационная работа

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОЧВЫ, НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЙ**

Уровень образования: магистратура
Направление 05.04.04 «Гидрометеорология»
Основная образовательная программа ВМ.5779.2018 «Гидросфера и атмосфера:
моделирование и прогноз»

Научный руководитель:
Ст.преподаватель,
каф.Климатологии, к.г.н.,
доцент,
Лемешко Наталья
Александровна

Рецензент:
Главный специалист отдела
динамической метеорологии
и климатологии, ГГО им.
А.И.Воейкова,
д.г.н., профессор,
Русин Игорь Николаевич

Санкт-Петербург

2020

Оглавление

1. Введение	3
2. Общее представление о современных методах расчёта коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву	5
3. Методы расчета коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву	16
3.1. Методика восстановления потока тепла по стандартным метеорологическим наблюдениям, принятая на сети станций УГМС РФ	16
3.2. Методика расчёта потока тепла и коэффициента температуропроводности при произвольном размещении почвенных термометров, предложенная проф. И.Н.Русиным.....	19
3.3. Методика, основанная на использовании конечно-разностного аналога, описанная в работах Архангельской Т.А.....	22
4. Основные приборы и источники получения данных, для проведения исследований.	24
4.1. Почвенные термометры Савинова	24
4.2. Автоматический мобильный полевой агрометеорологический комплекс (АМПАК)	25
4.3. Сайты с массивами данных.....	26
5. Исследование теплофизических свойств почвы, на основе проведенных экспериментов.....	28
5.1. Эксперимент на примитивных почвах скалистого берега о-ва Валаам.....	28
5.2. Эксперимент на сухом и влажном песке.....	33
5.3. Эксперименты, проведённые на опытной станции пос.Меньково за тёплый период 2019 года.....	38
5.4 Эксперимент, проведённый на сельскохозяйственном поле, о-ва Валаам.....	43
6. Заключение.....	48
Список литературы	50
Приложение А.....	53

1. Введение

Актуальность темы исследования. Коэффициент температуропроводности почвы численно равен отношению теплопроводности к теплоёмкости при постоянном объеме. Как и поток тепла в почву, его определяют ежедневно на сети станций Управления Гидрометеорологической службой Российской Федерации. Указанные характеристики используются в определении энергетического баланса земной поверхности, что в свою очередь позволяет получить данные о микроклимате местности. Помимо этого, использование тепловых потоков и коэффициента температуропроводности, широко распространено в агрометеорологии и агрофизике, для расчёта суммарного испарения, водопотребления растений, а также прогнозирования начала посевных работ. Однако стандартная методика в данный момент времени устаревает, и применима только для определённого типа почвенных термометров, с очень долгой периодичностью наблюдений. Её использование, при измеренных данных современным метеорологическим оборудованием, не возможно, и перед исследователями часто встаёт вопрос о расчёте коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву, на основе наблюдений по почвенным логгерам, самописцам и др.

Объектом исследования в магистерской диссертации является поверхностный почвенный слой (0-15см), с различным содержанием почвенной влаги. **Предметом** исследования является моделирование и расчёт теплового потока и коэффициента температуропроводности при различном содержании почвенной влаги.

В качестве основных методов исследования в работе были выбраны: а) метод определения коэффициента температуропроводности и потока тепла при произвольном размещении почвенных термометров; б) метод определения коэффициента температуропроводности при помощи конечно – разностного аналога; в) метод расчёта энергетических потоков в системе поверхность почвы – атмосфера; г) статистический анализ точности математических моделей.

Целью данной работы, было исследование влияния различных зависимостей на теплофизические свойства почв, такие как поток тепла и коэффициент температуропроводности. В ходе данной работы, были поставлены следующие **задачи**:

1. Поиск и определение универсальной и доступной при измерениях в реальном времени методики расчета коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву.

2. Апробация на реальных данных выбранной методики расчета указанных параметров, для выявления и устранения её недостатков.

3. Постановка нескольких агрометеорологических экспериментов, для определения факторов, влияющих на теплофизические свойства почв.

4. Нахождение зависимостей влияния почвенной влаги на энергетические потоки.

Научная новизна. В процессе исследования теплофизических свойств почвы, на основе современных метеорологических наблюдений, были получены следующие результаты:

1. Апробирована предложенная методика определения коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву при произвольном размещении почвенных термометров, на основе данных экспериментов, проведенных различными приборами.

2. Сформировано предложение по улучшению данной методики, которое так же было опробовано в процессе исследовательской работы.

3. Обнаружен суточный ход коэффициента температуропроводности и исследован поток тепла в почвы различного состава.

4. Выявлено и исследовано влияние содержания почвенной влаги на коэффициент температуропроводности и поток тепла в почву.

Все используемые в работе данные, были получены мною в ходе нескольких исследовательских практик, а также из сертифицированной базы данных АМПАК, Агрофизического научно-исследовательского института.

2.Общее представление о современных методах расчёта коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву

Для нахождения решения поставленной проблемы определения теплового потока и коэффициента температуропроводности, был проведен обзор литературы по данной тематике за последнее время. Было выделено несколько книг и статей, наиболее подробно описывающих проблему. Замечено, что в разных источниках коэффициент температуропроводности, называют и обозначают по-разному. Так же и с потоком тепла в почву. Однако физический смысл указанных переменных не изменяется.

В общей сложности, все методы расчёта потока тепла в почву и коэффициента температуропроводности можно разделить на пять категорий: методы, основанные на исследовании гармонических колебаний; интегральные методы расчёта; методы использующие измерения градиента потока; методы, основанные на конечно-разностном аналоге уравнения теплопроводности; методы, основанные на использовании интеграла Дюамеля. Для наглядности, была составлена блок-схема методов, изображенная на рисунке 1:



Рисунок 1. Блок-схема методов расчёта потока тепла в почву и коэффициента температуропроводности.

Рассмотрим подробно каждый из этих подходов. Одним из выделенных способов являются интегральные методы расчёта. К ним относится большинство из выбранных статей. В основе лежит метод Фурье, представленный формулой 1:

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

где, Q – поток тепла; λ – коэффициент теплопроводности показывающий, какое количество энергии проходит через квадратный сантиметр площади вещества за секунду; dtT/dz – изменение температуры по глубине.

Более подробно данный подход расписан в книге немецких учёных «The Climate Near the Ground», изданной в 1995 году (Rudolf, Aron, 1995). Коэффициент температуропроводности описывается выражением, представленным формулой 2:

$$K = \frac{\lambda}{(\rho c)_m} \quad (2)$$

В книге описываются составляющие теплового баланса атмосферы, физические процессы переноса энергии в почве, однако как таковых методов расчёта не приводится.

Следующим изданием, в котором наиболее подробно останавливаются на поставленном вопросе, является «Introduction to Micrometeorology». Здесь, основываясь на тех же законах Фурье, рассматривается влияние почвенной влаги и пористости, на тепловые свойства почв. Указано, что теплоёмкость воздуха очень велика из-за его низкой плотности. Тепловые свойства воздуха и воды зависят от окружающей температуры. Заполнение пор сухой почвы водой, значительно увеличивает её теплоёмкость и теплопроводность (Pal Arya, 1998). Таким образом, при одинаковых условиях, но разном содержании почвенной влаги, и состава, тепловые свойства различны. Уравнение теплового потока, описывается формулой 3:

$$Q = Q_D + \int_0^D \frac{\delta}{\delta t} (C_s T) dz \quad (3)$$

где, D некоторая глубина, на которой поток равен нулю, или может быть оценен уравнением 1.

Следующей наиболее содержательно описывающей проблему, является статья японского учёного Шусаку Гото, опубликованная в «Journal of geophysical research» в 2005 году. В ней, основываясь на уравнении 2, Гото переходит к уравнению тепловой волны, и описывает её распространение по пространству (Goto, 2005).

Следующей мною выбранной статьёй, в которой описывается расчёт коэффициента температуропроводности, является статья, написанная африканскими учёными Хасаном Рахими, и др. в журнале «African Journal of Agricultural Research» под названием «Применение численного метода при оценке коэффициента температуропроводности

почвы и прогнозировании температуры почвы при различных текстурах и содержании влаги». Здесь, на основе формулы 2, представленной ранее, исследуется изменение коэффициента температуропроводности на разных глубинах при различном содержании влаги (Khoshkhood, Khalili, 2010).

Следующей статьёй, датируемой 2012 годом, описывающей коэффициент температуропроводности, является статья Бразильских учёных Куирджи де Джонг ванн Лаер и Анжелики Дуригон «Тепловая диффузия почвы, рассчитанная по данным температуры почвы и отдельных компонентов почвы». В ней используется уравнения Фурье (формула 1-2). Далее идёт сравнение коэффициента при различном содержании почвенной влаги и состава почв (Quirijn, Durigon, 2012).

Помимо этого, на территории Российской Федерации, на сети станций управления гидрометеорологической службой РФ, для расчёта потока тепла в почву и коэффициента температуропроводности используется методика, основанная так же на законах Фурье (Руководство, 1977). Для неё используются наблюдения за температурой почвы на поверхности и глубинах каждые три часа. Однако, её главным недостатком является жесткая привязанность к определённым глубинам наблюдений и дискретности по времени, что в большинстве случаев не позволяет её применять. Примером могут служить данные иностранных станций, либо экспедиционные данные, когда по каким-либо причинам соблюсти все условия невозможно.

Кроме того, можно выделить работы проф. Русина И.Н, по нахождению потока тепла и коэффициента температуропроводности (Русин, 2014). В своих работах, он расширяет стандартную методику, применяемую на сети станций УГМС РФ так, чтобы её можно было использовать при любых условиях. Это позволяет применять данный метод с использованием данных с различными глубинами и временем наблюдений.

Анализируя статьи, в основе которых лежат интегральные методы, можно говорить о том, что данный подход имеет как преимущества, так и недостатки. Главным достоинством подхода, является простота его использования. В большинстве случаев, применяются данные наблюдения за температурой почвы на разных глубинах, получение которых не составляет труда, и возможно различными средствами, начиная от почвенных ртутных термометров, заканчивая термодатчиками. Так же, подход хорошо отработан, в литературе помимо указанных, есть множество других статей. Есть возможность подобрать необходимый метод, на основании имеющихся данных. Среди недостатков подхода, можно выделить то, что, несмотря на попытки некоторых авторов, метод никак

не учитывает неоднородность почвы на разных глубинах, а также разное содержание почвенной влаги. Помимо этого, важно использовать данные с небольшим интервалом по времени. Чем выше интервал, тем менее точны расчёты. Так же, зачастую нерешённым остаётся вопрос о методах измерения температуры на поверхности почвы, и расчёт потока на границе раздела фаз.

В данной работе, на основе имеющихся данных, был выбран этот подход, для последующей оценки потока тепла и коэффициента температуропроводности на разных глубинах и интервалах измерений.

Следующий блок методов, это методы, основанные на исследовании гармонических колебаний потока. Самая ранняя из выбранных статей с данным методом, статья американского исследователя Стивена Р. Эввета, «Температурные матрицы для анализа термических свойств почвы». В этой статье описывается анализ гармонических колебаний дневных температур на поверхности почвы и разных глубинах. Приводится расчёт теплового потока. Однако автор сталкивается с проблемой неоднородности почвы на разных глубинах. Для решения этой проблемы, строится температурная матрица, по которой определяются данные для анализа коэффициента температуропроводности и потока по слоям (Steven, 1994). Различное содержание почвенных вод позволяет рассчитать теплоёмкость и теплопроводность для ряда, что приводит к представлению о теплопроводности в зависимости от содержания воды.

Следующий подход данного метода, амплитудный алгоритм расчёта потока и коэффициента. Он используется во многих статьях, в частности в работах Гао, например, в статье 2007 года, где изучается тепловой поток в пустыне. В ней особое внимание уделяется данным о температуре почвы с большим шагом по времени. Коэффициент температуропроводности описывается выражением, представленным формулой 4:

$$K = - \frac{(z_1 - z_2)^2 \omega \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{(\Phi_1 - \Phi_2) \left[(\Phi_1 - \Phi_2)^2 + \ln^2\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \right]} \quad (4)$$

где, z_1, z_2 - глубина, ω - угловая скорость вращения земли, A_1, A_2 - амплитуды температуры почвы на поверхности и глубинах, Φ_1, Φ_2 - начальные фазы температур на поверхности почвы и глубинах z_1, z_2 (Gao, 2007).

Следующая из работ Гао называется «Сравнение шести алгоритмов определяющих тепловую диффузию почвы на плато Лесс в Китае» (Gao, 2009). В данной статье

сравниваются различные методы определения коэффициента температуропроводности почвы. Амплитудный алгоритм, расчёта коэффициента температуропроводности описывается формулой 5:

$$K = \frac{\omega(z_1 - z_2)^2}{2 \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2} \cdot (5)$$

Помимо этого данный подход был описан в статье Польского учёного Томаса Гнатовски, «Анализ коэффициента температуропроводности для различных органических слоёв почвы» (Gnatowski, 2009). В ней описаны различные методы расчёта коэффициента температуропроводности. Учёный рассчитывает коэффициент различными методами, и сравнивает полученные результаты между собой. Среди расчётных уравнений, была приведена формула (Ewert, 2002) 6:

$$K_T = \frac{\omega}{2} \left(\frac{z_2 - z_1}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)} \right)^2, \quad (6)$$

где, A_1 - амплитуда на глубине z_1 , A_2 - амплитуда на z_2 , ω описывается как $2\pi/P$, P - равно периоду наблюдения. Преимущество этого способа состоит в том, что для определения коэффициента требуются только четыре температурных наблюдения (минимальное и максимальное) на двух глубинах.

Следующим подходом определения исследуемых параметров данного метода, является метод арктангенс и логарифмический. Их упоминание так же можно увидеть в статье Гао (Gao, 2007). Расчётная формула метода арктангенс представлена формулой 7:

$$K = \frac{\omega \Delta z^2}{2 \left\{ \arctan \left[\frac{(T_1 - T_3)(T_2' - T_4') - (T_2 - T_4)(T_1' - T_3')}{(T_1 - T_3)(T_1' - T_3') + (T_2 - T_4)(T_2' - T_4')} \right] \right\}^2} \quad (7)$$

где, K – коэффициент температуропроводности, $\omega = 2\pi/P$, P - равно периоду наблюдения, $T_{1..4}$ - температуры почвы, измеренные на глубине z_1 . $T'_{1..4}$ - температура на глубине z_2 . Так же как и в амплитудном алгоритме, здесь расчёт коэффициента идет только за исследуемый период наблюдения (сутки, и т.д.).

Впервые, данный алгоритм был представлен как метод Косовского и Сикоры (Kossowski, Sikora, 1978).

Следующий алгоритм применяемый в рамках гармонического метода, логарифмический. Его описание было приведено как метод Симона, описанный Хортоном

(Horton, Wierengai др., 1983). В нем, коэффициент температуропроводности представлен формулой 8:

$$K = \left\{ \frac{0,0121\Delta z}{\ln \left\{ \frac{[(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2]}{[(T'_1 - T'_3)^2 + (T'_2 - T'_4)^2]} \right\}} \right\}^2 \quad (8)$$

Так же как и предыдущий подход, данные методы рассчитаны на измерения температуры почвы на двух разных глубинах, и расчёт необходимых параметров идёт за определённый период наблюдений. Для нашего исследования, данный подход не подходит, так как в нашем распоряжении даны о температуре почвы на трёх и четырёх разных глубинах с высокой дискретностью.

Помимо указанных подходов, в разных работах использовались алгоритмы, которые не вошли ни в одну из указанных классификаций, однако стоят упоминания.

В исследованиях Гао (Gao, 2007), один из описываемых алгоритмов, фазовый алгоритм, коэффициент температуропроводности в котором описывается уравнением, представленным формулой 9:

$$K = \frac{\omega(z_1 - z_2)^2}{2(\Phi_1 - \Phi_2)^2} \cdot (9)$$

Так же, в той же работе был упомянут гармонический алгоритм, который представляет собой учет в формуле гармонических колебаний. Коэффициент температуропроводности представлен формулой 10:

$$K = - \frac{(z_1 - z_2)^2 \omega \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)}{(\Phi_1 - \Phi_2) \left[(\Phi_1 - \Phi_2)^2 + \ln^2 \frac{A_1}{A_2} \right]} \quad (10)$$

Поток тепла в почву описывается уравнением, представленным формулой 11:

$$Q = \frac{\omega(z_1 - z_2)}{\Phi_1 - \Phi_2} \left[\frac{2 \ln^2 \frac{A_1}{A_2}}{(\Phi_1 - \Phi_2)^2 + \ln^2 \frac{A_1}{A_2}} - 1 \right] \cdot (11)$$

Помимо этого, стоит отметить работы учёных из Польского Агрофизического института, Богуслава Усович и Лукаса Усович. В статье «Коэффициент температуропроводности почвы- экспериментальные результаты и исследуемые методы» они оценивают методы вычисления теплопроводности почвы на основе сравнения теплопроводности песка, глины, песчаного суглинка, суглинка, илистого суглинка, и торфа, различными методами (Usowicz, 1999). Теплопроводность различных грунтов

измерялась при разном значении объемной плотности, содержании воды и температуры почвы. Предложенный метод подразумевает, что теплопроводность равна сумме теплопроводностей частиц грунта, иными словами, теплопроводность грунта предложено описывать уравнением, представленного формулой 12:

$$\lambda = \frac{4\pi}{u \sum_{j=1}^L \frac{P(x_{1,j}, \dots, x_{k,j})}{x_{1,j}\lambda_1(T)r_1 + \dots + x_{k,j}\lambda_k(T)r_k}} \quad (12),$$

где, u – число параллельных соединений частиц почвы, L - количество всех возможных комбинаций конфигурации частиц, $x_{1,j}, \dots, x_{k,j}$ - ряды отдельных частиц почвы с теплопроводностью $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ – радиусы частиц.

Преимуществами данного подхода, является относительная простота использования расчётных формул. Так же, анализируя указанные статьи, в некоторых случаях, для определения коэффициента, можно обойтись измерениями температуры на двух уровнях четыре раза. Однако, от этого страдает точность наблюдений, и коэффициент рассчитывается средний, для всего срока наблюдений. Недостатки гармонического метода в том, что необходимо знать эту гармонику. Гармоника может быть не выражена. В нашем исследовании, этот метод так же не использован, т.к. имеющиеся ряды данных с высокой частотой наблюдений, и коэффициент температуропроводности с потоком тепла, рассчитываются постоянно.

Следующим методом, представленным на блок-схеме, является метод измерений градиента потока при помощи тепловых плат. Одной из статей с указанным подходом, являются труды китайского учёного Шигуи Гао (Gao, 2005). В самой ранней из его работ, тепловой поток исследуется методом, с учётом теплопроводности и конвективных процессов. Расчёт теплового потока на поверхности проводится на основании измерений по тепловым платам, и описывается уравнением, представленного формулой 13:

$$Q_0 = Q_1 + \frac{C_g \Delta z \delta T}{\delta z} \quad (13)$$

где, Q_0 – тепловой поток на поверхности, Q_1 - поток тепла на глубине тепловой платы, C_g - объёмная теплоёмкость почвы, z – толщина слоя, T - температура на глубине.

Так же стоит отметить статью «Long-term estimation of soil heat flux by single layer soil temperature», учёных Ченг Шиех, Ченг Хуанг, Гер Киели (Hsieh, Huang и др., 2008). В

ней на основе метода Ванг Броса, приведен расчёт теплового потока по тепловым пластинам (Wang, Bras, 2008). Уравнение расчёта теплового потока по Ванг Бросу приведено формулой 14:

$$Q(z, t) = \sqrt{\frac{kp_s c_s}{\pi}} \int_0^t \frac{dT(z, s)}{\sqrt{t-s}}, \quad (14)$$

где Q – тепловой поток, z – глубина, t – время, $p_s c_s$ – объёмная теплоёмкость, s – переменная интегрирования. На основе этого выражения, учёные предложили уравнение, представленное формулой 15:

$$Q(0, t) = Q(0.05, t) + \Delta Q = Q(0.05, t) + p_s c_s \frac{\delta T}{\delta t} \Delta z, \quad (15)$$

где $Q(0.05, t)$ – поток тепла определённый по тепловой пластине на глубине 5 см, ΔQ – тепловой поток в этом слое почвы толщиной 5 см, который рассчитывается с учетом временного ряда температур почвы, измеренного на уровне 5 см, Δz – толщина слоя почвы над пластиной.

Следующей информативной статьёй про подходы определения теплового потока, является работа учёных из Нидерландского метеорологического института, Р.Ж. Ронда и Ф.С. Босвельда: «Исследование поверхностного почвенного потока тепла по наблюдениям за температурой почвы и потоковых профилей при использовании плат» (Ronda, Bosveld, 2009). В этой статье, подход определения потока тепла в почву, основан на измерениях профилей температуры почвы, теплового потока на поверхности по тепловым платам, наблюдениям за температурой растительного покрова и поступающим коротковолновым излучением. Общее уравнение расчёта потока тепла, приведено формулой 16:

$$Q = Q_p \left(1 - 1.92 \frac{T_p}{d_p} \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_p} \right) \right), \quad (16)$$

где, Q – поток тепла в почву, Q_p – поток тепла в почву измеренный тепловой пластиной, T_p – толщина пластины, d_p – диаметр пластины, λ – теплопроводность материалов.

Среди достоинств указанного подхода, стоит отметить так же простоту использования, а также возможность оценки потока тепла на границе раздела, и в верхних слоях почвы. Среди недостатков, можно выделить то, что не всегда имеются тепловые

платы. Также как и в предыдущем подходе, остаётся нерешенным вопрос о неоднородности почвы и содержании влаги.

Для дальнейших исследований данной работы, этот подход невозможно применить, т.к. нет данных по тепловым платам.

Следующий из методов, представленных в блок-схеме, метод, основанный на использовании конечно-разностного аналога. Одно из описаний данного подхода можно найти в статье из журнала «Advances in Water Resources», ученых Стивена Еветта, Нурит Агама и др., под названием «Метод профилирования почвы для тепловых диффузионных свойств, проводимости и теплового потока почвы: Сравнение с пластинами теплового потока почвы» (Steven, Aganb и др., 2012). В нем исследователи сравнивают рассчитанный и измеренный тепловой потоки. В основе идеи используется метод Фурье (формула 1). Далее применяется конечно-разностная форма, и уравнение имеет вид (формула 17):

$$Q = -k \frac{\Delta T}{\Delta z} + \Delta Q_{z1..z2} \quad , \quad (17)$$

где ΔT - температурный градиент между двумя глубинами, Δz - изменение глубины, $\Delta Q_{z1..z2}$ - дивергенция потока в почвенный слой между глубинами. После всех преобразований, конечная формула теплового потока имеет вид:

$$Q_0 = Q_z + \frac{\sum_{j=1}^N (T_{z_{j+1}} - T_{z_j}) \Delta z_j C_{z_j}}{(t_{i+1} - t_i)} \quad , \quad (18)$$

где Q_0 – тепловой поток на поверхности; T_{z_j} - температуры на глубинах, C_{z_j} -объемные теплоёмкости.

Следующий из приведённых методов, метод Верхоева (Verhoef, Hurk, 1996). Здесь коэффициент температуропроводности, рассчитывается уравнением, приведенным формулой 19:

$$K = \frac{1}{2\omega} * \left(\frac{z_2 - z_1}{\delta t} \right)^2 \quad , \quad (19)$$

где, $\delta t = t_2 - t_1$, t_1 и t_2 , это время, в которое максимальная температура возникает на глубинах z_1 и z_2 соответственно.

Среди отечественных учёных, особое внимание можно уделить работам Архангельской Т.А. В своих работах, она производит расчёт коэффициента

температуропроводности, применяя конечно-разностный аналог уравнения теплопроводности слоя почвы при различном содержании почвенной влаги (Архангельская, 2012).

Помимо описания энергетических потоков уравнениями, мы так же сталкиваемся с рядами данных, по которым ведётся расчёт. Для работы с ними, была предложена «Dynamic Harmonic Regression» модель, или DHRmodel (Yong, Pedregali др., 1999). Она позволяет получить данные интерполяции в пропусках, а значит исследовать сезонные эффекты ряда.

На основе указанной теории, по всему миру было проведено множество практических работ по расчёту потоков. Одна из них, проведена и описана в статье «Тепловой поток, рассчитанный по одноуровневой температуре воздуха вблизи поверхности земли», написанной американскими учёными из Массачусетса (Wang, Brasi др., 2004). В ней представлен новый метод оценки потока тепла в почву. Так же показано аналитическое решение уравнение теплопроводности с переменным коэффициентом упругости, для получения градиентов температур. В основе данного метода лежит одномерное уравнение диффузии, предложенное Блумелом (Blumel, 1998), представленное формулой 20:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left(K_h \frac{\delta T}{\delta z} \right) \quad (20)$$

где, T – температура воздуха, K_h - коэффициент вихревой диффузии, z – высота, t – время. После всех преобразований, уравнение теплового потока в данном методе имеет вид (формула 21):

$$Q(z_m, t) = -\rho c_p K_h \left. \frac{\delta T}{\delta z} \right|_{z_m} = \rho c_p \frac{\delta}{\delta t} \left[\int_0^t ku * (\tau) (T(z_m, \tau) - T_0) \cdot I \left(\int_{\tau}^t \frac{ku * (s) ds}{4(z_m - d_0)} \right) d\tau \right] \quad (21)$$

Где ρ – плотность воздуха, c_p – константа давления, τ и s – переменные интегрирования.

Последний из методов в блок-схеме, метод, основанный на использовании интеграла Дюамеля. Расчёт при помощи этого метода сложен, и в данной работе не приводится.

Среди описанных подходов, в качестве расчётных методов для дальнейшего исследования, мною были выбраны методики проф. Русина И.Н. и Архангельской Т.А. по некоторым причинам. Во-первых, самым главным критерием выбора метода, являются

имеющиеся данные. В данной работе я использовал наблюдения за температурой почвы на разных глубинах по почвенным термометрам Савинова, с различными интервалами, а также измерения по агрометеорологическому комплексу, взятые из сертифицированной базы данных АМПАК. Во-вторых, указанные методы просты в использовании, и более универсальны.

В следующей главе, указанные методы будут описаны более детально. Описана стандартная методика расчёта теплового потока, принятая на сети станций Управления Гидрометеорологической службой Российской Федерации, и показана невозможность её использования в ряде экспедиционных наблюдений.

3. Методы расчета коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву

3.1. Методика восстановления потока тепла по стандартным метеорологическим наблюдениям, принятая на сети станций УГМС РФ

Деятельным слоем называется слой почвы или воды, температура которого испытывает суточные и годовые колебания. Исходя из наблюдений, на суше суточные колебания распространяются до глубины около 1-2 м, а годовые – на глубину в несколько десятков метров. В морях и океанах, мощность деятельного слоя в десятки раз больше, чем на суше. Далее рассмотрим стандартную методику обработки измерений. Здесь расчёт потоков тепла в почву основывается на измеренных данных по температуре почвы с глубиной и по времени, при не меняющихся теплофизических характеристиках почвы. Для более точного определения потока необходимо рассматривать весь слой почвы, в котором происходит изменение температуры. Однако, иногда для простоты ограничиваются лишь малым слоем, всего 20 см. В нём колебания температуры ещё не прекращаются, а основной теплообмен совершается в этом слое, за короткие интервалы между сроками наблюдения (Руководство, 1977).

Поток тепла за интервал между двумя соседними сроками в почву, вычисляется по результатам измерений влажности и температуры до глубины 80 см, и находится по формуле 22:

$$Q = \frac{c}{t} S, \quad (22)$$

где c - средняя теплоёмкость для слоя почвы толщиной 0-80 см, определяемая при учёте влажности почвы, t - интервал по времени, за который рассчитывается поток Q , а S_1 – величина, которая характеризует изменение температуры взятого слоя почвы за время t .

Если наблюдения проводят до глубины 20 см, то поток рассчитывают по формуле 23:

$$Q = \frac{c}{\tau} \left(S_1 - \frac{k}{Z_2 - Z_1} S_2 \right), \quad (23)$$

Где S_1 - величина, которая характеризует изменения температуры 20-сантиметрового почвенного слоя, за интервал τ , k – средний коэффициент температуропроводности верхнего 20-сантиметрового слоя почвы. Z_1 и Z_2 - фиксированные глубины этого

слоя, S_2 - величина, которая характеризует изменение разности температур во времени на глубинах Z_1 и Z_2 (Руководство, 1977).

Формула 2 имеет слагаемое S_2 , которое характеризует поток тепла в почве ниже уровня Z_1 и зависит от средней температуропроводности почвенного слоя до глубины Z_1 , и разности температур между глубинами Z_1 и Z_2 . При расчётах потока тепла на глубинах 5, 10, 15, и 20 см по данным о температуре, за Z_1 принимают глубину 10 см, а за Z_2 - 20 см.

Для расчёта потока тепла в почву непосредственно в сроки наблюдения, рассчитывается среднее из потоков за два соседних интервала примыкающих к сроку. Для примера возьмём срок 1 час, представленный формулой 24:

$$Q_{1ч} = \frac{G_1(22-1) + G_1(1-4)}{2}, \quad (24)$$

где $Q_{1ч}$ - искомый поток в срок измерения 1ч, $Q_1(22-1)$ и $Q_1(1-4)$ - средние потоки интервалов 22-1 и 1-4.

После получения Q за отдельные сроки высчитывается суточная сумма потока тепла в слое почвы. Для этого за все интервалы складывают S_1 и полученную сумму умножают на объёмную теплоёмкость.

При автоматической обработке данных наблюдений, и при более строгих оценках, поток тепла в почву определяют по полной формуле 2. Для этого необходимо вычислить величину S_2 и коэффициент температуропроводности K .

Величину S_2 для трёхчасового интервала определяют с помощью формулы 25:

$$S'_2 = 1,5(\Delta t'_1 + \Delta t'_2), \quad (25)$$

а для шестичасового интервала с помощью формулы 26:

$$S''_2 = 3,0(\Delta t'_1 + \Delta t'_2), \quad (26)$$

где $\Delta t'_1$ и $\Delta t'_2$ - разности температур между глубинами 10 и 20 см в последующий и предыдущий сроки наблюдения (Руководство, 1977).

Коэффициент температуропроводности a , показывает скорость распространения температурных колебаний в слое почвы. Его можно вычислить с помощью формулы 27:

$$K = \frac{M}{N}, \quad (27)$$

где M определяется с помощью формулы 28:

$$M = 26,67(0,06\Delta' t_0 + \Delta' t_5 + 1,62\Delta' t_{10} + \Delta' t_{15} + 0,06\Delta' t_{20}). \quad (28)$$

Здесь $\Delta't_0, \Delta't_5, \Delta't_{10}, \Delta't_{15}, \Delta't_{20}$ – разности температур на поверхности деятельного слоя и глубинах 5, 10, 15 и 20 см в сроки 19 и 7ч, или разности средних температур в эти же сроки за месяц или декаду, в зависимости для какого периода ведётся расчёт коэффициента температуропроводности.

Знаменатель N , в формуле 2. 6 вычисляется из формулы 29:

$$N = 6(0,5T_7 + T_{10} + T_{13} + T_{16} + 0,5T_{19}), \quad (29)$$

где T – величина, которое характеризует распределение температуры по глубине почвы во взятый срок. Её можно получить из формулы 30:

$$T = \frac{t_0 - t_{20}}{2} - t_{10}, \quad (30)$$

где – температура поверхности деятельного слоя и на глубинах 10 и 20 см во взятый срок.

Расчёт коэффициента a нельзя выполнить, если разность между температурами в 19 и в 7 ч для всех глубин будет менее 1 градуса.

Если измерения температуры почвы ведутся до глубины 80 см, то тепловой поток в почве может быть вычислен по изменениям теплосодержания деятельного слоя при помощи формулы 31:

$$Q = \frac{c}{\tau} \Delta t_{cp} h, \quad (31)$$

где – разность по всему слою средних температур в рядом стоящие сроки измерений, h – толщина почвенного слоя, в данном случае 80 см (Руководство, 1977).

Основными недостатками представленного метода являются: во-первых, слишком большой интервал наблюдений. За три часа происходит множество изменений поверхностной температуры, и температуры на глубинах, которые никак не учитываются. Во-вторых, на тепловой поток сильное воздействие оказывает влажность почвы. В данном методе нет учёта влажности при расчёте теплового потока и коэффициента температуропроводности. В-третьих, данная методика не позволяет получить исследуемые характеристики в реальном времени, и по современным метеорологическим приборам и датчикам. Результаты расчетов рассматриваются как средние за период не менее суток. Также, существенным недостатком является жесткая привязка к глубинам 5, 10, 15 и 20 см и времени стандартных метеорологических наблюдений. Поэтому нет возможности использовать данную методику в экспедиционных условиях, и для расчёта по данным иностранных станций, где используются другие глубины установки почвенных термометров.

3.2.Методика расчёта потока тепла и коэффициента температуропроводности при произвольном размещении почвенных термометров, предложенная проф. И. Н. Русиным

Одной из методик расчёта теплового потока при произвольном размещении почвенных термометров является метод, предложенный проф. И. Н. Русиным, позволяющий получить значения коэффициента температуропроводности и потока тепла при нестандартных условиях наблюдений, ход рассуждения и рабочие формулы которого представлены ниже.

За основу современных подходов к расчёту потока тепла в почву, взята общепризнанная концепция описания распространения тепла в почву, а именно модель теплообмена Фурье с постоянным коэффициентом температуропроводности, которая представлена формулой 32:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} (32)$$

где T - температура почвы, z - вертикальная координата, направленная от поверхности почвы вглубь, t – время, k - коэффициент температуропроводности (Русин, 2014).

Самое распространенное дополнительное предположение для расчета коэффициента k является использование частного решения уравнения (33) в форме тепловой волны с периодом P , который равен одним суткам, распространяющейся от одного уровня z_1 до другого уровня z_2 (формула 33):

$$\begin{aligned} T(z_i, t) &= T_m + A_i \sin \omega \times t + \varphi_i, i = 1, 2.. \\ A_2 &= A_1 \exp\left(-\frac{z}{d}\right), \varphi_2 = \varphi_1 - \frac{z}{d} \\ d &= \sqrt{2k/\omega}, \omega = \frac{2\pi}{P} \end{aligned} \quad (33)$$

Помножив обе части уравнения (3.11) на $(z - \xi)$, где ξ — некоторая фиксированная глубина, и воспользовавшись равенством представленным формулой 34:

$$\int_0^\zeta z - \xi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz = \xi \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=0} + T(t, 0) - T(t, \zeta) \quad (34)$$

получаем интегральное соотношение, в которое входит поток тепла на поверхности почвы(формулы 35, 36):

$$Q(t) = -k \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=0} \quad (35)$$

$$-\zeta Q + kT(t, 0) - T(t, \zeta) = \int_0^\zeta z - \xi \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (36)$$

После этого выберем два значения глубины ($\xi = h$ и $\xi = H$), которые удовлетворяют неравенству $h < H$, и запишем для них полученные интегральные соотношения, представленные формулами 37 и 38:

$$-hQ + kT(t, 0) - T(t, h) = \int_0^h z - h \frac{\partial T}{\partial z} dz \quad (38)$$

$$-HQ + kT(t, 0) - T(t, H) = \int_0^H z - H \frac{\partial T}{\partial z} dz \quad (38)$$

Для того что бы получить рабочие формулы, удобно выразить из этой системы линейных уравнений относительно Q и k , сначала выражение для потока тепла, представленного формулой 39:

$$Q = \int_0^H m(z) \frac{\partial T}{\partial t} dz + \frac{k}{(H-h)} T(t, h) - T(t, H) \quad (39)$$

$$m(z) = \begin{cases} 1, z \leq h \\ \frac{H-z}{(H-h)}, z > h \end{cases}$$

А после небольших преобразований выражение для K (формула 40):

$$K = \frac{\int_0^H H(z) \frac{\partial T}{\partial t} dz}{T(t, 0) - T(t, h) - \frac{h}{(H-h)} T(t, h) - T(t, H)} \quad (40)$$

$$u(z) = \begin{cases} z, z \leq h \\ \frac{H-z}{H-h}, z > h \end{cases}$$

Формулы (39) и (40) используются для расчёта мгновенных значений величин. Также нужно отметить, что вычисление коэффициента теплопроводности не представляется возможным, когда в слое почвы, в котором проводятся измерения, наблюдается изотермия. Но такие моменты, когда температура поверхности деятельного слоя близка к среднесуточной температуре, наблюдаются не чаще двух раз в сутки и легко выявляются в процессе обработки и контроля данных. Для расчётов интегралов по глубине удобно использовать интерполяционный полином, построенный по данным измерений температуры на глубинах. В работе Цейтина (Цейтин, 1953) этот метод жестко привязан к фиксированным глубинам 5, 10, 15 и 20 см. Однако его можно обобщить так, чтобы была возможность использовать любую глубину (Русин, 2014).

Предположим, что измерения температуры проведены на поверхности деятельного слоя почвы ($z = 0$) и на n глубинах (z_1, \dots, z_n). В качестве примера используем $n=4$. Тогда коэффициенты a_i интерполяционного полинома(формула 41):

$$f(z) = \frac{\partial T(z)}{\partial t} = \sum_{i=0}^{i=n} a_i z^i \quad (41)$$

можно записать в виде решения линейной системы уравнений, представленной формулами 42-44:

$$M * \vec{a} = \vec{f} \quad (42)$$

$$M = \begin{matrix} 1 & z_1 & z_1^2 & z_1^3 & z_1^4 & a_0 & f(z_1) \\ 1 & z_2 & z_2^2 & z_2^3 & z_2^4 & a_1 & f(z_2) \\ 1 & z_3 & z_3^2 & z_3^3 & z_3^4 & a_2 & f(z_3) \\ 1 & z_4 & z_4^2 & z_4^3 & z_4^4 & a_3 & f(z_4) \\ 1 & z_5 & z_5^2 & z_5^3 & z_5^4 & a_4 & f(z_5) \end{matrix} \quad \vec{a} = a_2, \vec{f} = f(z_3) \quad (43)$$

$$\vec{a} = M^{-1} * \vec{f} \Rightarrow a_i = \sum_{k=1}^{k=5} m_{i,k} f(z_k) \quad (44)$$

$$M^{-1} = \{m_{i,k}\}$$

Помимо очевидных рабочих обозначений, здесь введено обозначение $m_{i,k}$ для элементов обратной матрицы Вандермонда, которая построена по заданным глубинам наблюдений. Использование этих коэффициентов даёт получить интегралы по глубине деятельного слоя в виде сумм, представленных формулами 45-48:

$$\int_0^H m z \frac{\partial T}{\partial t} dz = \sum_{k=1}^{k=5} C_k \frac{\partial T}{\partial t} (z_k), \quad (45)$$

$$C_k = \frac{H^2}{H-h} \sum_{i=0}^{i=4} \frac{m_{i,k} H^i}{(i+1)(i+2)} \left[1 - \left(\frac{h}{H}\right)^{i+2} \right], \quad (46)$$

$$\int_0^H H z \frac{\partial T}{\partial t} dz = \sum_{k=1}^{k=5} D_k \frac{\partial T}{\partial t} (z_k), \quad (47)$$

$$D_k = \frac{h H^2}{H-h} \sum_{i=0}^{i=4} \frac{m_{i,k} H^i}{(i+1)(i+2)} \left[1 - \left(\frac{h}{H}\right)^{i+1} \right]. \quad (48)$$

Формулы (39), (40) и (43) позволяют провести все необходимые нам расчеты для произвольного количества уровней измерений по глубине, находящихся на различном расстоянии друг от друга. Если число точек по глубине отличается от пяти, как было в примере, то следует изменить порядок полинома и матрицу (3.22). Применяя формулы (39) и (40), необходимо отличать случаи, расчет потоков которых ведется в реальном времени и если обработка измерений проводится по уже сформированному ряду наблюдений. В первом примере придётся использовать только прошлые значения температуры и более большие формулы направленных разностей второго и выше порядков аппроксимации. В другом случае лучше всего использовать прошлые и будущие значения температуры и использовать для определения производных по времени симметричные центрально-разностные аппроксимации. Далее представлены рабочие формулы для определения коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву на основе полностью сформированного ряда наблюдений и использования центрально-разностной аппроксимации производной температуры по времени, представленных формулами 49 и 50:

$$K = \frac{\frac{1}{2\Delta} \sum_{k=1}^{k=5} D_k T_k(t+\Delta) - T_k(t-\Delta)}{T(t_i, D) - T(t_i, h) - \frac{h}{(H-h)} T(t_i, h) - T(t_i, h)}, \quad (49)$$

$$Q = \frac{1}{2\Delta} \sum_{k=1}^{k=5} C_k T_k(t + \Delta) - T_k(t - \Delta) + \frac{k}{(H-h)} T(t_i, h) - T(t_i, H). \quad (50)$$

Несмотря на то, что структура формул представляется довольно громоздкой, расчет по ним не так сложен. В работе он осуществлялся по специально разработанной программе, хранящейся в файле пакета EXCEL. По глубинам установки термометров необходимо построить матрицу (3.22) и обратиться к ней при помощи доступной вычислительной программы. После этого, задав в качестве значения H самую большую глубину установки термометров, а в качестве значения h — глубину установки термометра, ближайшую к $H/2$, нужно по формулам (46, 48) вычислить коэффициенты $C(z_k)$ и $D(z_k)$. Эти коэффициенты подставляются в формулы 49 и 50 и рассчитывается коэффициент температуропроводности, и тепловой поток для каждого срока наблюдений (Русин, 2014).

3.3. Методика, основанная на использовании конечно-разностного аналога, описанная в работах Архангельской Т.А.

Альтернативой лабораторным методам служит расчетное определение температуропроводности почвы на основе полевых данных о динамике температуры в почвенном профиле. Аналитический способ расчетов основан на использовании первого закона Фурье и может быть использован в случае, когда колебания температуры почвы имеют гармонический характер. Расчетные уравнения имеют вид представленных формулами 51 и 52 :

$$K = \frac{\pi d^2}{\tau} \quad (51)$$

$$d = \frac{z_2 - z_1}{\ln\left(\frac{T_{Az1}}{T_{Az2}}\right)} \quad (52)$$

где K – коэффициент температуропроводности почвы, d – глубина затухания температурной волны, τ - период колебаний температуры, z_1 и z_2 - глубины, на которых измеряется температура почвы, T_{Az1} и T_{Az2} - амплитуды колебания на этих глубинах (Архангельская, 2012).

Второй способ расчетного определения температуропроводности почвы по полевым данным сводится к численному нахождению коэффициента температуропроводности, исходя из конечно-разностного аналога уравнения теплопроводности, и предполагает, что распределение температуры в почвенном профиле известно на двух шагах по времени. Используются данные об изменении температуры однородного слоя почвы толщиной $2h$ в течение промежутка времени δt . Описывается формулой 53:

$$K = \frac{h^2}{\delta t} * \frac{T_4 - T_2}{T_3 + T_1 - 2T_2}, \quad (53)$$

где T_1 , T_2 и T_3 – температура почвы на верхней границе выделенного слоя, в его середине и на нижней границе, измеренная одновременно; T_4 – температура середины слоя через время δt .

Температуропроводность почвы связана с ее основными свойствами весьма сложным образом. Это объясняется тем, что по отношению к температуропроводности основные свойства почвы действуют как комплекс факторов, усиливая, либо ослабляя друг друга, причем в разных диапазонах влажности по-разному. На температуропроводность влияют плотность почвы, ее гранулометрический состав, содержание и качество гумуса, подвижность почвенной влаги. Подвижность влаги зависит от ее количества, а также от характера взаимодействия твердой части почвы с водой, которая определяется строением порового пространства, составом почвенного раствора, степенью гидрофильности органических пленок и минеральной матрицы и другими факторами (Архангельская, 2012).

Однако по приведённой выше расчетной формуле были получены результаты при разных значениях увлажнения почвы. Это позволило Архангельской Т.А. получить экспериментальные зависимости температуропроводности от влажности, представленные формулой 54:

$$k = k_0 + a \exp \left[-0.5 \left(\frac{\ln \frac{\theta}{\theta_0}}{b} \right)^2 \right] \quad (54)$$

где θ - влажность почвы, k - соответствующая ей температуропроводность, k_0 , a , θ_0 , и b – параметры кривой. Эти параметры имеют ясный физический смысл: k_0 – температуропроводность сухой почвы; θ_0 - влажность, при которой достигается максимум температуропроводности; $k_0 + a$ – максимальная температуропроводность при $\theta_0 = \theta$.

Параметр b характеризует ширину пика кривой $k(\theta)$ и определяется диапазоном влажности, в котором происходит активный термоперенос почвенной влаги. Чем меньше параметр b , тем сильнее выражена S-образность кривой. Таким образом, параметры предложенной аппроксимации позволяют численно охарактеризовать не только пределы изменчивости температуропроводности изученных горизонтов с влажностью, но и форму полученных кривых (Архангельская, 2012).

4. Основные приборы и источники получения данных, для проведения исследований.

4.1. Почвенные термометры Савинова

На сети станций УГМС РФ, до сих пор используются коленчатые термометры Савинова, для наблюдения за температурой почвы на разных глубинах, и определения коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву за различные сроки. Нами были использованы данные приборы при проведении наблюдений за летний период 2019 года.

Термометры служат для измерения t почвы на глубинах 5, 10, 15, 20 см на оголенном участке в сроки через 3 часа. Термометры используются только при положительной температуре. По конструкции термометры почти такие же как напочвенные. Термометры отличаются только тем, что их нижние концы изогнуты под углом 135° . Термометры имеют шкалу от -10 до $+50$. Термометры устанавливаются на середине оголенного участка с возрастанием глубин с востока на запад. Расстояние между термометрами 10 см. Для установки термометров выкапывают яму. Стенка ямы направленная на север должна быть вертикальна. В этой стенке на глубинах 5, 10, 15, 20 см с помощью металлического предмета делают небольшие углубления, в которых устанавливаются термометры. Затем яму засыпают землей и с помощью треугольника с углом 45° проверяют наклон термометра относительно поверхности почвы. Термометры засыпаются землей до отметки на термометре.

Измерения по термометрам производятся в следующей последовательности: Сначала отпускают трап на оголенный участок. Наблюдатель подходит к термометрам и проверяет внешнее состояние и уровень почвы относительно термометру.

Отсчеты снимают по термометрам по порядку возрастания глубин, с точностью до 0,1⁰С. Отсчеты записывают в книжку КМ-3, по таблице для термометров определяют поправки и вводят их в отчеты.

4.2. Автоматический мобильный полевой агрометеорологический комплекс (АМПАК)

При получении экспериментальных данных, был использован агрометеорологический комплекс, созданный на базе Агрофизического института. В основах его работы лежит идея поддержания оптимальной обеспеченности влагой корневого слоя почвы. Избыточное или недостаточное количество воды негативно отражается на вегетативном процессе и на последующем урожае. Необходимо распределять полив так, что бы растение было максимально обеспечено в момент, когда оно наиболее чувствительно к высыханию почвы (Ефимов, Ситдикова и др., 2013).

Оптимизация использования водных ресурсов с применением компьютерных технологий является важнейшей тенденцией орошаемого земледелия. Автоматизация определения норм и сроков полива позволяет осуществлять дистанционное управление режимом орошения, повышая экономическую эффективность сельского хозяйства.

В процессе проведения наблюдений, прибором с интервалом 90с. Измеряются следующие физические величины: аэродинамическая температура (датчик HEL-705-U-1-12-C2, Honeywell International, Inc.) и влажность воздуха (датчик ННН-4602-С, Honeywell International, Inc) на двух высотах, атмосферное давление (MPX4115AP, Honeywell International, Inc.), скорость ветра на высоте 2м (датчик Windgeschwindigkeitssensor, ННМ), радиометрическая температура над растительностью и над почвой (датчик Optris GmbH, СТ LT), радиационный баланс поверхности (Балансомер, АФИ), суммарная радиация (Пиранометр Янишевского), объемная влажность почвы на глубине 5 см (датчиком Decagon Devices 10HS) и температуры почвы на разных глубинах (датчик HEL-705-U-1-12-C2, Honeywell International, Inc.). Данные отображаются в виде численных значений, графиков и гистограмм и накапливаются в базу данных за весь вегетационный период (Козырева, Ефимов и др., 2016).

АМПАК реализует алгоритм расчета биологического водопотребления исходя из потребностей роста и развития посевов. Исходной информацией для алгоритма являются метеопараметры собираемые АМПАКом на сельскохозяйственном поле: температура и относительная влажность воздуха, скорость ветра, атмосферное давление, температура и радиационный баланс подстилающей поверхности. А также информация о фенологическом развитии посева, которая заносится вручную: высота, сомкнутость покрова посевов, дата посадки.

Далее будет рассмотрен процесс получения данных и работы с АМПАК. В самом начале, необходимо установить на доступный ПК, клиентское приложение АМПАК. После этого, можно приступать к работе. Необходимо установить прибор в месте проведения наблюдений. Для этого, устанавливается стойка, на которую вешаются датчики температуры и влажности воздуха (на уровне 1,9м), датчик температуры подстилающей поверхности (высота установки выбирается исходя их высоты растений), датчик скорости ветра (на высоте 2м). Помимо этого, рядом устанавливается пиранометр, а в почву ставят датчик объёмной влажности, и три датчика температуры на разные глубины, исходя из проводимых работ. После этого, прибор включают. Соединение ноутбука с АМПАК, идёт посредством подключения по сети WiFi. В доступных сетях на ПК, выбираем сеть Ампак, и подключаемся к ней. Далее устанавливаем время, посредством дополнительного приложения «DataSetTime». После этого, запускаем клиентское приложение АМПАК. Далее выбираем «запустить цикл измерений». С этого момента прибор начинает свою работу. После выполнения необходимого цикла измерений, необходимо остановить наблюдения. Для этого выбираем кнопку «остановить цикл измерений». Далее сохраняем полученный результат. Данные измерений сохраняются в указанную папку в csv формате Excel. После этого, с ними можно работать.

4.3.Сайты с массивами данных

Архивы срочных метеорологических данных находятся в свободном доступе в сети интернет на различных сайтах. Например, для нашей страны их можно найти на сайте ВНИИГМИ-МЦД - www.meteo.ru, либо на ресурсах в открытом доступе архивов прошедшей погоды, www.rp5.ru. Для иностранных станций, такие данные предоставляются так же в открытом доступе на сайте Национального центра климатических данных: www ftp.ncdc.noaa.gov.

В моей работе, использовались данные срочных наблюдений, и был скачан архив с сайта www.rp5.ru. Далее будет рассмотрен процесс получения этого архива метеорологических данных. В самом начале необходимо перейти на сайт www.rp5.ru. После этого, необходимо выбрать населенный пункт, исследуемой территории либо интересующую Вас метеорологическую станцию. В моём случае, это была станция Белогорка. После выбора станции, необходимо перейти на вкладку «Архив погоды на метеостанции». Далее выбираем «Скачать архив погоды». После этого необходимо выбрать интересующий диапазон дат, так же выбрать формат для скачивания. Далее выбираем «Выбрать в файл GZ». Затем данные будут доступны для загрузки.

5. Исследование теплофизических свойств почвы, на основе проведенных экспериментов

За всё время исследований, с помощью описанных в предыдущих главах методов и приборов, мною было проведено и рассчитано несколько экспериментов. Остановимся на каждом из них более подробно.

5.1. Эксперимент на примитивных почвах скалистого берега о-ва Валаам

Первым из проведенных экспериментов, была попытка расчёта коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву на скалистом берегу о-ва Валаам. Здесь мы столкнулись с тем, что почвенный слой очень тонок, около 15 см, и нет возможности применить методику, используемую на сети станций УГМС РФ. В соответствии с Руководством по теплобалансовым наблюдениям (Руководство, 1977) расчёт теплового потока идёт для слоя минимум 20 см, с установкой почвенных термометров на глубинах 5 см, 10 см, 15 см, и 20 см, и снятием измерений через каждые три часа. В случае, когда исследователь вынужден располагать термометры на других глубинах, или когда почвенный слой менее 20 см, нет возможности пользоваться стандартной методикой, поэтому данные наблюдения и расчёт потока тепла не проводят.

Для получения экспериментальных данных была использована стандартная методика наблюдений за температурой почвы на разных глубинах. Однако условия полигона, на котором проводились наблюдения, не позволяли использовать четыре почвенных термометра, поэтому было установлено три почвенных термометра Савинова, на глубинах 5, 10 и 15 см. Для изучения теплового режима, наиболее интересен тёплый период года, поэтому наблюдения проводились в летний период, с 10 июня по 1 августа 2018 года. В основе расчётов лежат наблюдения по температуре на разных глубинах почвы, с шагом по времени 3 часа. Также в формулах используются измеренные свойства грунта, а именно значение объёмной теплоёмкости, которая равнялась $1,51 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$.

В качестве методики расчёта по нестандартным наблюдениям, был использован метод И.Н.Русина, позволяющий рассчитать коэффициент температуропроводности, и поток тепла в почву, при произвольно выбранной глубине и времени наблюдений. Метод основан на общепринятой в настоящее время концепции описания распространения тепла в почву, а именно модель теплообмена Фурье с постоянным коэффициентом температуропроводности (Русин, 2014). Аналогичный подход, описывается в работах

Архангельской Т.А. для нахождения коэффициента теплопроводности для различных типов почв (Архангельская, 2012).

По ряду данных, полученных в результате указанных выше экспедиционных наблюдений, были проведены расчёты по методу (Русин, 2014). По результатам этих расчётов, были построены графики изменений коэффициента температуропроводности (рис. 2) и потока тепла в почву (рис.3):

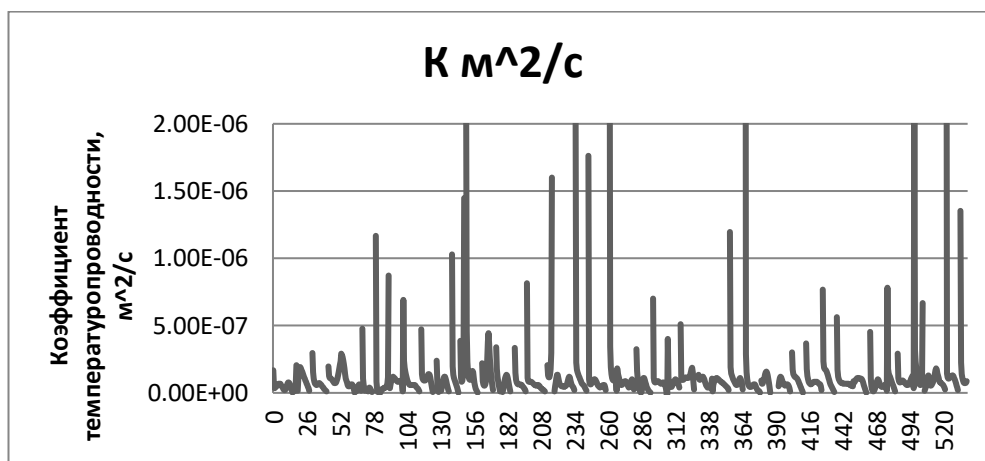


Рисунок 2. Изменение во времени коэффициента температуропроводности в поверхностном слое почвы о.Валаам в летний период.

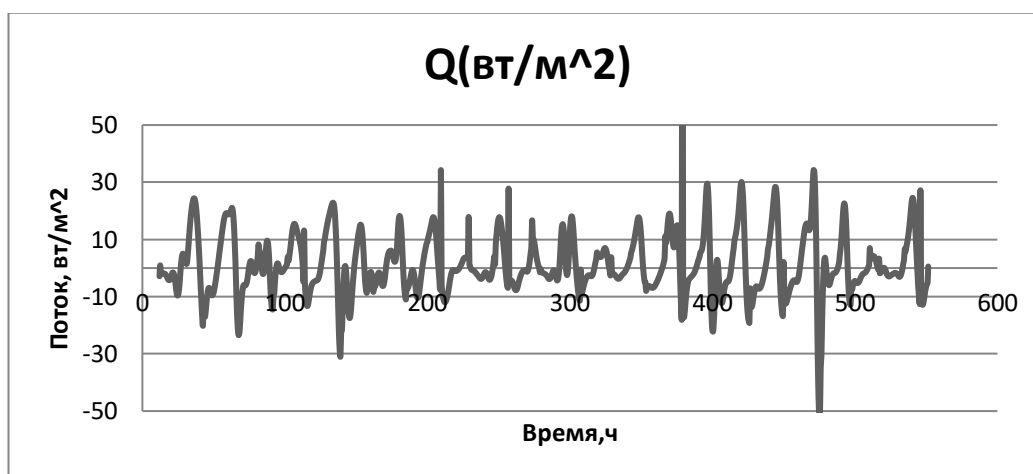


Рисунок 3. Изменение во времени потока тепла в почву в летний период на о. Валаам.

Как показывают рисунки, полученным значениям коэффициента присущи очень сильные выбросы, которые сказываются и на значениях потока. Для того, чтобы выяснить их причины, был проведён численный эксперимент. На основе компьютерного моделирования было рассчитано изменение температуры слоя почвы с постоянным коэффициентом теплопроводности от начального изотермического состояния под действием поверхностной температуры, изменяющейся с суточной и полусуточной

периодичностью. По этим результатам, округлённым сначала до $0,1^{\circ}\text{C}$, были отобраны значения температур на глубинах 0, 5, 10 и 15 см и составлены временные ряды с шагом 30 минут. По этим рядам были восстановлены значения потока тепла на поверхности почвы и коэффициента температуропроводности. Эти значения были сравнены с заданными при формулировке численного эксперимента коэффициентами температуропроводности и полученными аналитически потоками тепла у поверхности почвы.

Значения отклонений представлены на рисунке 4:

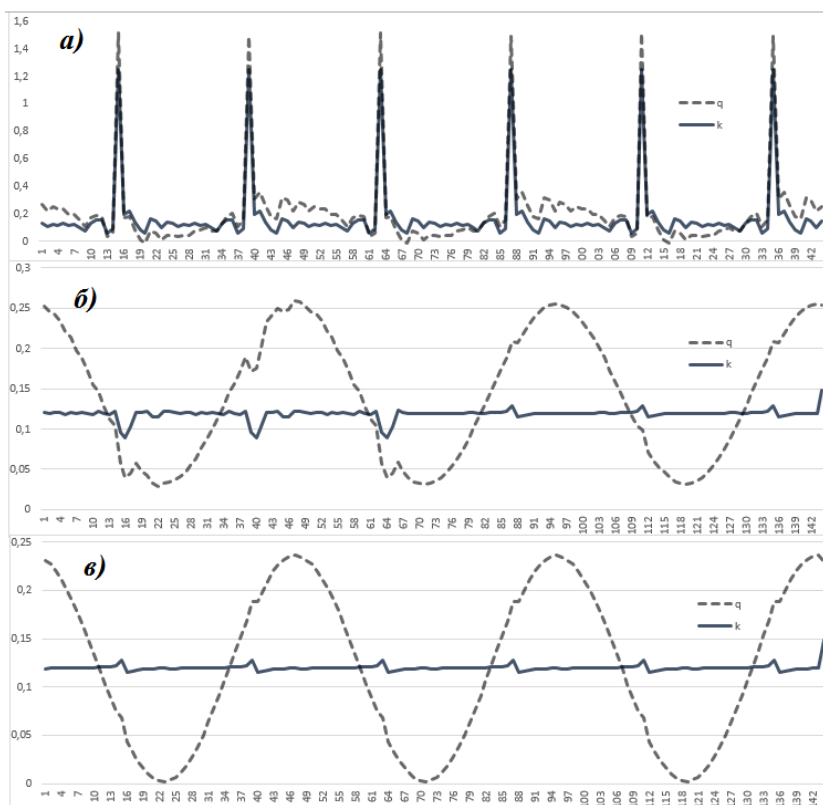


Рисунок 4. Значения потока тепла в почву и коэффициента температуропроводности, вычисленные по данным моделирования временного хода температуры почвы, округлённым: до десятых долей градуса- а, до сотых долей градуса- б, до тысячных долей градуса- в, по методу (Русин, 2014).

Как видно на рис. 4а, при расчёте возникают скачки коэффициента температуропроводности, похожие на те, которые наблюдались и в данных полевых наблюдений. В этом эксперименте значения температуры были округлены с сохранением одного десятичного знака. Поскольку таких скачков не наблюдалось при восстановлении потоков по исследуемому методу при использовании всей возможной компьютерной точности, было выдвинуто предположение, что они исчезнут при большей точности измерений. На рис. 4б приведены результаты, полученные по данным, округлённым до

сотых, а на рис. 4в – результаты по данным, округлённым до тысячных долей. Видно, что выбросы коэффициента с повышением точности данных по температуре убывают. Оставшиеся «зубцы» на временном ходе коэффициента позволили провести анализ причин их возникновения. Оказалось, что они возникают в моменты, когда вертикальный профиль температуры оказывается близким к линейному, как это и было указано автором метода (Русин, 2014). Как известно, такие условия в суточном ходе температуры почвы могут возникать, по меньшей мере, два раза в сутки вблизи восхода и захода солнца (Романов, Русин, 2019). Поэтому скачки коэффициента почти не сказывались на значениях потока тепла в почву.

В результате эксперимента было замечено, что поток тепла в почву и коэффициент температуропроводности имеет хорошо выраженный суточный ход. Для доказательства, или опровержения этого утверждения, из имеющегося ряда данных, было выбрано несколько дней, и построено суточное изменение исследуемых параметров. Результаты представлены на рисунке 5а-г:

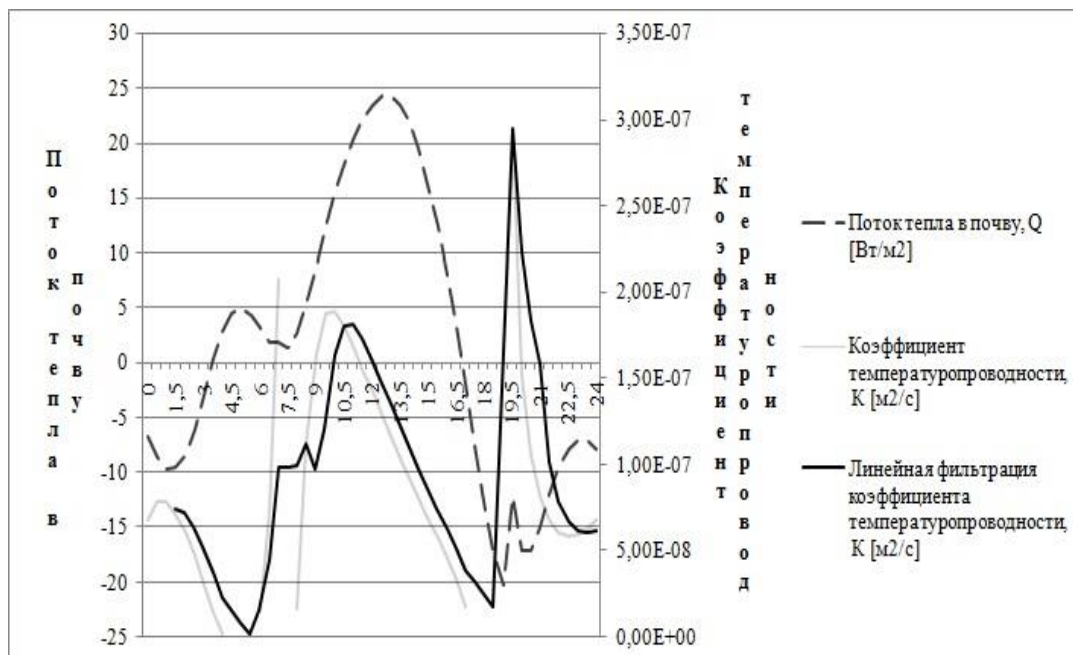


Рисунок 5а. Суточный ход коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву за произвольный день наблюдений

На рисунке четко просматривается рост потока тепла и коэффициента температуропроводности в утренние и вечерние часы и максимальные значения около полудня.

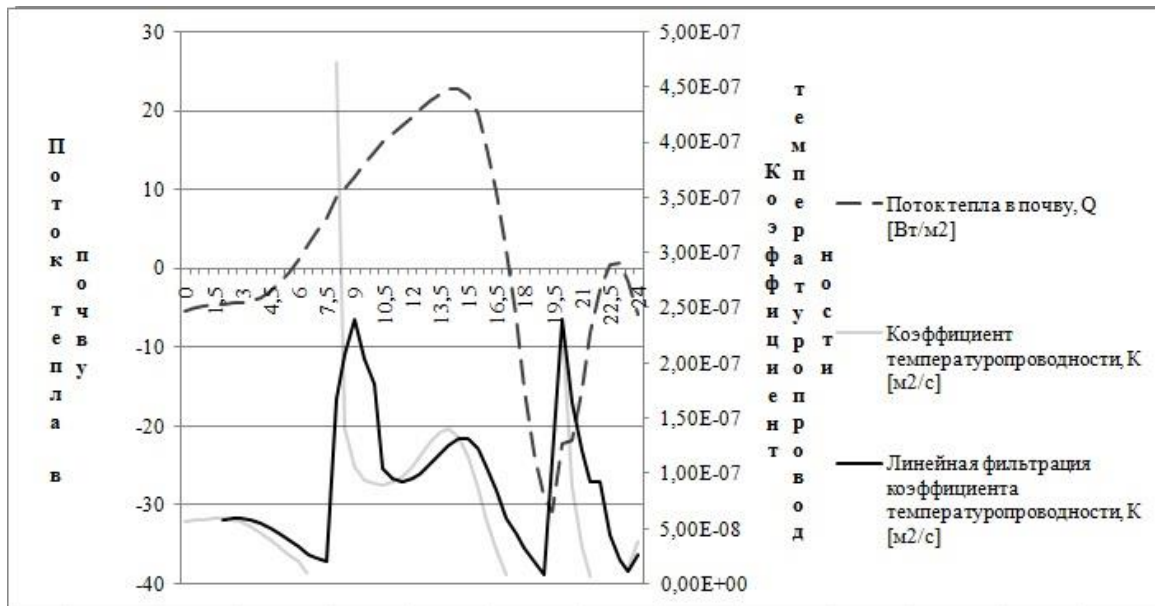


Рисунок 5б. Суточный ход коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву за произвольный день наблюдений.

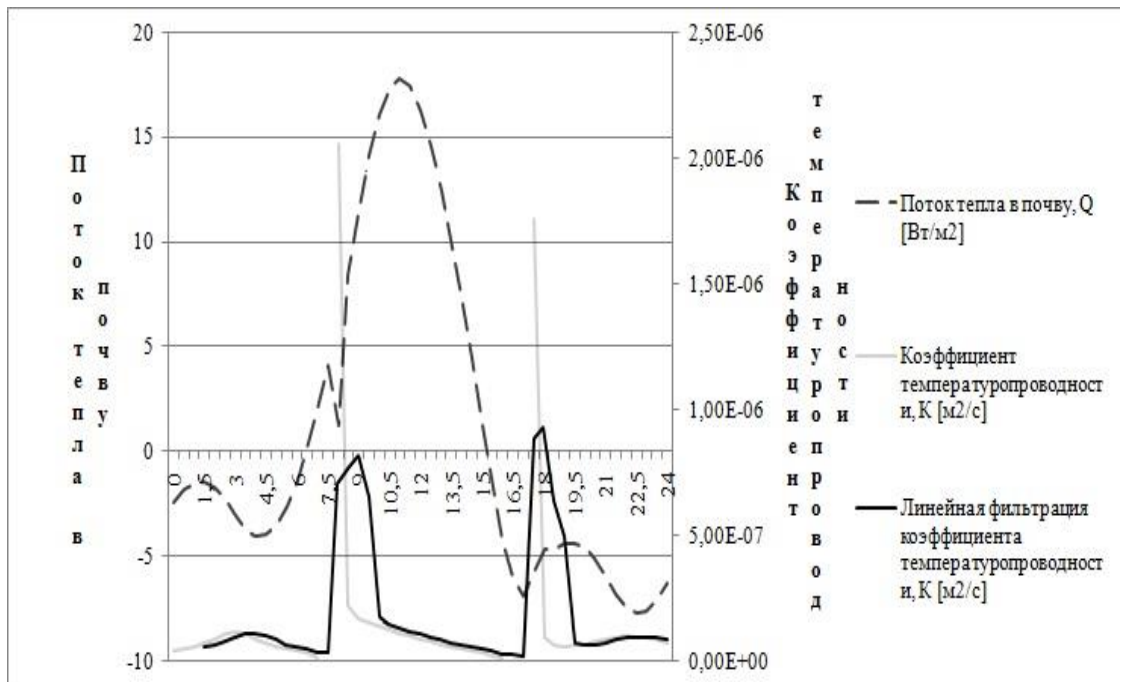


Рисунок 5в. Суточный ход коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву за произвольный день наблюдений.

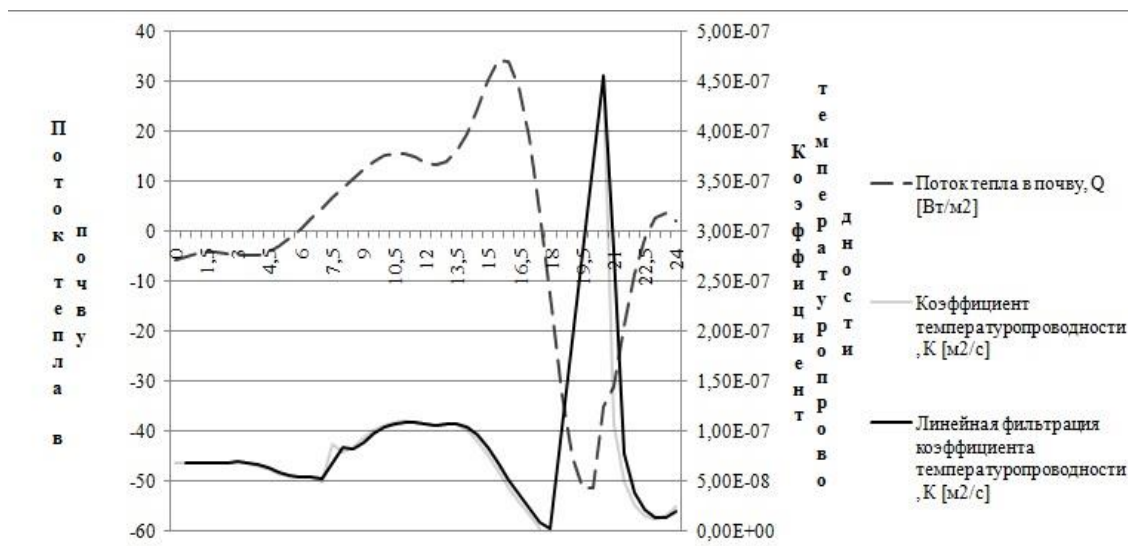


Рисунок 5г. Суточный ход коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву за произвольный день наблюдений.

Для каждого из произвольно выбранных дней наблюдений, виден примерно одинаковый суточный ход исследуемых параметров. В утренние и вечерние часы, поток тепла в почву растёт, днём и ночью падает. Примерно тот же ход можно наблюдать и с коэффициентом температуропроводности.

Помимо этого, было замечено, что изменения коэффициента температуропроводности в некоторых случаях физически объяснить очень сложно. Предполагается, что на него существенное влияние может оказывать влажность почвы и её изменчивость. Для подтверждения, или опровержения данного предположения, нами был проведен следующий эксперимент на сухом и влажном песке. Помимо этого, вместо использования почвенных термометров Савинова, для повышения точности, и избавления от указанных выше недостатков, был использован Автоматический мобильный полевой агрометеорологический комплекс (АМПАК), описанный в предыдущих главах.

5.2. Эксперимент на сухом и влажном песке

Для получения данных для расчета, был проведён эксперимент на сухом и влажном песке, с использованием автоматизированного мобильного полевого комплекса (АМПАК). Такой тип почвы был выбран для того, что бы исключить влияние разного рода включений на результаты измерений. Местом проведения исследований был выбран песчаный пляж оз.Суздальское г.Санкт-Петербурга. Температурные датчики располагались на глубинах 5, 10, 15 см, и на поверхности почвы. Эксперимент длился с

8:48 до 13:00 часов. Методиками расчета были выбраны два метода, первый, предложенный Архангельской Т.А., позволяет получить коэффициент температуропроводности по наблюдениям за температурой на разных глубинах. Второй метод, предложен проф. И.Н Русиным, для независимых от глубины и дискретности данных наблюдений. Этот метод заключается в получении коэффициентов температуропроводности и теплопроводности, а также потока тепла в почву, по данным наблюдений за температурой на различных глубинах и поверхности почвы.

Перед началом расчёта, был построен ход температуры почвы и на глубинах по данным наблюдений для сухого песка, представленный на рисунке 6:



Рисунок 6. Ход температуры почвы на поверхности и на глубинах

Здесь видно постепенное увеличение температуры вследствие суточного прогрева почвы. За этот срок, фактическая погода представляла собой безоблачное небо. Скорость ветра 3-5м/с., температура воздуха около 12⁰С.

Для влажного песка, график временного распределения температуры представлен на рисунке 7:



Рисунок 7. Ход температуры почвы на поверхности и на глубинах

На обоих графиках видно, что температура каждого из слоёв повышается, что связано с суточным ходом температуры. Для случая, когда песок влажный, скорость прогрева почвы существенно ниже, чем для случая сухого.

После этого, по двум частям эксперимента был произведён расчет коэффициента температуропроводности по двум методам, описанным в предыдущих главах. По полученным данным, были выстроены графики хода коэффициента при расчёте по обоим способам. Для сухого песка, график хода коэффициента представлен на рисунке 8:

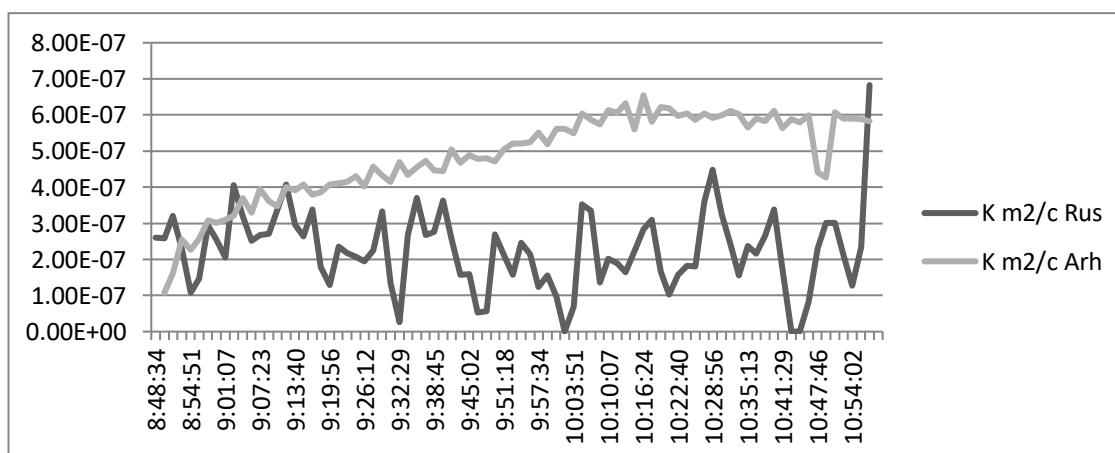


Рисунок 8. Ход коэффициента температуропроводности, рассчитанный по двум разным методам (Русин, 2014), (Архангельская, 2012), для сухого песка.

Исходя из полученного графика, мы видим, что по обоим методам получается разный ход коэффициента температуропроводности. Помимо этого, первый метод даёт несколько меньшие результаты, чем второй. Такая разница в результатах, объясняется следующим: расчёт по методу Архангельской, относится к глубине 10 сантиметров, то есть к середине слоя. В этом слое утром идёт ускоренное нагревание, а кривизна профиля температуры по вертикали меняется мало, по этой причине метод описанный Архангельской Т.А. показывает рост. Метод, предложенный проф. Русиным И.Н., относится ко всему слою, поэтому скорость прогрева почвы оказывается меньше, поэтому роста коэффициента не наблюдается. Сравнение методов указывает, что в дальнейшем важно изучать не только средний коэффициент для слоя, но и его вертикальный профиль.

Для влажного песка, также были получены значения коэффициента температуропроводности, и выстроен график хода этого параметра, который представлен на рисунке 9:

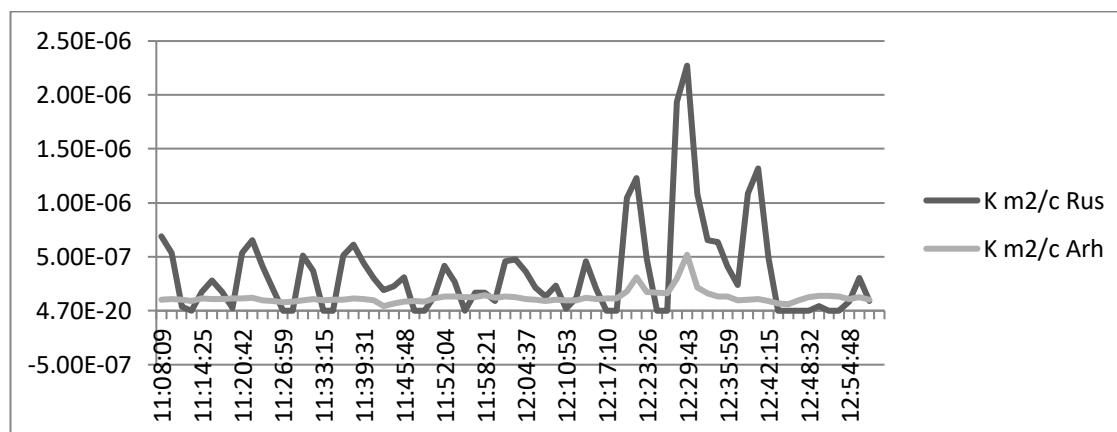


Рисунок 9. Ход коэффициента температуропроводности, рассчитанный по двум разным методам (Русин, 2014), (Архангельская, 2012), для влажного песка.

По графику видно, что, как и в случае сухого песка, ход коэффициента температуропроводности по двум методам различный. Первый метод расчета, имеет некоторые выбросы. Это можно объяснить теми же причинами, что и для предыдущего случая.

Описываемая Архангельской Т.А. методика, не позволяет получить поток тепла в почву. Поэтому, нами использовался метод (Русин, 2014), результаты расчёта по которому, для сухого и влажного песка представлены на рисунке 10:

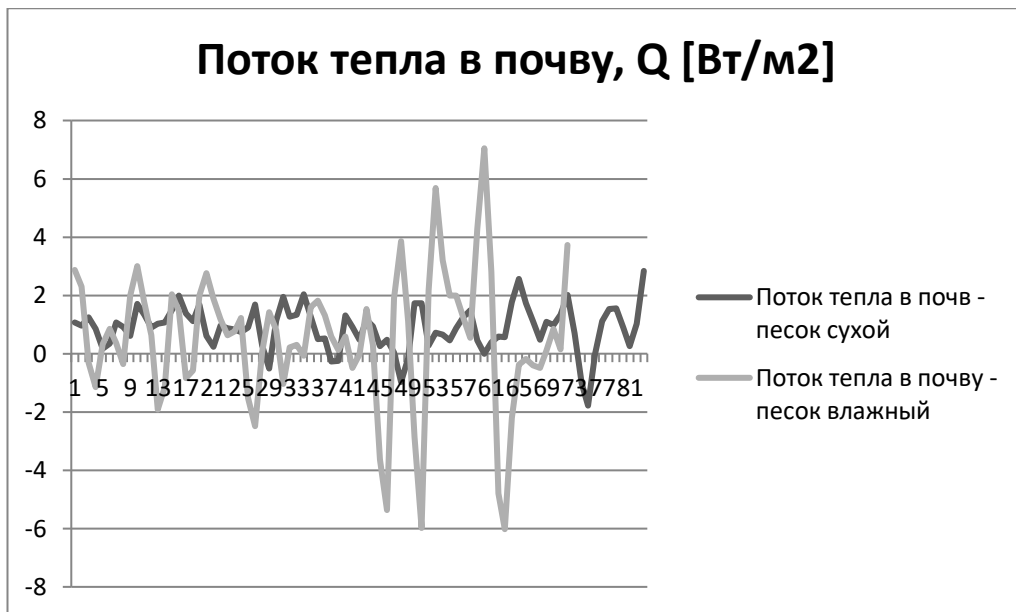


Рисунок 10. Поток тепла в почву, полученный методом предложенным проф. Русиным И.Н.

На всех графиках видно, что слишком высокая дискретность наблюдений приводит к пилообразным изменениям коэффициента. Для избавления от этого, полученные данные расчёта были усреднены за каждые 15 минут. В результате, ход коэффициента температуропроводности (рис.11) и потока тепла в почву (рис.12), методом (Русин, 2014), имеют вид:

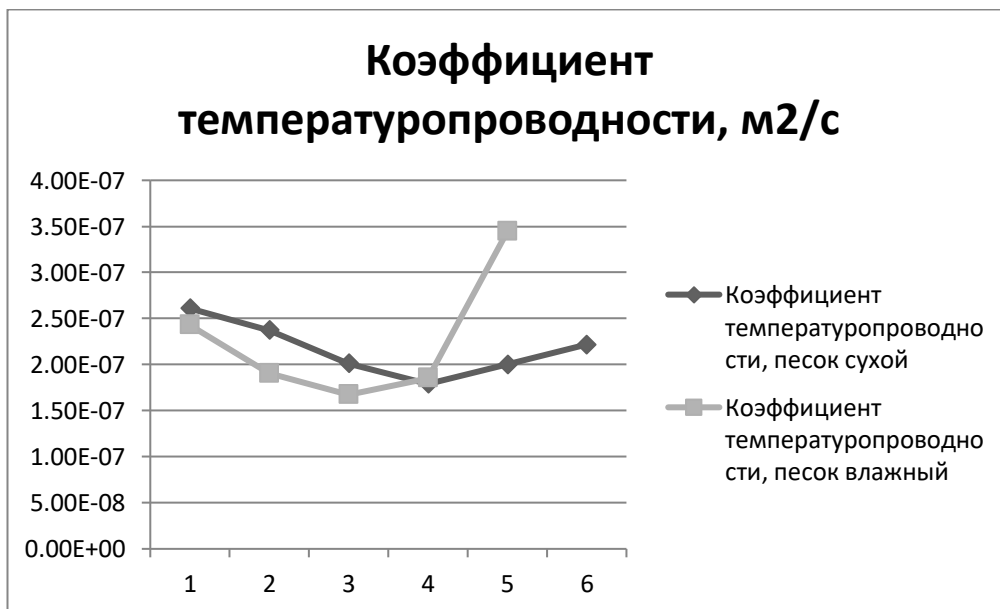


Рисунок 11. Коэффициент температуропроводности, с осреднением 15 минут.

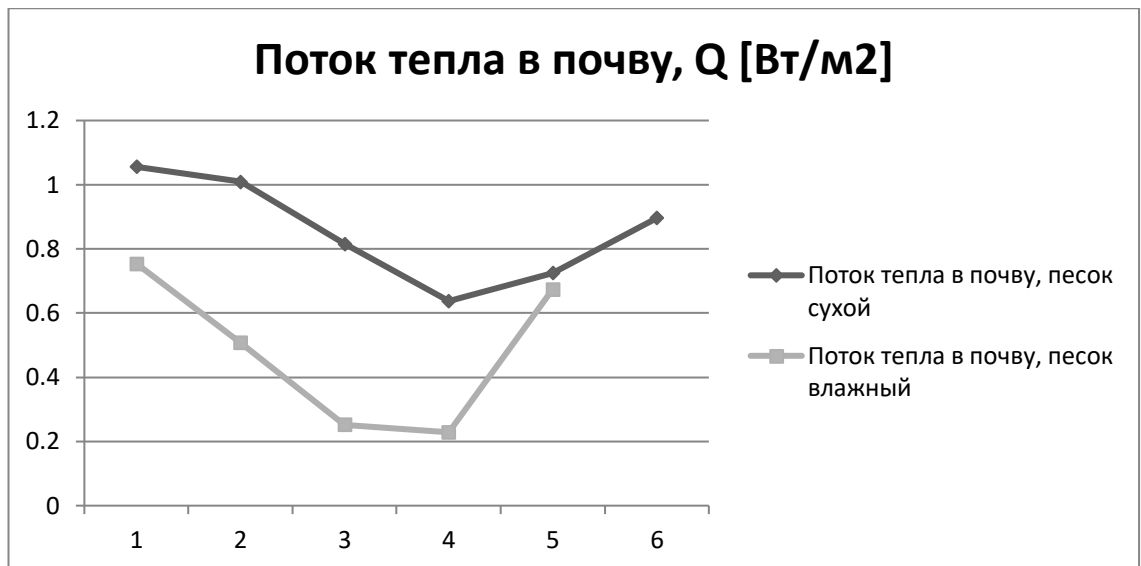


Рисунок 12. Поток тепла в почву с осреднением 15 минут.

На обоих графиках видно, что коэффициент температуропроводности и поток тепла в почву, в случае влажного песка меньше, чем сухого. Такой результат, можно объяснить ошибочной постановкой эксперимента. Измерения проводились на песчаном пляже в двух разных местах. Первое находилось на возвышении, песок был полностью сухой. Второе в низине, рядом с выходом грунтовых вод. Скорее всего, влияние грунтовых вод было настолько велико, что потоки сразу же затухали, и поток тепла с коэффициентом температуропроводности, сильно занижены. Учитывая ошибки данного эксперимента, за летний период 2019 года, нами был проведен ряд экспериментов на опытной станции пос.Меньково Агрофизического Института. Все измерения проводились на одной площадке, в одинаковое время суток, но с изначально разной влажностью почвы. Результаты экспериментов приведены в следующем разделе.

5.3. Эксперименты, проведённые на опытной станции пос.Меньково за тёплый период 2019 года.

За тёплый период 2019 года, было проведено в общей сложности 4 эксперимента, 22.05.19, 03.07.19, 16.07.19 и 19.08.19, каждый из которых был направлен на изучение влияния влажности на поток тепла в почву, коэффициент температуропроводности. Также изучались процессы энерго- и массо-обмена, в которых были выбраны показатели: часть энергии, затраченной на испарение из оголенной почвы или с растительной поверхности, отношение Боуэна (реального испарения к турбулентному потоку). Три эксперимента проводились при одинаковой влажности почвы. Последний эксперимент, 19.08.19

проводился с дополнительным увлажнением пятисантиметрового слоя почвы. Вода вносилась каждые 30 минут. Данные экспериментов были использованы для расчета коэффициентов теплопроводности и потока тепла в почву, по методике предложенной Русиним И.Н, по формулам (28-29). Использовались автоматически и синхронно измеренные температуры почвы на уровнях 5см, 10см, 15см; радиационной температуры поверхности, объёмной влажности почвы в слое 0–5см. Процентное содержание объёмной и органической фракции дерновоподзолистой почвы пос. Меньково принималась в расчетах равной 95,1%, 4,9% соответственно. Измерения необходимых параметров проведены в дневное время в течение нескольких часов. Рабочие формулы, используемые в расчётах в дополнение к указанным в предыдущих главах следующие:

Реальное суммарное испарение (ET_r) определяется как остаточный член из уравнения теплового баланса (Allen, Pereira и др., 1998), уравнение 55:

$$\lambda ET = R_n - H - Q \quad (55)$$

где λ – скрытая теплота парообразования, R_n – радиационный баланс, H – турбулентный поток тепла, Q – поток тепла в почву. Турбулентный поток тепла определяется с учетом стратификации приземного слоя воздуха и аэродинамических характеристик подстилающей поверхности. Поток тепла в почву рассчитывается через проективное покрытие. Подробно расчет суммарного испарения изложен в работе (Козырева, 2016). Основными составляющими теплового баланса являются потоки тепла и водяного пара (скрытое и явное тепло). Отношение этих потоков и есть отношение Боуэна, уравнение 56:

$$\beta = \frac{H}{\lambda ET_r} \quad (56)$$

В наших исследованиях потоки тепла и влаги рассчитываются полуэмпирическим методом с учетом стратификации приземного слоя воздуха. Среди самых широко используемых методик, основанных на отношении потоков используемых в моделировании энергетического баланса, выделяется такой показатель как доля энергии, затрачиваемая на испарение (EF) (Stuttleworth, Gurney и др., 1989). Отношение EF выражено зависимостью, уравнение 57:

$$EF = \frac{\lambda ET_r}{R_n - Q} \quad (57)$$

После определения методик расчёта, нами были получены, коэффициенты температуропроводности за каждый день эксперимента. Их временной ход представлен на рисунке13:

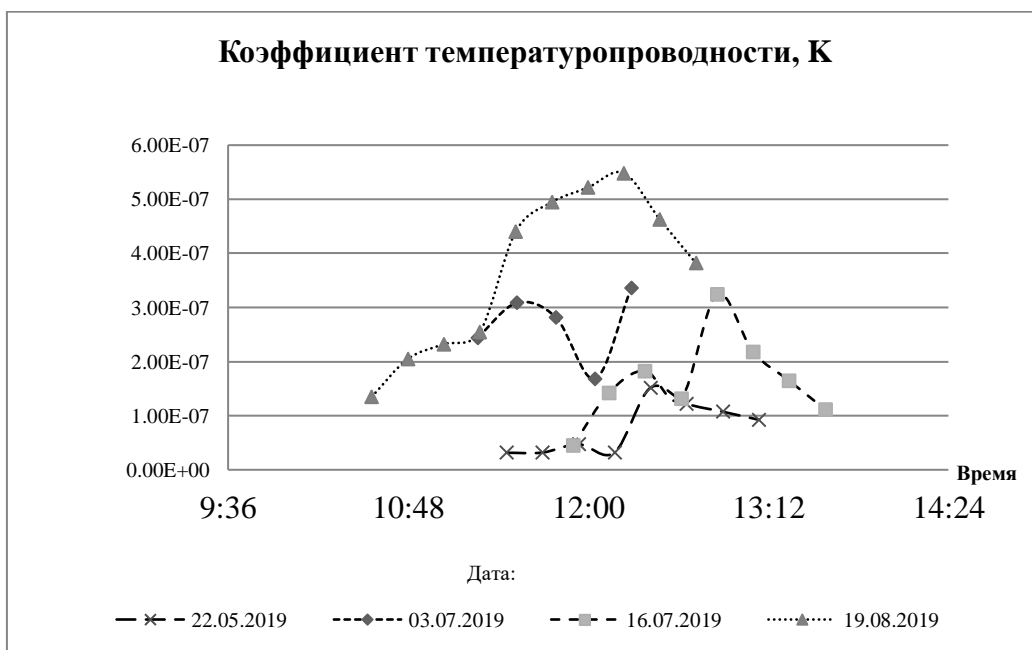


Рисунок 13. Динамика коэффициентов температуропроводности К, [м²·с⁻¹] за каждый день эксперимента.

По рисунку видно, что коэффициенты имеют схожий временной ход, у каждого из них наблюдается рост после полудня, что подтверждает выводы, сделанные в первом эксперименте о суточном ходе. Однако если смотреть на изменения коэффициента температуропроводности в день эксперимента, когда проводилось дополнительное увлажнение почвы (19.08.2019), видно более быстрое его увеличение. На основании этого, был сделан вывод о сильном влиянии влажности на коэффициент температуропроводности почвы. Для подтверждения этой гипотезы, была построена зависимость коэффициента температуропроводности от объёмной влажности на основе данных этого эксперимента, представленная рисунком 14:

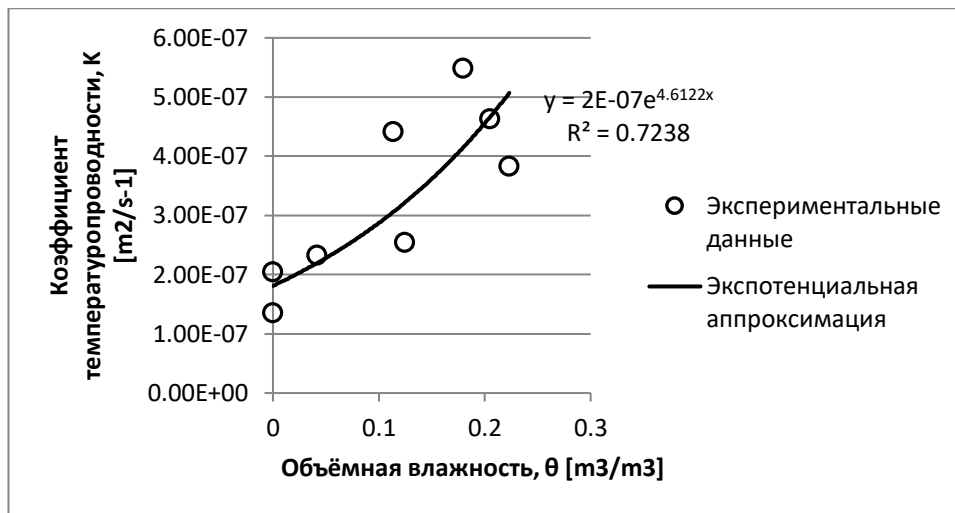


Рисунок 14. Регрессионная зависимость между коэффициентом температуропроводности и объёмной влажностью.

В соответствии с графиком, коэффициент корреляции равен 0.72, что говорит о прямой зависимости между объёмной влажностью, и коэффициентом температуропроводности. Это позволяет надеяться, что при получении к-та температуропроводности по температурным данным можно сделать и косвенную оценку увлажнения почвы, что может быть полезно для агрометеорологических исследований.

Подобный график был выстроен для потока тепла в почву. Временной ход исследуемого параметра за каждый из дней эксперимента, представлен рисунком 15:

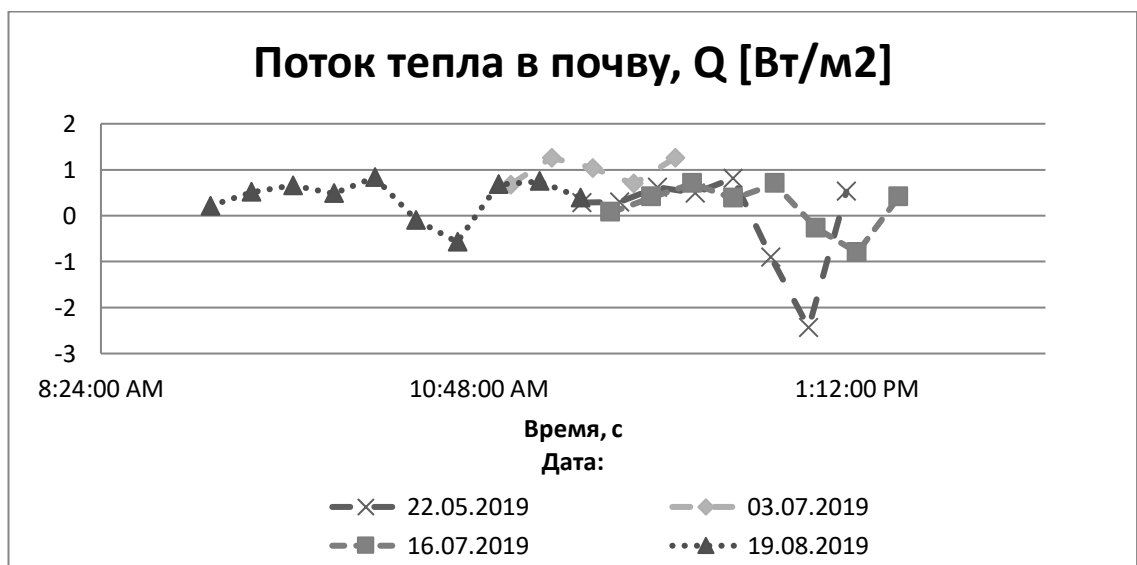


Рисунок 15. Динамика потоков тепла в почву, Q [Вт/м2] за каждый день эксперимента.

В соответствии с полученным графиком, существенных отличий изменения значений потока тепла в почву, несмотря на дополнительное увлажнение (19.08.2019) от других дней эксперимента, не выявлено. Эта интересная особенность потока тепла в почву нуждается в дополнительных исследованиях. Была проведена попытка нахождения связи объёмной влажности почвы и потока тепла в почву путём построения регрессионной зависимости. По полученным результатам, коэффициент корреляции получился 0.1, что говорит о слабой связи.

Для того чтобы с других позиций оценить влияние и взаимосвязь процессов переноса тепла и влаги в почве в наших исследованиях было выбрано отношение Боуэна, формула (56) и доля энергии, затраченной на испарение (EF), формула (57). На рисунке 16, показаны регрессионные зависимости отношения Боуэна (β) и доли энергии (EF), от объёмной влажности почвы (θ) в слое 0–5см с данными эксперимента 19.08.2019. Помимо этого, был выстроен график изменения числа Боуэна, и объёмной влажности почвы, представленный рисунком 17. На рисунке хорошо заметна связь влажности почвы и исследуемых параметров. Число Боуэна, рассчитанное для эксперимента с дополнительным увлажнением почв, 19.08.2019, при резком увеличении влажности, резко уменьшается (Доброхотов, Романов и др., 2020). Это значит, что испарение увеличивается больше, чем явный поток тепла, зависящий от разности температур почва-воздух.

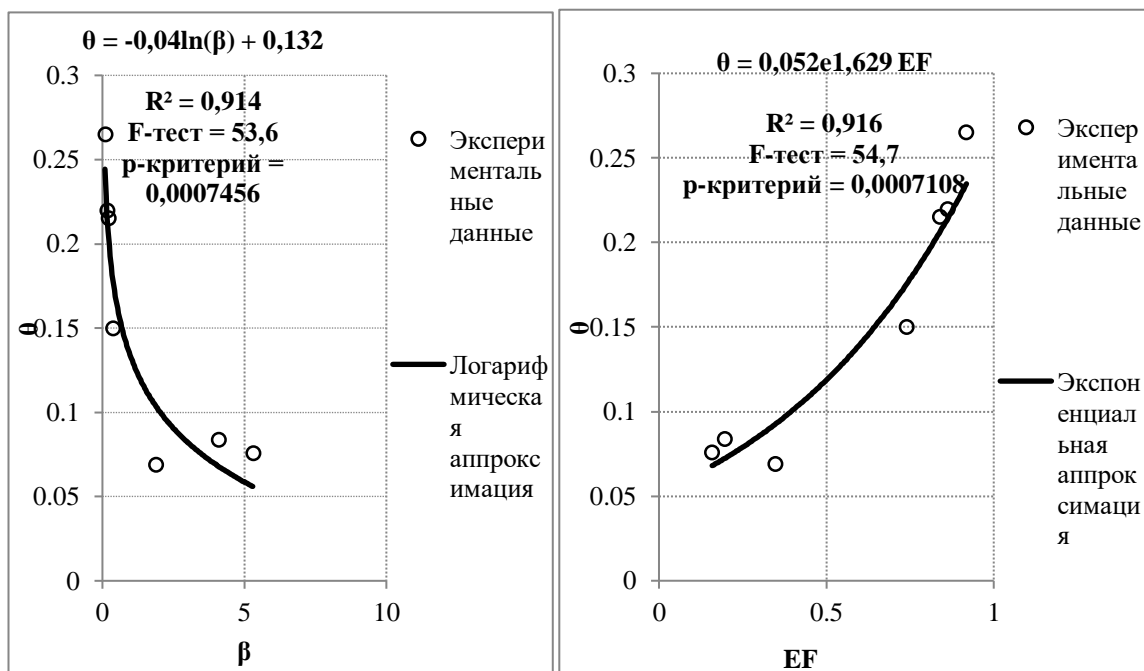


Рисунок 16. Диаграмма рассеяния и регрессионная зависимость между частью энергии, затрачиваемой на испарение (EF), отношением Боуэна (β) и объёмной влажностью почвы (θ , [$\text{м}^{-3} \cdot \text{м}^{-3}$]).

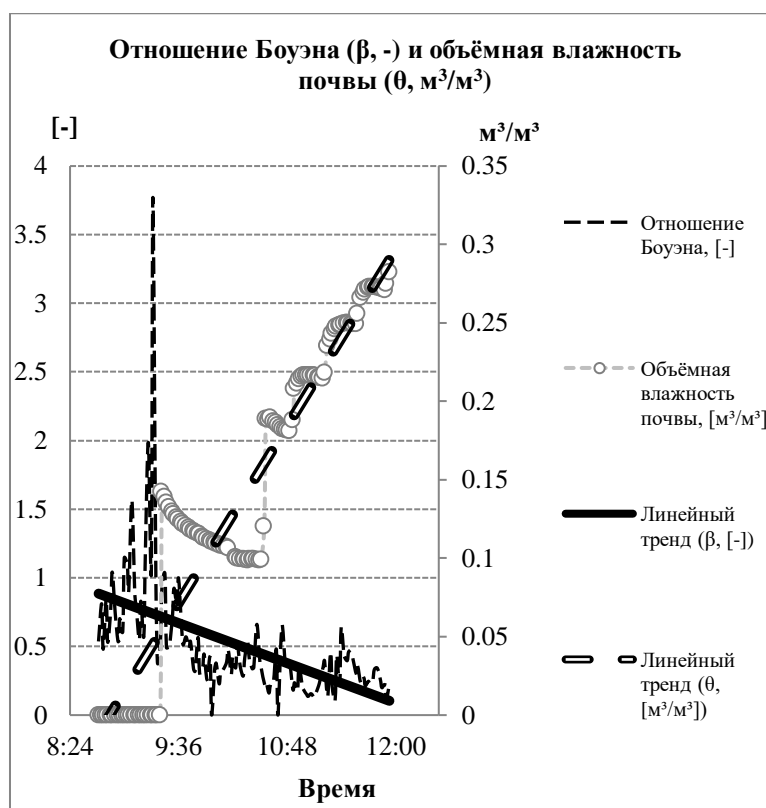


Рисунок 17. Временные ряды отношения Боуэна (β , -), объёмной влажности почвы (θ , $\text{м}^3/\text{м}^3$) в слое 0–5 см. Слева ось значений для числа Боуэна, справа значения объёмной влажности.

5.4 Эксперимент, проведённый на сельскохозяйственном поле, о-ва Валаам

Эксперимент проводился на сельскохозяйственном поле о-ва Валаам в летний период 2019 года с 10:30 до 13:00. В предыдущих экспериментах, рассматривалась искусственное дополнительное увлажнение почв. В этом эксперименте день наблюдений выбирался таким образом, что бы почва была увлажнена. Рано утром был слабый дождь, после которого почва была достаточно увлажненной. По результатам расчета по методике (Русин, 2014), были получены коэффициент температуропроводности и поток тепла в почву, представленные рисунком 18 и 19:

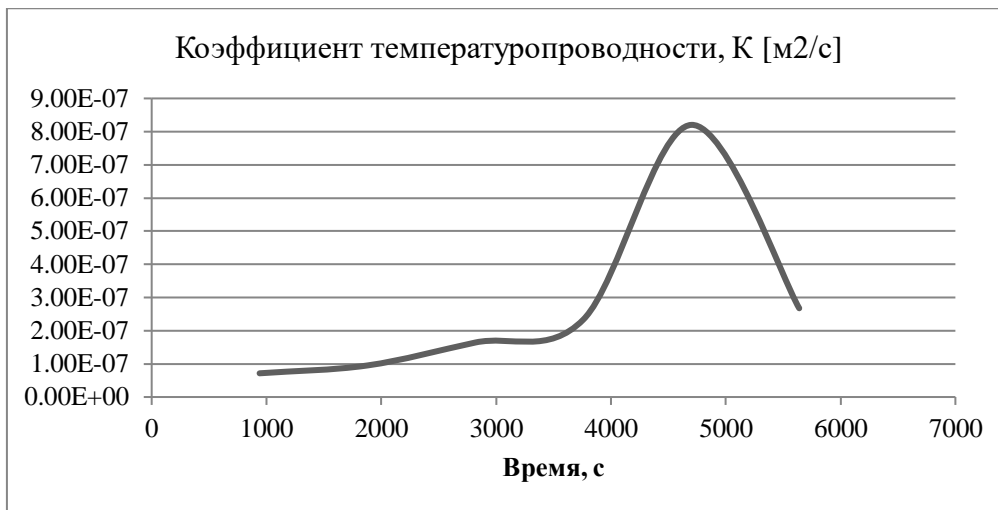


Рисунок 18. Коэффициент температуропроводности за интервал времени эксперимента.

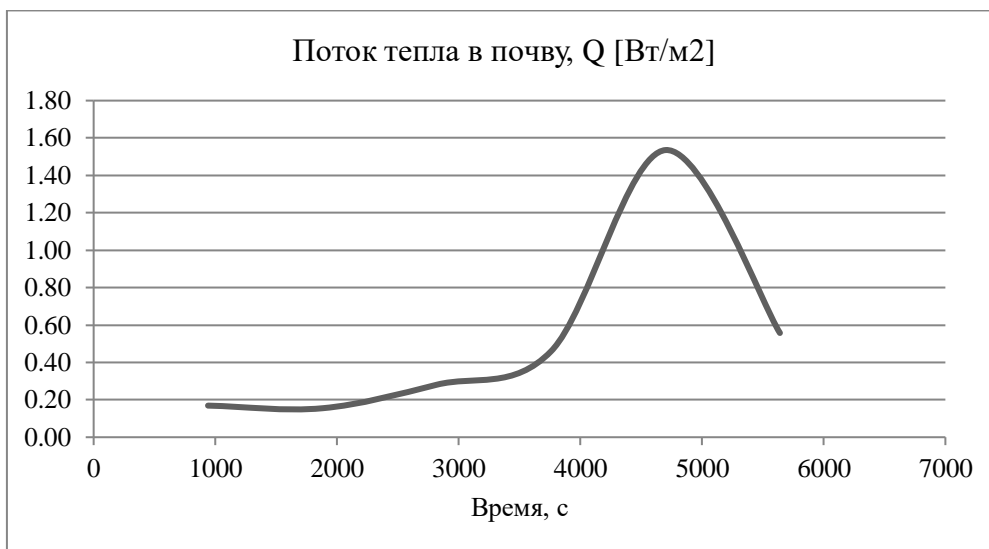


Рисунок 19. Поток тепла в почву за интервал времени эксперимента.

Для наглядности, ход влажности на время эксперимента представлен на рисунке 20:

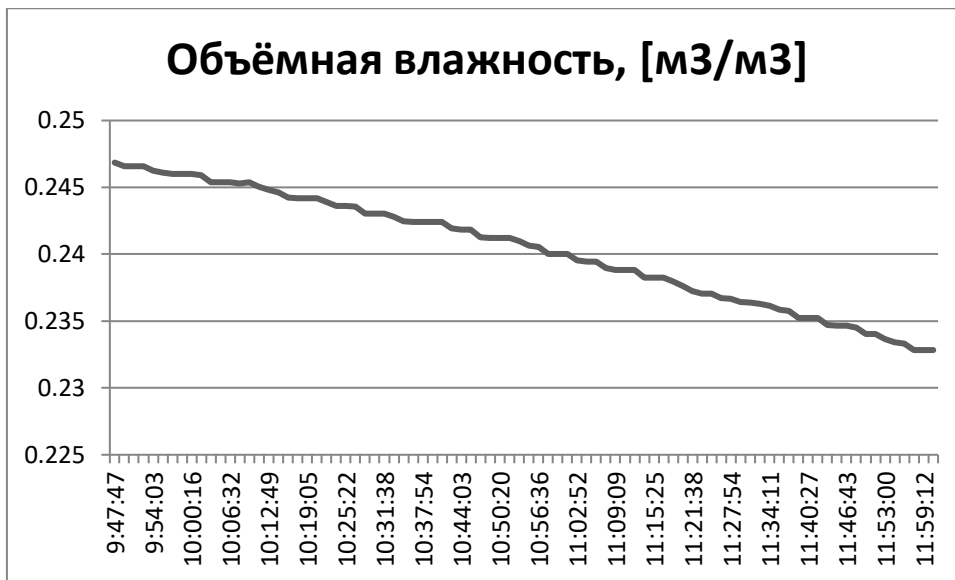


Рисунок 20. Ход влажности почвы.

Как видно из графика, несмотря на уменьшение почвенной влаги, коэффициент температуропроводности и поток тепла в почву растёт, что несколько противоречит результатам предыдущих экспериментов. Однако в первом описанном эксперименте был сделан вывод о суточном ходе коэффициента температуропроводности, его росте два раза в сутки. Исходя из данного предположения, коэффициент температуропроводности и поток тепла в почву растут в утренние часы, как раз в то время, в которое проводился эксперимент. Этим предположением можно объяснить наблюдаемый во время эксперимента ход исследуемых параметров. Для того что бы определить влияние объёмной влажности, нами так же был выбраны такие показатели, как число Боуэна и отношение энергий. В результате, нами была выстроена зависимость отношения скрытого и явного энергетического потока (число Боуэна), от объёмной влажности, которое представлено на рисунке 21:

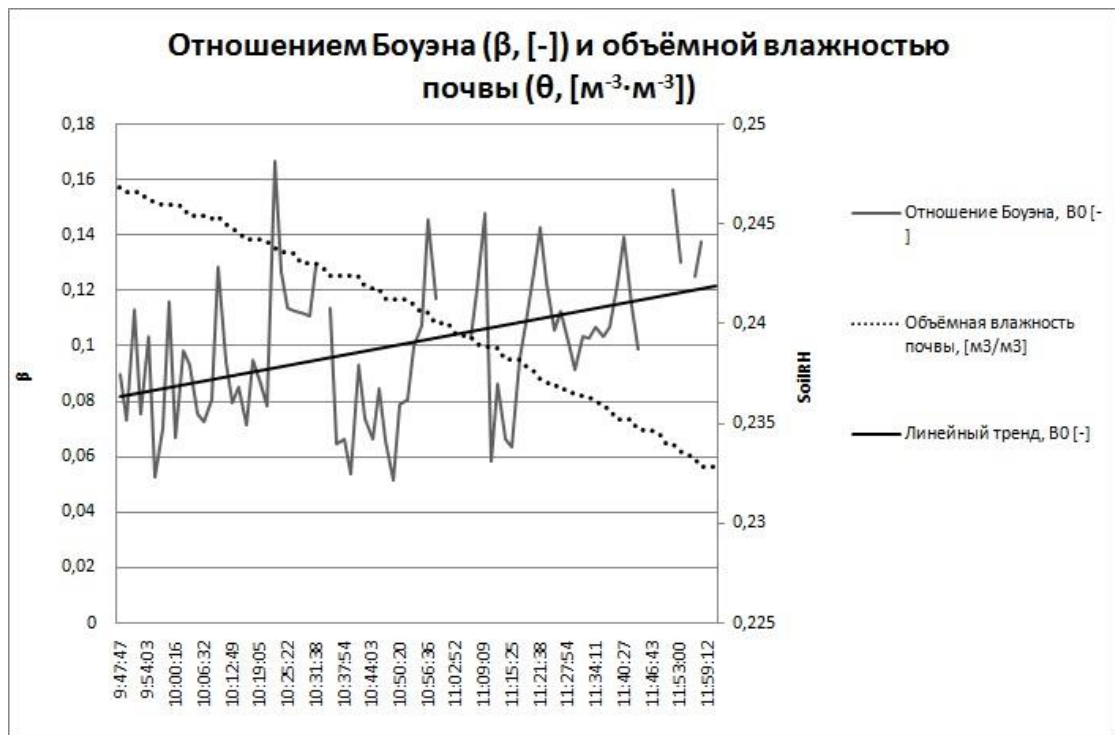


Рисунок 21. Временные ряды отношения Боуэна (β , [-]), объёмной влажности почвы (θ , $\text{м}^3/\text{м}^3$) в слое 0–5см.

На рисунке видно, что при уменьшении влажности, число Боуэна возрастает. В предыдущих результатах эксперимента, ситуация была обратная. Там влажность росла, а число Боуэна падало. Это значит, что можно сделать вывод о том, что отношение скрытого и явного потока тепла напрямую зависит от содержания почвенной влаги. Однако с другой стороны, растёт температура поверхности почвы, т.к. время наблюдения около полудня. Из за большой влажности испарение практически не увеличивается. Поэтому рост отношения энергий (число Боуэна) не такой резкий как в предыдущем эксперименте. На основании этого можно сделать вывод о необходимости дальнейшего исследования для опровержения или доказательства сделанного предположения.

По результатам проведенных исследований, нами был сделан ряд выводов и заключений. Во-первых, апробация исследуемого метода расчёта, на основе реальных данных помогла выявить его недостатки, и позволила их исправить. В первом эксперименте, было установлено, что слишком высокая дискретность наблюдений, сильно влияет на точность полученных значений. Была подобрана оптимальная периодичность наблюдений, с нашей точки зрения, и она равняется 15 минутам. Так же установлено, что чем выше точность наблюдений, тем точнее расчёт. Данные заключения, были опробованы в следующих полевых работах. Во – вторых, в ходе последующих

проведённых экспериментов, выявлена прямая зависимость коэффициента температуропроводности от объёмной влажности почв, и косвенная зависимость от этого параметра потока тепла в почву. Однако стоит заметить, что помимо почвенной влаги ещё влияет и масса других метеорологических параметров на исследуемые величины, таких как количество облачности, прямая солнечная радиация, прозрачность атмосферы. Важно проводить постановку экспериментов таким образом, чтобы все параметры были одинаковы за каждый из экспериментов. В третьих, установлена зависимость влияния объёмной влажности на соотношение Боуэна, то есть скрытый и явный потоки тепла. Это важный параметр, используемый в агрометеорологии, для определения микроклимата сельскохозяйственного поля.

На основании всех проведенных в экспериментах расчётов, можно сказать, что используемый метод имеет ряд преимуществ перед другими. Первое из них, это возможность получения коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву в реальном времени в процессе наблюдений при любом расположении почвенных термометров. Указанные в первой главе данной работы методы, основаны на длинных рядах наблюдений, и позволяют получить рассчитываемые величины только в среднем за определённый срок (сутки и т.д.). Следующее преимущество, заключается в универсальности метода, по имеющимся данным и дискретности наблюдений. В своём исследовании, мы использовали данные по различным глубинам, и срокам наблюдений. Каждый раз метод оказывался рабочим. Так же следует отметить относительную простоту метода, что немаловажно при проведении экспедиционных и полевых исследовательских работ.

6. Заключение

В данной работе было проведено исследование теплофизических свойств почвы, ключевыми параметрами которой, выбраны коэффициент температуропроводности и поток тепла в почву. За основу расчёта, взяты данные полученные современными метеорологическими приборами и различными датчиками. Для достижения цели, мною была собрана литература по данной тематике за последние 20 лет, и классифицированы описываемые в ней методики. Проведено несколько численных и агрометеорологических экспериментов для апробации метода и нахождения влияния различных зависимостей на тепловые свойства почв.

Поставленные задачи были выполнены в полном объёме. Была найдена и опробована универсальная и доступная при измерениях в реальном времени методика расчета коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву. Были найдены её недостатки и предложены пути их решения. Проведены несколько агрометеорологических экспериментов, для определения факторов, влияющих на теплофизические свойства почв. Найдены некоторые зависимости влияния почвенной влаги на энергетические потоки.

В ходе работы, были сделаны некоторые выводы. Первый из которых, касается используемого метода расчёта. Определено, что данная методика позволяет получать значения коэффициента температуропроводности и поток тепла в почву, в режиме реального времени. Это важный результат, т.к. большинство используемых методов, описанных в первой главе, не могут получать такие значения. Помимо этого, методика позволяет в разных экспериментальных условиях получить значения исследуемых величин, проверенные, где была такая возможность, другими методами. Вторым важным выводом работы, является то, что в ходе расчётов был выявлен явный суточный ход коэффициента температуропроводности. Во многих работах, его принято считать постоянной характеристикой, не меняющейся в течение дня. Помимо этого, сделаны выводы о влиянии содержания почвенной влаги на значения коэффициента температуропроводности и поток тепла в почву.

Проведенное исследование является перспективным. Полученные выводы, на основании метеорологических наблюдений в дальнейшем могут помочь при написании агрометеорологических научных работ. На основании проведенных исследований, было опубликовано две статьи, индексируемые РИНЦ и ВАК. Помимо этого, все работы на исследовательской площадке « пос. Меньково», проводились в рамках государственного

задания Агрофизического института на тему «Методология и выбор алгоритмов расчета комплексных показателей почвенно-биологических и энергетических процессов в системе почва растение приземный слой атмосферы (ПРА)».

Список литературы

1. Архангельская Т. А.. Температурный режим комплексного почвенного покрова.// М.: ГЕОС. – 2012. – С.284.
2. Доброхотов А.В, Романов Г.П., Козырева Л.В. Исследование взаимосвязи гидротермических условий почвы с комплексными характеристиками энергомассообмена в системе «почва – растение – приземный слой воздуха». //Агрофизика.– 2020. - №1 - С.45-51.
3. Ефимов А.Е., Ситдикова Ю.Р., Козырева Л.В., Доброхотов А.В. АМПАК (Автоматизированный Мобильный Полевой Агрометеорологический Комплекс). Методические указания по использованию // СПб: АФИ. 2013. 32 с.
4. Козырева Л.В., Ефимов А.Е., Доброхотов А.В., Максенкова И.Л., Бартнев Д.Л. Информационная база данных автоматизированного мобильного агрометеорологического комплекса для модельных расчетов энерго- и массообмена на сельскохозяйственном поле. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017620487. Заявка № 2016621605 от 05.12.2016.
5. Козырева Л. В. Методика оценки составляющих водного и теплового балансов в системе «почва–растение–приземный слой воздуха» с учетом стратификации приземного слоя, неоднородности подстилающей поверхности с использованием данных дистанционного зондирования земли и наземной калибровки автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом (АМПАК). – 2016.
6. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. / Л.Т. Матвеев –Л.: Гидрометеиздат. 1965. – 876с
7. Руководство по теплобалансовым наблюдениям— Л.: Гидрометеиздат. 1977.– 146.
8. Русин И. Н. Оценка потока тепла в почву при произвольном размещении по глубине почвенных термометров //Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2014. – №. 570. – С. 149-162.
9. Романов Г.П. Русин И.Н. Особенности теплообмена с атмосферой слоя почвы острова Валаам. //Материалы 2 международной научной конференции «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего» СПб. - 2019. - С.97-102.
10. Цейтин Г. Х.. К вопросу об определении некоторых тепловых свойств почвы // Труды ГГО. Вып. 39 (101).1953 - С. 201—213.

11. Allen R.G, Pereira D., Smith M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO.//Irrigation and drainage paper 56 //Fao, Rome. – 1998. – T. 300. – №. 9. – C. D05109.
12. Blumel K. Estimation of sensible heat flux from surface temperature wave and one-time-of-day air temperature observation, *Boundary Layer Meteorol.* №86. – 1998. -C.193–232.
13. Evett S.R. Water and energy balances at soil plant atmosphere inter faces. //Soil Physics Companion. Florida, USA. – 2002. – C.127–183.
14. GaoZ. Determination of soil heat flux in a Tibet an short-grass prairie. //China Boundary Layer Meteorology. Chinese Academy of Meteorological Sciences. – 2005. – C.165-178.
15. Gao B., Bianc L. ,Hua Y. Determination of soil temperature in an arid region. //Journal of Arid Environments № 71. -2007. –C.157–168.
16. Gao B., Wang L., Horton R. Discuss Comparison of six algorithms to determine the soil thermal diffusivity at a site in the Loess Plateau of China. //Hydrol. Earth Syst. Sci. 6, 2247–2274, 2009
17. Gnatowski T. Analysis of thermal diffusivity data determined for selected organic topsoil layer. //Land Reclamation № 41. – 2009. –C.95–107.
18. Goto S. Thermal response of sediment with vertical fluid flow to periodic temperature variation at the surface. Volcanological Laboratory. //Journal of geophysical research. Japan. – 2005.
19. Horton R., Wierenga P.J., Nielsen D.R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. //Soil Sci. Soc. Am. J.№47. – 1983. –C.25–32.
20. Hsieh C., Huang C., Kiely G. Long-term estimation of soil heat fluxby single layer soil temperature.//Int J Biometeorol. №53. – 2008. –C.113–123.
21. Khoshkhoo1 Y., Khalili1A., Iranneja P. Application of numerical method in the estimation of soil thermal diffusivity and soil temperature prediction under different textures and moisture contents Hassan Rahimi1. //African Journal of Agricultural Research, University of Tehran, Karaj, Iran. – 2010.
22. Kossowski J., Sikora E.: Thermal properties of the soils and methods of their determination. //Problemy Agrofizyki. – 1978. – C.58.
23. Pal Arya S. Introduction to Micrometeorology. Second Edition. Department of marine, Earth and atmospheric sciences North Carolina state university. USA. – 1998. –C.51-62.
24. Quirijn J.L., Durigon A. Soil thermal diffusivity estimated from data of soil temperature and single soil component properties. // University of San Paulo, Brazil. – 2012.

25. Rudolf G. Robert H. Aron P. The Climate Near the Ground. Germany. - 1995.
26. Ronda R. J., Bosveld F.C. Deriving the surface soil heat flux from observed soil temperature and soil heat flux profiles using a variation data-assimilation approach. // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2009.
27. Steven R. E. Tdr-temperature arrays for analysis of field soil thermal properties. North western University, Evanston, Illinois. - 1994.
28. Steven R., Agamb N., William P. Soil profile method for soil thermal diffusivity, conductivity and heat flux Comparison to soil heat flux plates. //Conservation & Production Research Laboratory, P.O. Drawer 10. USA. – 2012.
29. Shuttleworth W. J, R. J. Gurney, A. Y. Hsu, and J. P. Ormsby. FIFE: The variation in energy partition at surface flux sites //IAHS Publ. – 1989. – T. 186.
30. Usowicz B., Usowicz L.: Thermal conductivity of soils — comparison of experimental results and estimation methods. // Polish Academy of Sciences, Lublin. – 1999.
31. Verhoef A., Hurk Van Den B.J.J.M., Jacobs A.F.G.: Thermal soil properties for vineyard (EFEDA-I) and savanna (HAPEX-Sahel) sites. //Agricultural and Forest Meteorology, №78. – 1996. –C.1–18.
32. Wang J., Bras R. Ground heat flux estimated from surface soil temperature. J Hydrol.№216. –1999. –C.214–226.
33. Wang J., Bras R., Blumel L. Sensible heat flux estimated from one level air temperature near the land surface. //Geophysical research letters. №31. – 2004.
34. Young P.C., Pedregal D.J., Tych W. Dynamic Harmonic Regression. //Journal of Forecasting. UK. №18. – 1999. –C.369-394.
35. www ftp.ncdc.noaa.gov.
36. Rp5.ru
37. Studfile.net

Приложение А

Условные обозначения.

1. Q – поток тепла в почву, [Вт/м²].
2. K – коэффициент температуропроводности, [м²/с].
3. t – время, [с].
4. λ – коэффициент теплопроводности, [м²/с].
5. w – угловая скорость вращения земли [м/с].
6. A – амплитуда колебания температуры почвы, [-].
7. D – глубина, на которой поток тепла в почву G равен нулю, [м].
8. z – глубина исследуемого слоя почвы, [м].
9. Φ – начальная фаза температур, [-].
10. u – число параллельных соединений почвы, [-].
11. r – радиус частиц, [м].
12. L – количество комбинаций конфигураций почвы, [-].
13. C – объёмная теплоёмкость почвы [Дж/(м³*град)].
14. ρ – плотность воздуха [кг/м³].
15. C_p – константа давления, [-].
16. S – величина, характеризующая изменение температуры почвы за время t , [-].
17. τ – период колебания волн, [-].
18. Θ – объёмная влажность почвы, [м³/м³].
19. k – температуропроводность почвы [м²/с].
20. β – число Боуэна, [-].
21. H – турбулентный поток тепла [-].
22. ET – испарение с поверхности почвы, [мм/мин].