



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Исследование процессов испарения с поверхности льда и снега

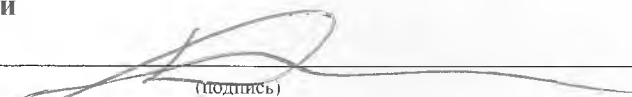
Исполнитель Гаман Любовь Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Зав. кафедрой ,к. г. н. доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

Консультант Гл. спец. отд. ОГУРиВР ААНИИ Штанников А.В.

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

Зав. кафедрой ,к. г. н. доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

» 20 г.

Санкт-Петербург
2018



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Исследование процессов испарения с поверхности льда и снега**

Исполнитель Гаман Любовь Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Зав. кафедрой ,к. г. н. доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

Консультант Гл. спец. отд. ОГУРиВР ААНИИ Штанников А.В.

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Зав. кафедрой ,к. г. н. доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт–Петербург
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ИСПАРЕНИЕ В ПРИРОДЕ.....	5
1.1 Физика процесса испарения с водной поверхности	7
1.2 Расчетные методы испарения с различных поверхностей	9
1.2.1 Методика расчета испарения по данным градиентных измерений.....	10
1.2.2 Методика расчета испарения по температуре и влажности воздуха, измеренным на метеорологических станциях.	13
1.3 Рекомендации для наблюдений и расчета испарения с различных подстилающих поверхностей	14
1.4 Испарение с поверхности суши и воды.....	15
1.4.1 Испарение с поверхности суши.....	15
1.4.1.1 Приборы для измерения испарения с поверхности почвы.....	16
1.4.1.2 Расчет испарения с поверхности почвы	19
1.4.1.3 Рекомендации руководящих документов для наблюдений и расчета испарения с почвы	20
1.4.2 Испарение с поверхности воды	22
1.4.2.1 Приборы для измерения испарения с поверхности воды.....	23
1.4.2.2 Расчет испарения с поверхности воды	26
1.4.2.3 Рекомендации руководящих документов для наблюдений и расчета испарения с поверхности воды.....	29
1.5 Испарение с поверхности снега и льда.....	30
1.5.1 Испарение с поверхности снега	30
1.5.1.1. Приборы для измерения испарения с поверхности снега	31
1.5.1.2 Расчет испарения с поверхности снега.....	32

1.5.1.3 Рекомендации руководящих документов для наблюдений и расчета испарения с поверхности воды.....	35
1.5.2 Испарение с поверхности льда	36
1.5.2.1 Приборы для измерения испарения с поверхность льда	37
2. ПОСТАНОВКА НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	38
2.1. Эксперименты зимы 2017 года	38
2.1.1 Теоретическое обоснование поставленной задачи и методов исследования	38
2.1.2 Организация и проведение натурных наблюдений.....	40
2.1.3 Полученные результаты и методы их обработки	45
2.1.4 Выводы, соответствующие поставленной задачи	48
2.2 Эксперименты зимы 2018 года	49
2.2.1 Теоретическое обоснование поставленной задачи и методов исследования	49
2.2.2 Организация и проведение натурных наблюдений.....	50
2.2.3 Полученные результаты и методы их обработки	52
2.2.3 Выводы, соответствующие поставленной задачи	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	60
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	61

ВВЕДЕНИЕ

Ледники, как индикаторы макромасштабных изменений терпят трансформации, в некоторых регионах Арктики – катастрофические. В арктических регионах, в связи с постановлением правительства, направленным на освоение АСРФ [8], возрастет инфраструктура, и, как следствие, повышается антропогенная нагрузка на водосбор бассейнов арктических регионов. Так же, оказывает воздействие современное изменение климата, что выражается в изменении количественных характеристик водного баланса различных сред в арктических регионах. Целью исследования является изучение процесса испарения с поверхностей льда и снега, как составляющего водного баланса.

Последние уточнения к имеющимся эмпирическим формулам для расчета испарения ориентированы на среднюю широту РФ. Для арктических регионов коэффициенты до сих пор не найдены, следовательно, возникает потребность в получении таких данных.

Предполагается, что гидрологические наблюдения и работы, направленные на изучения воднобалансовой составляющей, будут проводиться на Архипелаге Шпицберген, и будут направлены на получение необходимых исходных данных для решения следующих задач:

- 1) Установление количественной характеристики испарения с различных подстилающих поверхностей
- 2) Разработка и дальнейшее усовершенствование наблюдений за испарением с различных подстилающих поверхностей

1 ИСПАРЕНИЕ В ПРИРОДЕ

Испарение – это процесс фазового перехода молекул вещества из жидкого состояния в газообразное, происходящий на поверхности данного вещества.

Процесс испарения в природе зависит от многих факторов. Главными факторами являются атмосферные условия окружающей среды и увлажненность испаряющей поверхности. К метеорологическим условиям относятся: скорость ветра, влажность воздуха, солнечная радиация и температура окружающей среды. К добавочным факторам относятся отражающая способность и шероховатость испаряющей поверхности.

Скорость ветра определяет собой интенсивность турбулентного перемешивания. При больших скоростях ветра над испаряющей поверхностью, образовавшийся водяной пар быстрее развеивается, и как следствие, влага быстрее испаряется.

Влажность воздуха, при известной температуре и увлажненности подстилающей поверхности, характеризует величину вертикального градиента влажности, т.е. определяет количество потенциально испаряющейся влаги.

Солнечная радиация – это первопричина испарения. Лучи солнца являются энергетическим ресурсом, посредством которого происходит процесс. Известно, что на испарение 1г воды расходуется около 600 кал. Тепла. Помимо этого, солнечные лучи, через нагревание поверхности, оказывают влияние на интенсивность турбулентного перемешивания, и как следствие, на испарение. На испаряющих поверхностях, находящихся под прямым солнечным воздействием испарение происходит в 2 раза интенсивнее, чем на поверхностях, располагающихся в тени.

Отражающая способность влияет на количество поглощенной солнечной энергии, а шероховатость – на интенсивность турбулентного обмена [10].

Процессы испарения и конденсации создают непрерывный круговорот воды в атмосфере. Количество влаги, участвующей в данном действии,

составляет порядка 0,577 млн. км³. Энергия, затрачиваемая на испарение влаги, составляет $14 \cdot 10^{20}$ кДж, это около 30% солнечной радиации, поглощаемой Землей [15].

Многих специалистов интересует тема испарения с различных поверхностей, как в научном плане, так и при решении множества хозяйственных задач, связанных с потреблением и использованием водных ресурсов страны, а именно: морей, водоемов, водотоков, болот, ледников, снежного покрова и почвы. При изучении водного и теплового балансов этих объектов, данные сведения - необходимы. Также, они важны для правильного проектирования и эксплуатации водохранилищ, тепловых и атомных электростанций, систем водного транспорта, мелиорации земель и т.д.

На данный момент разработаны карты изолиний среднего многолетнего испарения, но значения, взятые с этих карт, не всегда отражают действительную ситуацию на интересующем нас объекте. Это связано с тем, что они не могут учесть все многообразие физико-географическим, климатических факторов, а также, местных условий, оказывающих влияние на рассматриваемый район. Для получения более точных данных об испарении с той или иной поверхности, используют расчетные методы.

1.1 Физика процесса испарения с водной поверхности

Рассмотрим процесс в замкнутом объеме.

Как известно, молекулы жидкости, обладая некоторой кинетической энергией, постоянно совершают колебательные движения. Главным показателем этой энергии является скорость движения молекул. Только обладающие наибольшей, по сравнению с другими, скоростью молекулы воды переходят в пар при колебательном движении. Чтобы оторваться от поверхности воды испаряющейся молекуле необходимо преодолеть силы притяжения со стороны остальных молекул и, кроме того, внешнее давление, уже образовавшегося над этой поверхностью пара. Другими словами, она должна совершить работу, против этих сил [15].

При испарении, температура воды падает, это связано с тем, что жидкость покидают молекулы с большей энергией, в сравнение с другими молекулами, при данной температуре воды. Из чего следует, что средняя энергия оставшихся молекул понижается. Чтобы температура воды не понижалась, ее необходимо постоянно подогревать. Количество теплоты, затрачиваемое на поддержание постоянной температуры, называется удельной теплотой испарения. Таким образом, испарение воды сопровождается потерей энергии, характеризующейся количеством теплоты, необходимым для того, чтобы при имеющейся температуре превратить единицу массы в пар при той же температуре.

Испарение происходит при любой температуре. Однако, с ее возрастанием интенсивность испарения увеличивается, тк возрастает скорость движения молекул.

Одновременно с испарением происходит процесс конденсации водяного пара, т.е. осуществляется непрерывный обмен молекулами между этими фазами. Количество молекул пересекающих поверхность раздела фаз

характеризует преобладание процесса испарения или конденсации. При большем испарении над водной поверхностью будет наблюдаться ненасыщенный водяной пар, если же пар перенасыщен, значит, преобладает процесс конденсации. Когда два этих процесса равнозначны, устанавливается динамическое равновесие.

Подводя итог, можно сказать, что в замкнутом объеме интенсивность испарения зависит от температуры поверхности воды и парциального давления водяного пара над испаряющей поверхностью. Чем выше температура воды и ниже фактическое парциальное давление водяного пара, тем интенсивнее испарение.

В естественных условиях к вышеперечисленным факторам испарения добавляются солнечная радиация, скорость воздушного потока, стратификация атмосферы и т.д., что описано выше.

1.2 Расчетные методы испарения с различных поверхностей

Существуют различные способы расчета испарения. В основном, эти методы можно разделить на две группы: методики расчетов испарения по данным градиентных наблюдений и методики расчета испарения по температуре и влажности воздуха. На данный момент нет единого мнения, какая расчетная методика является наилучшей. В научно исследовательских институтах до сих пор существуют приверженцы разных методов и ведутся споры по назначению наилучшей. В существующих Руководящих документах для станций и постов, рекомендуются оба метода расчета [10].

1.2.1 Методика расчета испарения по данным градиентных измерений

В природе наблюдаются два режима течения жидкостей и газа: ламинарный и турбулентный. Первому присущи постоянные скорости и направление течений, а также практически полное отсутствие завихрений. Второй характеризуется хаотичностью пульсации скорости и направления в точке потока.

При обычных условиях в атмосфере существует турбулентный режим воздушных течений. При максимальной интенсивности испарения, т.е. в дневное время, данный режим особенно развит. Беспорядочные вертикальные перемещения воздушных масс являются главной причиной переноса различных субстанций, таких как водяной пар, различные примеси, тепло и т.д. от одного слоя атмосферы к другому.

Динамическая турбулентность, зависящая от величины скорости ветра и его структуры, является одним из определяющих факторов интенсивности турбулентного перемешивания. Также, наиболее значительным является коэффициент вертикального перемешивания, который получают по отдельным составляющим скорости ветра. Нахождение данного параметра является единственным расчетным методом количественной оценки интенсивности турбулентного перемешивания в условиях неровности рельефа.

Для расчета испарения методом турбулентного перемешивания необходимы данные о температуре и влажности воздуха и скорости ветра минимум на двух уровнях. Необходимо увеличивать расстояние между этими уровнями, чтобы исключить ошибку измерений с помощью психрометрических термометров, так как разница значений температуры и влажности воздуха соизмерима с систематическими и случайными погрешностями. Наиболее репрезентативными уровнями для проведения градиентных наблюдений являются высоты 0,5 и 2,0 м. На выбранные высоты устанавливаются

психрометрические будки для определения температуры и влажности воздуха. Для определения скоростей ветра используются трехлопастные анемометры и термоанемометры [10].

После сбора данных испарение может быть рассчитано по двум направлениям. Первое – построение расчетных формул и графиков методики определения испарения по градиентным данным, и второе – построение расчетных формул для определения испарения с использованием температуры увлажненной подстилающей поверхности.

При расчете испарения по градиентным данным, при средней шероховатости луга 3 см, используется формула вида:

$$E = 0.086 \gamma \alpha_e u_{10} (e_{0.5} - e_{2.0}), \quad (1)$$

где γ и α_e – поправочные коэффициенты;

u_{10} – скорость ветра на 10 метрах;

$e_{0.5}$ и $e_{2.0}$ – влажность воздуха на 0,5 и 2,0 метрах соответственно.

Получаемое значение испарения имеет размерность мм/час.

Для расчета интенсивности турбулентного теплообмена используется следующее уравнение:

$$P = 3.0 \gamma \alpha_T (u_{2.0} - u_{0.2}) (T_{0.2} - T_{2.0}) \quad (2)$$

Расчетное значение интенсивности турбулентного теплообмена измеряется в кал/см² час.

При расчете испарения с использованием увлажненной подстилающей поверхности необходимо иметь данные о скорости ветра (u_1), температуре (T_2) и влажности воздуха (e_2) на одном из уровней и информацию о температуре подстилающей поверхности. Значение температуры подстилающей поверхности (T_{Π}) характеризует влажность примыкающего к ней воздуха (e_{Π}). Эти данные позволяют определить вертикальные градиенты температуры и влажности воздуха, и, как следствие, турбулентный тепло- и влагообмен испаряющей поверхности с окружающей средой.

Общие расчетные формулы для определения турбулентных потоков тепла и влаги и испарения могут быть представлены в виде:

$$P = \frac{\rho \chi^2 c_p m \alpha_T}{\ln \frac{z_1}{z_0} \ln \frac{z_2}{z_0}} u_1 (T_{\Pi} - T_2), \quad (3)$$

$$E = \frac{10 \rho \chi^2 \delta m \alpha_e}{\ln \frac{z_1}{z_0} \ln \frac{z_2}{z_0}} u_1 (e_{\Pi} - e_2), \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха, г/см³;

χ – постоянная Кармана;

c_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

m – параметр, зависящий от температурной стратификации атмосферы

z_0 – параметр шероховатости

$z_{1,2}$ – высота, м;

α_e и α_T – поправочные коэффициенты.

1.2.2 Методика расчета испарения по температуре и влажности воздуха, измеренным на метеорологических станциях.

При проектировании гидротехнических и агролесомелиоративных мероприятий требуется информация о средних многолетних значения испарения (нормах). В связи с этим, данные, получаемые вышеописанными методами, не могут быть использованными. При решении таких задач прибегают к методам, основанным на уравнениях водного и теплового баланса и к различным эмпирическим формулам и графикам [10].

По данной методике для получения значения испарения необходимыми сведениями являются только средняя температура и влажность воздуха. Эта методика разработана для определения суточного и сезонного хода испарения и величин нормы испарения.

1.3 Рекомендации для наблюдений и расчета испарения с различных подстилающих поверхностей

Наблюдения за испарением с различных подстилающих поверхностей производятся на метеорологических, агрометеорологических и гидрологических, воднобалансовых и болотных станциях на специальных площадках.

Водоиспарительная сеть Росгидромета содержит водоиспарительные площадки двух типов, а также испарительные установки, базирующиеся на суши и плавучие, находящиеся на акватории водоемов.

Рекомендуемое оборудование для станций включают: испарительный бассейн площадью 20 м², испаромер ГГИ-3000, анемометр ручной, аспирационный психрометр, термометр на поплавке, термометр родниковый.

Подробнее о наблюдениях и расчетах испарения с подстилающих поверхностей ниже.

1.4 Испарение с поверхности суши и воды

1.4.1 Испарение с поверхности суши

К поверхности суши относятся такие территории как: сельскохозяйственные угодья, леса и болота. Существуют различные факторы, определяющие приток влаги в жидком и парообразном состоянии к поверхности почвы по капиллярам. Один из них, это количество растительности на испаряющей поверхности. Испарение влаги с почвы, лишенной растительного покрова, зависит от глубины залегания водоносного горизонта, пористости грунта, содержания воды в почве и размера пор.

В процессе испарения влаги выделяют 3 стадии. Первая – это период, когда испарение равно испаряемости при увлажненности почвы до полной влагоемкости. Вторая – период, когда испарение происходит за счет притока воды к поверхности из нижележащих слоев. Третья стадия – это период просыхания почвы [15].

Для определения испарения с поверхности почвы разработаны разные методы. Они разделяются на расчетные методы и на методы нахождения данной величины с помощью приборов. Данные методы оценивают суммарное испарение, без подразделения его на испарение с почвы, за счет транспирации и влаги, задержанной стеблями и листьями в момент выпадения осадков. Перечисленные виды испарения происходят одновременно и при расчете учитываются совместно, так как их раздельное определение на данный момент не возможно.

1.4.1.1 Приборы для измерения испарения с поверхности почвы

Наибольший вклад в изобретение таких приборов внес Государственный Гидрологический Институт. Сотрудники этой организации разработали несколько типов испарителей, которые широко используются, и по сей день.

Наибольшее распространение получили всевозможные испарители, используемые для определения испарения с сельскохозяйственных территорий. Среди них наибольшей точностью измерений обладают гидравлические испарители большой и малой модели. На широкой сети станций используются весовые испарители, обладающие чуть меньшей точностью, но простотой в изготовлении и эксплуатации.

Гидравлические испарители, в отличие от весовых, обладают почти неограниченной возможностью увеличения веса исследуемого образца почвогрунта.

1.4.1.1.1 Гидравлический испаритель большой модели

Разработанный В.А. Урываевым и К.С. Пецулем, гидравлический испаритель большой модели имеет площадь почвенного монолита 5 м^2 при глубине 2 м.

В центр прибора помещен почвенный монолит, заключенный в стальной кожух, соединенный с 12 радиально расходящимися консолями. Консоли опираются на шейки поплавка, погруженного в воду кольцевого бассейна. Вся эта система (около 40 т) уравнивается подъемной силой поплавка. Суммарная площадь 12 шеек равна площади испаряющей поверхности прибора, поэтому изменение веса почвенного монолита вследствие испарения, конденсации или выпадения осадков на его поверхность тождественно вертикальному перемещению плавающей системы испарителя относительно уровня воды в бассейне. Эти перемещения регистрируются с помощью расположенных один относительно другого под углом 120° в горизонтальной плоскости трех самописцев уровня.

Его особенностью, помимо вышесказанного, является возможность определять изменения веса исследуемого монолита за любой промежуток времени с высокой точностью. Это стало возможным благодаря использованию независимых параллельных способом измерения вертикальных перемещений плавающей системы []. Также, помимо измерения испарения, конденсации и осадков, в испарителе предусмотрена возможность определять поверхностный сток и количество воды, просочившейся сквозь толщу почвенного монолита. Следовательно, прибор дает возможность исследовать все составляющие водного баланса опытного образца.

1.4.1.1.2 Испаритель ГГИ - 500

На сети почвенно-испарительных пунктов используется испаритель ГГИ-500 – наиболее простой прибор для измерения испарения и транспирации с сельскохозяйственных полей и агрометстанций. Площадь почвенного монолита в нем – 500 см^2 , глубина варьируется от 0,5 м до 1,0 м в зависимости от условий применения испарителя.

Дно испарителя съемное с отверстиями, через которые просочившаяся сквозь монолит влага стекает в водосборную емкость. Испаритель взвешивается один раз в пять дней на малогабаритных весах, с точностью до 10-15 г.

Главной особенностью испарителей ГГИ-500 является возможность раздельного определения транспирации и испарения с почвы между стеблями растений. Для этого используют два прибора. Одним измеряют суммарное испарение, с почвы и транспирацию, а другим – только испарение с почвы между стеблями растений. Для создания естественных условий, срезанные растения подвешивают над вторым испарителем, чтобы создать искусственное затенение образца. Разность показаний данных испарителей представляет собой значение транспирации за период наблюдения, между взвешиванием испарителей.

1.4.1.2 Расчет испарения с поверхности почвы

На сегодняшний день основными формулами для расчета испарения с поверхности суши являются формулы, основанные на связи испарения с испаряемостью, осадками и прочими элементами водного баланса. К таким уравнениям относятся уравнения М.И. Будыко, В.С. Мезенцева, В.И. Бабкина, С.Ф. Аверьянова, А.И. Будаговского и других авторов.

М.И. Будыко, путем обобщения уравнений Шрейбера и Ольдекопа, получил следующее выражение:

$$E = \sqrt{E_0 x_0 [1 - \exp(-E_0/x_0)] \operatorname{th}(x_0/E_0)}, \quad (5)$$

где E – норма годового испарения, мм/год;

E_0 – испаряемость;

x_0 – норма годовых осадков.

Уравнение В.С. Мезенцева имеет следующий вид:

$$E = E_0 \{1 + [(kx + W_1 - W_2)/E_0]^n\}^{-1/n}, \quad (6)$$

где E_0 – максимально возможное испарение в данной местности при существующих в ней атмосферных условиях;

x – осадки;

k – коэффициент недоучета осадков, измеряемых с помощью осадкомера;

W_1 и W_2 – влагозапасы метрового слоя почвы на начало и конец расчетного периода;

n – параметр, характеризующий расчлененность рельефа.

1.4.1.3 Рекомендации руководящих документов для наблюдений и расчета испарения с почвы

Наблюдения за испарением с поверхности почвы по всей сети Росгидромета производятся на почвенных испарительных площадках I, II, III, IV типов, в зависимости от климатической зоны и вида подстилающей поверхности.

Площадки I и IV типов предназначены для всех климатических зон. Площадки II типов создаются в зонах избыточного и достаточного увлажнения, а III типа – только в зоне недостаточного увлажнения [3].

Все типы площадок оборудуются комплектом весовых почвенных испарителей, почвенным дождемером ГР-28, весами, грузоподъемностью не менее 100 кг, контрольными гирями и будкой для весов с защитным чехлом. Также, площадки II и III типов оснащаются подъемным устройством ГР-22, а IV типа – гидравлическим почвенным испарителем ГР-17.

Почвенные испарительные площадки следует располагать на расстоянии не более 4 км от метеоплощадки. Вместе с тем, площадки, организованные на участках, таких как луг, целина и залежь, т.е. с травянистой растительностью, обычно постоянны, а на сельскохозяйственных угодьях – могут изменять свое местоположение, в связи с перемещениями культур [6].

Наблюдения на почвенных испарительных площадках всех типов за испарением по весовым почвенным испарителям выполняются один раз в пять суток. Наблюдения за осадками на площадках типа I, II, III производятся каждый день, один раз в сутки. На площадках IV типа наблюдения за испарением осуществляются три раза в сутки.

Контур испарительной площадки разбивают в соответствии с ее типом и намечают места установки приборов и дорожек для прохода наблюдателей. Затем устанавливаются гнезда комплекта весовых испарителей и подъемные

устройства. Затем устанавливаются будка и весы, далее почвенный дождемер. Последним звеном является зарядка комплекта весовых почвенных испарителей. Все эти пункты осуществляются в соответствии с соответствующими руководящими документами.

Расчет количества испарения с почвы рекомендуется производить по двум методам: взаимодополняющего соотношения и методу Будыко М.И.

Метод взаимодополняющего соотношения сводится к определению переходного коэффициента k , зависящего от величины видимого испарения, испарения с водной поверхности с учетом величины выпавших осадков. Метод выведен для регионов, обладающих наблюдениями за испарением с водной поверхности и поверхности почвы.

Основная расчетная формула данного метода имеет вид:

$$E_{\text{поч}} = E_{\text{вода}} k, \quad (7)$$

где $E_{\text{поч}}$ – среднее сезонное испарение с поверхности почвы, мм;

$E_{\text{вода}}$ – среднее испарение с водной поверхности, мм.

При отсутствии данных наблюдений за испарением с данных поверхностей используется уравнения Будыко М.И., имеющим следующий вид:

$$E = E_0 \quad \text{при } W \geq W_0, \quad (8)$$

$$E = E_0(W/W_0) \quad \text{при } W \leq W_0, \quad (9)$$

где E и E_0 – испарение и испаряемость, мм;

W – среднее значение влажности почвы за расчетный период, мм;

W_0 – критическое значение влажности почвы, при котором $E = E_0$, мм.

1.4.2 Испарение с поверхности воды

Изучение испарения с поверхностей водоемов Российской Федерации имеет большое значение для решения многих научных и практических задач.

Для нахождения значений испарения с поверхностей водоемов большую роль играет размер водоема и его форма. Для большого озера или водохранилища требуется принимать в расчет его конфигурацию, глубину и метеорологические условия над акваторией. При вытянутой или округлой формой водоема с длиной разгона воздушного потока не менее 25 км метеорологические элементы необходимо учитывать не менее чем по двум опорным станциям, расположенных на разных концах акватории.

Существует множество методов для оценки испарения с водной поверхности. Такой избыток связан со сложностью механизма взаимодействия водной поверхности и воздушной массой, прилегающей к ней. Более точным, из разработанных методов, является инструментальный метод.

1.4.2.1 Приборы для измерения испарения с поверхности воды

Как было сказано выше, существует прямая зависимость величины испарения от размера испаряющей поверхности. Так, с уменьшением данной поверхности интенсивность испарения возрастает. Этот фактор объясняется влиянием на значение испарения следующих величин.

Влажность воздуха над испаряющей поверхностью больше чем над окружающей почвой на одном и том же уровне. В связи с этим водяной пар над испарителем, поднимаясь вверх, растекается в стороны.

В момент наиболее интенсивного испарения температура поверхности воды меньше температуры поверхности почвы, окружающей ее. Поэтому образуется адвективный приток тепла из воздуха к испаряющей поверхности, что способствует увеличению энергетических ресурсов испарения. Стоит отметить также, что немного выступающие над поверхностью суши стенки испарителя интенсивно нагреваются под действием солнечных лучей и дополнительно нагревают водную поверхность, тем самым увеличивая испарение с неё. Следовательно, чем выше температура воздуха и почвы, тем сильнее влияние этих факторов.

Самыми распространенными приборами для измерения испарения с поверхности воды являются водоиспарительный бассейн площадью 20 м² и ГГИ-3000.

1.4.2.1.1 Водоиспарительный бассейн площадью 20 м^2

Данное устройство является водоемом-эталоном, так как на него не оказывают воздействие ни факторы, влияющие на малые водоемы, ни факторы, связанные с возрастанием размеров водоема.

Плавающая испарительная установка с испарительным бассейном площадью 20 м^2 состоит из двух сдвоенных плотов треугольной формы. Один из них – плот-волногаситель, а другой предназначен для удержания на плаву испарительного бассейна.

Размер плотов зависит от размера водоема, а их конструкция одинакова. Плоты – волногасители представляют собой треугольные деревянные рамы из бревен. Дно плотов дощатое с отверстиями в 1-2 см. Для гашения энергии ветровых волн снизу подбиваются доски. Для гашения волн, переливающихся через волногаситель, расположены волногасители-доски, поставленные на ребро и прибитые к полу. Верхний край досок волногасителей возвышается над уровнем воды на 10-15 см.

Плот-волногаситель закрепляют якорем посреди водоема, что позволяет плоту двигаться по окружности и всегда располагаться одной и той же вершиной против ветра и волны. Приборы, установленные на плоту, всегда одинаково ориентированы по отношению к ветру, а испаритель защищен от заливания волнами.

Сам испаритель имеет вид цилиндрического сосуда с плоским основанием. Площадь поверхности 20 м^2 , диаметр 5 м, глубина 2 м. Определение уровня воды в испарителе производится с помощью объемной бюретки с измерительной трубкой. Перерыв между сроками наблюдений 12 часов. Высота бортика над поверхностью воды в испарителе 7,5 см. Испарительный бассейн площадью 20 м^2 устанавливается либо на берегу, либо на плаву совместно с плотом-волногасителем.

1.4.2.1.2 Испаромер ГГИ-3000

Приборы ГГИ-3000 широко применяются на практике в связи со своей мобильностью и простотой в эксплуатации. Он предназначен для определения испарения с открытой водной поверхности. Устройство может быть установлено на плоту в водоеме или закопано в землю на континентальной и береговой водноиспарительной площадке. Служит для наблюдений при температурах воздуха от плюс 1 до плюс 50°С.

Установка представляет собой цилиндрическую емкость с коническим основанием, с площадью поверхности 3000 см³, диаметром 61,8 см, глубиной 60 см у стенки и 68,5 см в центре. В центре находится латунная трубка, на конце трубки крепится коленчатая игла. На трубку надевается объемная бюретка. Бюретка служит для определения изменения уровня воды в испарителе.

Помимо основного своего назначения, прибор также служит для измерения атмосферных осадков с помощью мерного стакана, а также для наблюдения за рядом гидрометеорологических параметров, таких как температура воды в поверхностном слое испарителя, температура и влажность воздуха, скорость ветра и другие.

Чтобы воспользоваться данными, полученными по установкам необходимо эти результаты откорректировать с использованием поправочных коэффициентов. Такими коррективами являются коэффициент, характеризующий влияние глубины водоема на испарение, и коэффициент, характеризующий защищенность водоема от ветра берегами, лесом, постройками и другими преграждениями.

1.4.2.2 Расчет испарения с поверхности воды

В связи с тем, что прямые методы подсчета испарения не всегда могут быть применены из-за своей трудоемкости и невозможности использования при разработке проектов, были разработаны косвенные методы для данных расчетов. К таким методам относятся расчет параметра с использованием уравнений водного и теплового балансов и турбулентной диффузии водяного пара в атмосфере.

Пульсационный метод основан на турбулентном характере движения влажности воздуха. Данный метод применим при некоторых допущениях: 1) фазовые переходы водяного пара отсутствуют; 2) градиенты параметров атмосферы в горизонтальном направлении равны нулю; 3) вертикальный поток пара по высоте приземного слоя атмосферы постоянный. В итоге расчетное уравнение имеет следующий вид:

$$E = \rho \overline{u'q'}, \quad (10)$$

где u' и q' – пульсационные добавки скорости ветра и удельной влажности соответственно.

Метод водного баланса основан на уравнении баланса, адаптированного для водоема и выведен для оценки испарения:

$$E = x + y_1 - y_2 + y_1' - y_2' + \Delta H, \quad (11)$$

где x – осадки, выпадающие на поверхность воды;

y_1 и y_2 – приток и отток поверхностных вод;

y_1' и y_2' – приток и отток подземных вод;

ΔH – изменение уровня воды в водоеме.

Метод теплового баланса предусматривает использование уравнения теплового баланса, преобразованного для водной поверхности в следующем виде:

$$R = L_{\text{и}}E + P + B, \quad (12)$$

где R – радиационный баланс;

$L_{\text{и}}$ – удельная теплота испарения;

P – турбулентный теплообмен между водной поверхностью и воздухом

B – теплообмен между верхним и нижележащими слоями воды.

Метод турбулентной диффузии разработан на основании теории турбулентной диффузии. Для выведения расчетного уравнения преобразуют уравнение переноса водяного пара в турбулентной атмосфере и упрощают его. В итоге, формула имеет следующий вид:

$$E = \rho k \frac{0.623}{P} \frac{\partial e}{\partial z} \quad (13)$$

где k – коэффициент турбулентного обмена;

P – атмосферное давление;

E – парциальное давление водяного пара;

z – расчетная высота.

Помимо перечисленных способов был разработан ряд эмпирических формул, в основе которых лежит следующая структура:

$$E = \varepsilon_0(e_0 - e_2), \quad (14)$$

где ε_0 – коэффициент, зависящий от скорости ветра.

В 1936 году ученые ввели ряд поправок к устоявшимся понятиям об испарении с водной поверхности, а именно, показали, что интенсивность испарения прямо пропорциональна разности температур не только в штиль, но и при малейшем ветре. В связи с этим, в имеющиеся формулы были внесены некоторые коррективы. Уточнения заключались в ведении дополнительного слагаемого, зависящего от разности температур испаряющей поверхности воды и воздуха на высоте 2 м. Введение такого параметра позволяло учитывать скорость отвода водяных паров от испаряющей поверхности. Полученные формулы имеют следующий вид:

1) В.А. Рымши и Р.В. Донченко

$$E = 0.104(k_1 + u_2)(e_0 - e_2); \quad (15)$$

где k_1 – коэффициент, зависимости от разности температуры поверхности воды и воздуха на высоте 2 м $(t_n - \theta_2)$.

2) Л.Г. Шуляковского

$$E = [0.15 + 0.112u_2 + 0.094(t_n - \theta_2)^{1/3}](e_0 - e_2); \quad (16)$$

3) А.Р. Константинова

$$E = \left(\frac{0.024(t_n - \theta_2)}{u_1} + 0.116u_1 \right) (e_0 - e_2); \quad (17)$$

4) А.П. Браславского и С.Н. Нургалиева

$$E = 0.14[1 + 0.8u_2 + k_2](e_0 - e_2). \quad (18)$$

1.4.2.3 Рекомендации руководящих документов для наблюдений и расчета испарения с поверхности воды

На водоиспарительных площадках и плавучих испарительных станциях производится следующий комплекс работ: выполняются измерения температуры воды, скорости ветра, уровня воды в установках, при необходимости выполняют отливку или заливку воды, и выполняют повторные измерения воды в испарительных установках. На плавучих станциях наблюдают за температурой воды в водоеме и за температурой на высоте 2 метров по сухому и смоченному термометрам [2].

Для получения корректных данных установки постоянно подвергаются проверкам. Далее некоторые из них: проверка на течь испарителя, проверка на течь бюретки, проверка на течь бака дождемера, проверка на течь дождемерного ведра, сличение ручных анемометров. Помимо этого, в определенные временные нормы производятся смена воды в испарителе и промывка соединительной трубки успокоителя в бассейне [4].

Расчет испарения с водной поверхности рекомендуется производить по следующей формуле:

$$E = 0,14 n (e_0 - e_{200}) (1 + 0,72 u_{200}), \quad (19)$$

где e_0 и e_{200} – соответственно, упругость насыщенного водяного пара, рассчитанная по температуре испаряющей поверхности, и упругость водяного пара в воздухе над испаряющей поверхностью на высоте 2 м, мбар;

u_{200} – скорость ветра над водоемом на высоте 2 м, м/с;

n – число суток в расчетном интервале.

1.5 Испарение с поверхности снега и льда

1.5.1 Испарение с поверхности снега

Испарение с поверхности снега трудноизмеримо, это связано с тем, что интенсивность этого процесса невелика, кроме того, осуществляется горизонтальный перенос сухого снега при средних и больших скоростях ветра, что нарушает режим испарения со снежного монолита.

При описании снежного покрова оперируют следующими характеристиками: с застругами ли покров, сдувание – полное, сильное, частичное; и, дополнительно, обращают внимание на места скопления снега.

Для измерения испарения с поверхности почвы созданы определенные приборы, но, в основном, данная характеристика находится расчетными методами.

Часто изучение испарения с поверхности снега объединяют с нахождением испарения с поверхности почвы, так как для нахождения этой величины используются схожие приборы и рассматриваемая территория повторяет участок почвенного покрова.

1.5.1.1. Приборы для измерения испарения с поверхности снега

В зимнее время испарители работают эпизодически, только в период безветренной погоды, чтобы исключить метелевый перенос. Размеры испарителей невелики, обычно, их площадь составляет 0,01-0,05 м² при высоте 0,05-0,1 м.

Приборы производят из легкого материала, такого как, алюминий, целлулоид, органическое стекло и тому подобные. Крайне важно, чтобы теплопроводность материала, окружающего наблюдаемый объект повторяла или была максимально близка к теплопроводности опытного образца.

Множество разновидностей таких испарителей было разработано на территории СССР и в других странах. Наиболее известными учеными в этих областях являются Познышев, Иванов, Горшенин, Китредж,

1.5.1.2 Расчет испарения с поверхности снега

Испарение с поверхности снега зависит от разности температур поверхности снега и атмосферного воздуха, от разности давления насыщенного водяного пара и парциальным давлением водяного пара в воздухе и от скорости ветра. Данные параметры принято брать на высоте 2 метров над испаряющей поверхностью.

Среди советских ученых наибольший вклад в изучение данного вопроса сделал П.П. Кузьмин. Его разработки до сих пор считаются образцом и рекомендуются для расчета испарения с поверхности снега.

Помимо эмпирических формул П.П. Кузьмина, испарение с поверхности снега может быть найдено теми же методами, что и с поверхности воды, а именно: методами водного и теплового балансов, турбулентной диффузии и другими эмпирическими формулами.

Метод водного баланса используется только для специальных экспериментов, где достигается высокая точность получения данных, так как слой испаряющейся влаги незначителен.

Расчет испарения методом теплового баланса производится по следующему выражению:

$$E = (R - B) / [L_{\text{воз}}(1 - \alpha dt/dq)], \quad (20)$$

где $L_{\text{воз}} = 2833$ кДж/кг – удельная теплота возгонки снега при 0°C .

Для применения метода турбулентной диффузии необходимо иметь ежечасные значения градиентов и тепловых потоков. Поэтому метод не часто используют. Формула имеет следующий вид:

$$E = \frac{0.088(e_1 - e_2)(u_4 - u_3)}{\left[\lg\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \lg\left(\frac{z_4}{z_3}\right) \right]}, \quad (21)$$

Где E в мм/час; e_1 и e_2 – парциальное давление водяного пара на высоте z_1 и z_2 над поверхностью снега;

u_4 и u_5 – скорость ветра над поверхностью снега на высоте z_3 и z_4 .

В настоящее время широкое распространение получили формулы вида:

$$E = (\alpha + \beta u_{10})(e_{0\text{ сн}} - e_2), \quad (22)$$

где α и β – коэффициенты, u_{10} – скорость ветра на высоте флюгера;

$e_{0\text{ сн}}$ – давление насыщенного водяного пара в воздухе, гПа;

e_2 – парциальное давление водяного пара в воздухе на высоте 2 м, гПа.

При отсутствии данных о температуре поверхности снега используют следующую формулу:

$$E = (\alpha_1 + \beta_1 u_{10})d_2, \quad (23)$$

где d_2 – дефицит насыщенного воздуха на высоте 2 м над поверхностью снега, гПа.

Далее представлены наиболее часто встречающиеся эмпирические формулы для расчета испарения с поверхности снега.

1) П.П. Кузьмин

$$E = (0.18 + 0.10u_{10})(e_{0\text{ сн}} - e_2); \quad (24)$$

$$E = (0.24 + 0.05u_{10})d_2 \quad (25)$$

При расчета испарения более чем за месяц автором была предложена упрощенная формула:

$$E = 0.37nd_2 \quad (26)$$

2) А.Р.Константинов предложил формулы, в которой есть учет влияния температурной стратификации атмосферы на испарение с поверхности снега

$$E = \left[0,018 \frac{(T_{\text{п}} - \theta_2)}{u_{10}} + 0.10u_{10} \right] (e_{0\text{ сн}} - e_2), \quad (27)$$

Где $(T_{\text{п}} - \theta_2)$ – разность температуры поверхность снега и воздуха на высоте 2 м.

3) А.Н. Постников занимается уточнениями имеющихся формул и до сих пор. Одно из его наработок – это формула, предложенная автором для определения испарения с поверхности снега более чем за месяц.

$$E = 0.31nd_2, \quad (28)$$

где n – число суток в расчетном периоде.

1.5.1.3 Рекомендации руководящих документов для наблюдений и расчета испарения с поверхности воды

Для наблюдения за испарением с поверхности снега устраивают снегомерные площадки. Для этого, выбирается подходящий участок. Контурированную вешками территорию разделяют на части для установки испарителей и термометров и для зарядки испарителей снежными монолитами. Также, обозначают места для установки будки для весов и прокладки дорожек. После создания данной площадки, перед ее эксплуатацией, проводится контрольная поверка чувствительности весов [7].

В состав работ по наблюдению за испарением с поверхности снега входит: осмотр комплекта испарителей и термометров, определение необходимости в замене компонентов комплекта, замена снежных монолитов и перестановка гнезд испарителей.

В каждое снятие показаний монолит снега, предварительно закрыв его крышкой, взвешивают на весах и возвращают на место, снимая крышку. Это делается для максимального приближения процессов, протекающих в испарителе, к естественным, и для избегания существенных потерь из-за переноса испытуемого образца. Момент открытия книжки и закрытия фиксируется в специальной книжке.

Расчет испарения с поверхности снега рекомендуется осуществлять по формулам П.П. Кузьмина, представленным ранее.

1.5.2 Испарение с поверхности льда

К поверхности льда относятся: ледяная корка, лед, образовавшийся путем замерзания воды в реке, а также арктический лед – на материковых зонах и на поверхности воды. Поверхность ледяного покрова может быть гладкой, неровной или торосистой, все это влияет на интенсивность испарения, как и цвет льда.

Наблюдения за испарением с поверхности льда не распространены. При расчете испарения с поверхности льда также возникают определенные трудности, связанные с тем, что в настоящий момент не существует формул для расчета именно данного параметра. Используются формулы для расчета испарения с поверхности снега.

Однако, существует одно значительное отличие испарений с этих поверхностей – это интенсивность испарения. Она, в первую очередь зависит от расположения поверхностей – теневое или солнечное. В учебнике [15] сказано, что интенсивность испарения со льда выше, чем со снега, что связано с большей плотностью льда, по сравнению со снегом. Нами же, в процессе проведения эксперимента было замечено, что интенсивность испарения с поверхности снега больше, чем с поверхности льда. Это связано с большей воздухопроницаемостью снега и как следствие, выносом водяного пара из более глубоких слоев снежного покрова.

1.5.2.1 Приборы для измерения испарения с поверхность льда

В 1937 году А.В. Шнитниковым был разработан специальный прибор для измерения испарения с поверхности льда [21]. Прибор представляет собой линейку, длиной 18 см и шириной в 1 см, помещенную в рамку, в которой линейка может двигаться в пределах 10 - 12 см. Основные деления нанесены через 1 мм; сверх того, имеются дополнительные деления через 0,5 мм. С задней стороны линейка имеет петлю с нарезкой для пропуска подъемного винта, регулирующего ее ход. На нижнем конце линейки укреплен башмак с тремя (круглыми или остроконечными) ножками, имеющими ход по винтовой нарезке для помещения их строго в одну горизонтальную плоскость со стопорной гайкой.

Для установки прибора перед началом работ в лед, на выбранном для наблюдений месте, вмораживаются 3 - 4 специальных штатива. В начале работ прибор укрепляется на штативе № 1, и мерная линейка винтом опускается до легкого соприкосновения с поверхностью льда. Когда будет установлено соприкосновение всех трех ножек башмака посредством прогиба нити или сдвига измерителя в точке по линейке, в окошечке делается отсчет и заносится в тетрадь вместе с записями о состоянии льда, датах, часах, номерах штатива и т. д.

После этого прибор переносится на штатив № 2, где делается такое же наблюдение. Поочередно обходятся все установленные штативы.

Разность между вторым и первым отсчетами на одном и том же штативе дает чистую величину испарившегося слоя в миллиметрах и долях его.

2. ПОСТАНОВКА НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Эксперименты зимы 2017 года

2.1.1 Теоретическое обоснование поставленной задачи и методов исследования

Метод исследования основывается на натурном эксперименте, построенном на зависимости изменения веса монолита льда от испарившегося его объема в течение нескольких суток, под воздействием метеорологических факторов окружающей среды.

Для теоретического обоснования выбора расчетных методов были проанализированы некоторые работы П.П. Кузьмина [9] и А.Р. Константинова [10], являющихся их основоположниками в России.

П.П. Кузьминым в качестве теоретических предпосылок был выбран метод получения непрерывной информации, основанный на совместном использовании экспериментального и расчетного способов определения испарения со снега. Согласно ему, данные инструментальных наблюдений принимаются в качестве главной и наиболее надежной части информации [9,10].

У А.Р. Константинов в основе предлагаемой методики лежит схема расчета испарения по градиентным данным. Для использования схемы необходимо знать скорость ветра на определенной высоте, температуру и влажность воздуха на двух высотах.

Также, были проанализированы некоторые работы А.Н. Постникова [16,17], предложившего уточненные формулы, выведенные на основании и с использованием методов предыдущих авторов, а также с помощью актуальных на сегодняшний день статистических методов обработки данных. Им были обработаны натурные современные данные, взятые по метеорологическим и водно-балансовым станциям.

В результате анализа теоретических работ по расчетам испарения были выбраны следующие формулы:

- 1) Основная формула П.П. Кузьмина, хорошо подходящая для определения приблизительной оценки испарения в сутки:

$$E = (0,18 + 0,098u_{10}) * (e_n - e_2), \quad (29)$$

где E — испарение со снега;

— скорость ветра на высоте флюгера, м/с;

e_0 — парциальное давление насыщенного водяного пара в приземном слое воздуха, определенное по температуре поверхности снега, гПа;

e — парциальное давление водяного пара в воздухе на высоте 2 м, гПа.

- 2) Модифицированная формула П.П. Кузьмина, используемая при отсутствии надежных данных наблюдений за температурой поверхности снега и невозможности определения разности упругости водяного пара ($e_n - e_2$). Она, чаще всего, применима для расчета испарения за суточный период:

$$E = (0,24 + 0,05 * u_{10}) * d, \quad (30)$$

где d — дефицит влажности воздуха, гПа.

- 3) При определении испарения с поверхности снега за месяц и более продолжительные периоды, действующими нормативными документами рекомендуется применять упрощенную формулу:

$$E = 0,37nd, \quad (31)$$

где n — число суток в расчетном промежутке времени.

- 4) Уточненная формула А.Н. Постникова [5], предложенная автором для определения испарения с поверхности снега более чем за месяц: (32)

$$E = 0,31nd$$

2.1.2 Организация и проведение натурных наблюдений

В измерительные емкости нами были отобраны пробы пресной воды с поверхности р. Оредеж в 3 экземплярах. Вода в зимний период обладает малой мутностью, является практически дистиллированной.

После замерзания монолиты были установлены на открытом воздухе на пластиковой поверхности. Место их расположения находилось под крышей, помещение с 2 сторон было закрыто деревянными стенами. В месте проведения эксперимента ветер и прямые солнечные лучи отсутствовали.

Вес первого монолита составлял 53,91 г., второго - 55,91 г., третьего – 53,81 г. Форма монолитов льда представляет собой усеченный конус, площадь испаряемой поверхности, без учета нижнего основания, у первого образца равна $13,5 \text{ см}^2$, у второго – $24,8 \text{ см}^2$, у третьего – $26,4 \text{ см}^2$.

В установленное время (17:00) каждые сутки производилось взвешивание монолитов льда на предварительно подготовленном инструменте. Данным прибором являются весы с точностью до 0,01 грамма. Данные записывались в журнал наблюдений (Таблица 2.1.2.1).

Таблица 2.1.2.1 – Сводная таблица результатов измерений 2017 г.

Дата	Время	Температура воздуха, °С	Вес 1 монолита, г	Вес 2 монолита, г	Вес 3 монолита, г
06.02.2017	17:00	-12.47	-	-	-
07.02.2017	17:00	-15.95	53.91	55.91	53.81
08.02.2017	17:00	-8.47	53.63	55.34	52.91
09.02.2017	17:00	-10.05	53.14	55.22	52.83
10.02.2017	17:00	-3.47	52.92	54.81	52.61
11.02.2017	17:00	-5.01	52.52	54.52	52.62
12.02.2017	17:00	-4.68	51.79	53.83	51.62
13.02.2017	17:00	0.04	51.22	53.23	51.22

На основании полученных данных были построены графики зависимости величины испарения от температуры воздуха в приземном слое, представленные на рисунках 1.1.2.1 и 2.1.2.2. Эти зависимости достаточно наглядно отражают изменение веса испаряющихся образцов льда на протяжении всего эксперимента.

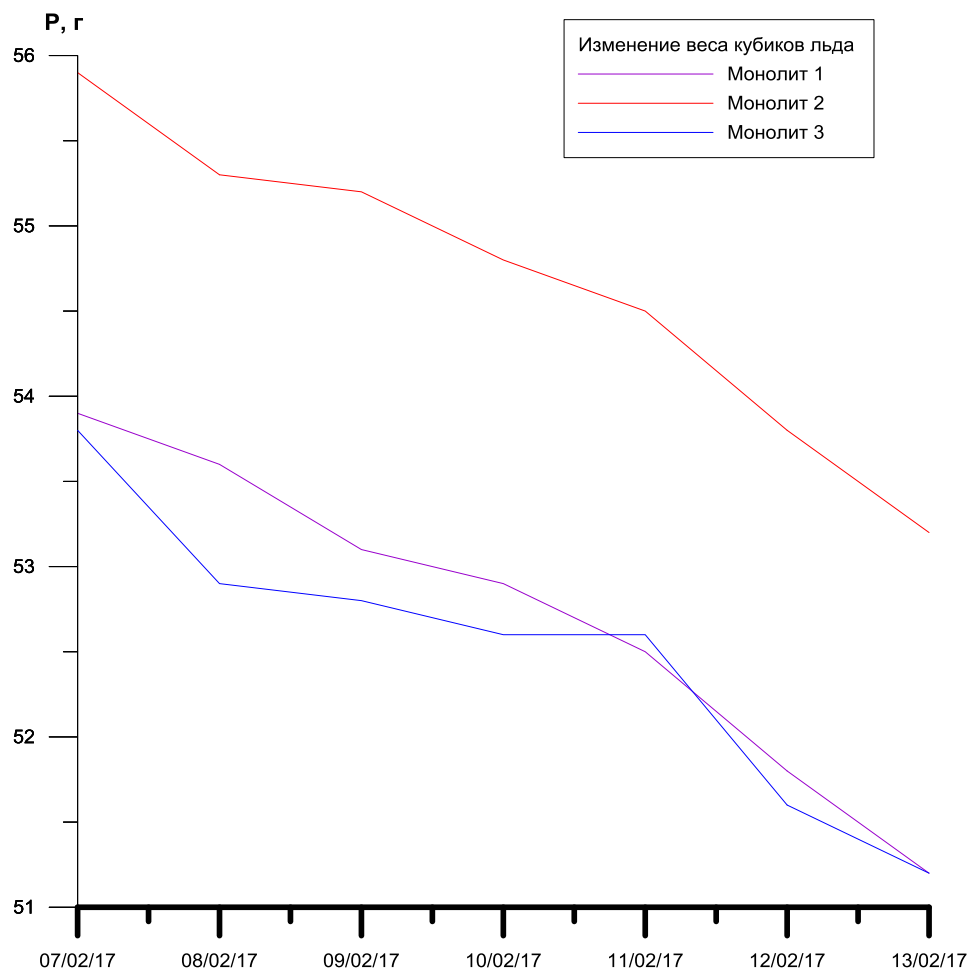


Рисунок 2.1.2.1 - График изменения веса монолитов льда за период наблюдений, г, эксперимент 2017 г.

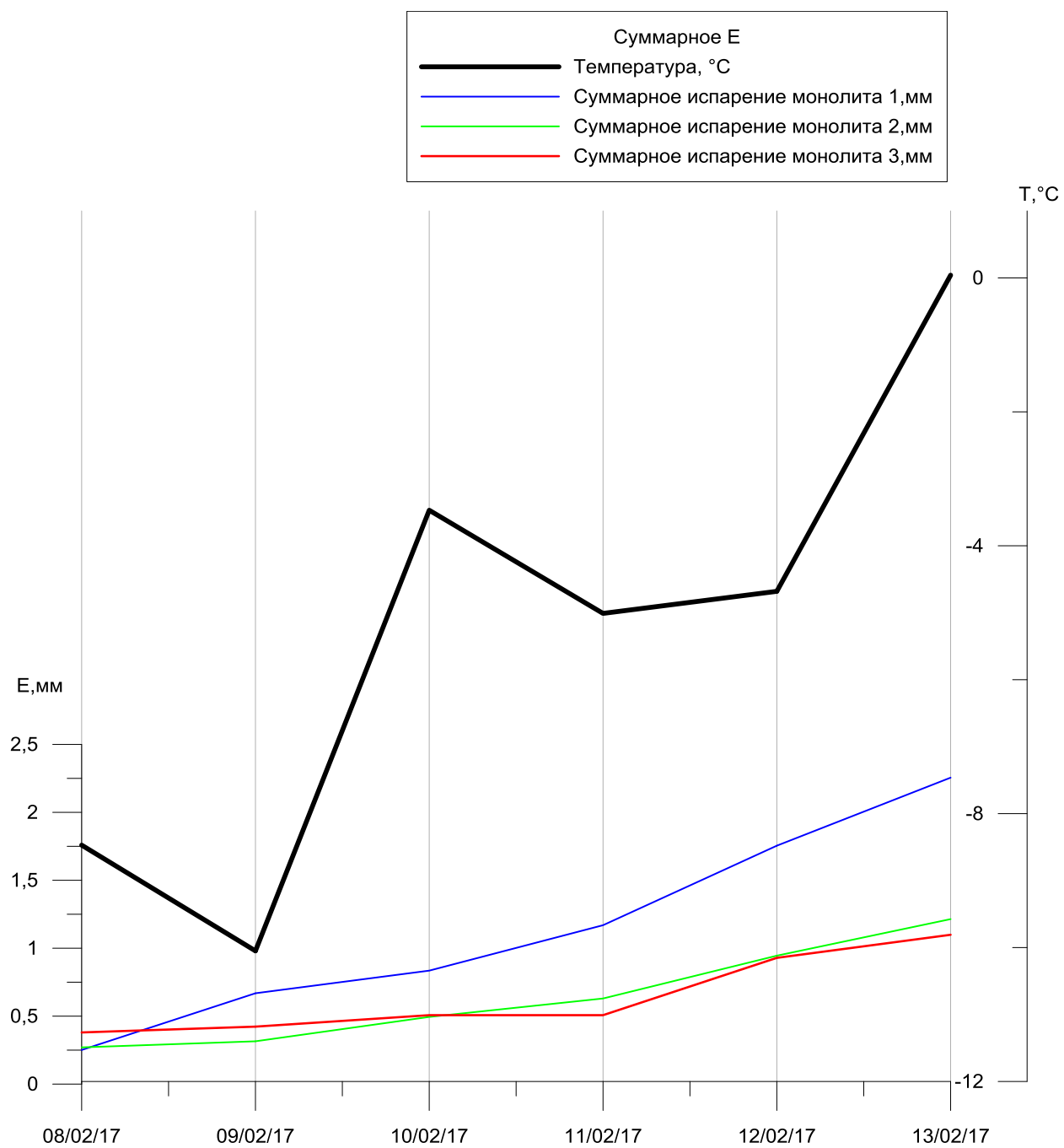


Рисунок 2.1.2.2 - Ход изменения температуры воздуха и суммарное суточное испарение, в мм, эксперимент 2017г.

В ходе эксперимента, параллельно, производились метеорологические наблюдения посредством метео - станции АМС АМК. Она расположена на территории метеоплощадки, на открытом участке местности, в 40 метрах от проведения эксперимента. Станция АМС АМК предназначена для автоматического сбора, первичной обработки, накопления и передачи результатов измерения параметров атмосферы, таких как: температура воздуха, температура почвы, относительная влажность воздуха, скорость и направление воздушного потока, атмосферное давление, количество осадков, высота снежного покрова и радиационный фон [12]. С ее помощью были определены температура воздуха, а также влажность и скорость ветра на высоте 10 метров (высота расположения датчиков).

2.1.3 Полученные результаты и методы их обработки

Для наглядности, сравнительные данные по экспериментальному и расчетному методам исследований, объемные потери (весовые потери) образцов были переведены в линейную размерность (мм). Эта размерность чаще всего используется для определения величины испарения с различных поверхностей. Пересчет произведен с учетом площади испаряемой поверхности (усеченного конуса), без учета нижнего основания.

Данная операция производилась по формуле:

$$\Delta h = \frac{\Delta m}{0.9 * F}, \quad (33)$$

где Δm – суммарные потери в г; F – площадь монолитов; 0,9 – плотность пресноводного льда, принятая к расчетам.

Полученные результаты расчетов по формуле (33) представлены в таблице 2.1.3.1.

Таблица 2.1.3.1 – Суточное испарение с монолитов льда, мм

Дата	Е монолита 1, г	Е монолита 2, г	Е монолита 3, г	Е монолита 1, мм	Е монолита 2, мм	Е монолита 3, мм
08.02.2017	0.25	0.27	0.38	0.25	0.27	0.38
09.02.2017	0.42	0.05	0.04	0.49	0.04	0.04
10.02.2017	0.17	0.18	0.08	0.17	0.18	0.08
11.02.2017	0.33	0.14	0.00	0.33	0.14	0.00
12.02.2017	0.59	0.32	0.42	0.59	0.32	0.42
13.02.2017	0.50	0.27	0.17	0.50	0.27	0.17
Суммарное Е	2.26	1.21	1.10	2.26	1.21	1.10

Рассчитаны значения испарения с поверхности снега по эмпирическим формулам Кузьмина П.П. и Постникова А.Н. [1,3,5] приведены в таблице № 2.1.3.2.

Таблица 2.1.3.2 – Суточное испарение с поверхности льда за расчетный период

Дата, время	Е за сутки (29)	Е за сутки (30)	Е за месяц (31)	Е за месяц (32)
07.-08. 02.2017	0,07	0,09	-	-
08-09.02. 2017	0,09	0,1	-	-
09-10. 02.2017	0,08	0,1	-	-
10-11. 02.2017	0,09	0,1	-	-
11-12. 02.2017	0,12	0,12	-	-
12-13. 02.2017	0,21	0,18	-	-
Суммарное Е	0,66	0,69	5,49	4,6

В Таблице № 2.1.3.2 приведены данные по испарению, рассчитанные по 4 формулам в соответствии с номерами.

Также, были рассчитаны статистические параметры ряда наблюдений. После оценки точности уравнения линейной регрессии, мы пришли к выводу, что для столь короткого ряда наблюдений применение статистического метода не совсем корректно, так как критерии оценки надежности ряда не выполняются.

2.1.4 Выводы, соответствующие поставленной задаче

Испарение, рассчитанное по эмпирическим формулам для поверхности снега, заметно меньше, чем испарение, рассчитанное нами, по данным натурных наблюдений, для поверхности льда. Полученные расхождения обусловлены малой продолжительностью ряда натурных наблюдений. Также, немаловажную роль сыграло то, что условия проведения эксперимента были далеки от естественных. Например, отсутствовали прямая солнечная радиация и ветровое воздействие.

Основываясь на полученных нами данных наблюдений, можно сделать вывод, что испарение с поверхности «открытого» образца льда происходит интенсивнее, чем с поверхности снега в реальных условиях.

Исходя из полученных выводов, в дальнейшем, планировалось развивать данную тематику в поисках подтверждения или опровержения полученных нами результатов. Предполагалось спланировать и осуществить задуманный эксперимент в условиях, приближенных к естественным, при различных параметрах атмосферы, с использованием более точных приборов. В результате планировалось определить зависимость испарения с поверхности льда в натурных условиях, и на основании статистических методов определить возможную связь испарения с поверхности льда и снега в течение суток. Это может позволить получить переходный коэффициент от формулы расчета испарения с поверхности снега - к формуле для расчета испарения с поверхности льда. А также, разработать предложения к программе полевых работ по исследованию процесса испарения в условиях арктической пустыни.

2.2 Эксперименты зимы 2018 года

2.2.1 Теоретическое обоснование поставленной задачи и методов исследования

Основной задачей этого года была разработка методики для количественной оценки испарения с поверхностей льда и снега в зоне арктической пустыни.

При этом был получен единый комплекс натурных наблюдений и работ, в состав которого вошли:

Наблюдения за запасами воды в снежном покрове:

- организация и выполнение наблюдений на снегомерной площадке, согласно действующим РД;
- выполняется измерение плотности снега посредством снегомера ВС – 43, принятого на сети Росгидромета;

Метеорологические наблюдения:

- параметры, необходимые для расчета испарения по эмпирическим формулам посредством АМС «АМК»;

Наблюдения за испарением с поверхности снега и льда:

- выполняется весовым способом на снегомерной площадке;

Комплексный подход в определение искомых параметров позволит экспериментально и эмпирически получать данные о величине испарения с поверхности льда и снега.

2.2.2 Организация и проведение натурных наблюдений

Чуть подробнее о наблюдении за испарением с поверхности снега и льда весовым способом. Предполагалось, что будут отобраны три образца: 2 образца льда и один образец снега. Образец снега и один образец льда помещаются в емкости, из материала с теплопроводностью, близкой к теплопроводности снега и врезаются вровень с поверхностью снега на снегомерной площадке. Во второй образец льда вмораживаются лески, и он подвешивается на определенную высоту на открытом участке местности. В установленное время каждые сутки образцы вынимаются и взвешиваются на предварительно подготовленных весах. Разность показаний между взвешиваниями пересчитывается в мм.

Отработка методики эксперимента проводилась на базе учебной практики РГГМУ, в поселке Даймище. Был организован комплекс наблюдений, а именно: отобраны образцы льда и снега и помещены в психрометрические будки (рис 2.2.2.1). В нашем распоряжении были весы от осадкомера Vaisala. Попеременно на них устанавливались отобранные образцы. Взвешивание происходило автоматически, ежеминутно. Данные записывались на ПК. Параллельно, поступала необходимая метеорологическая информация.

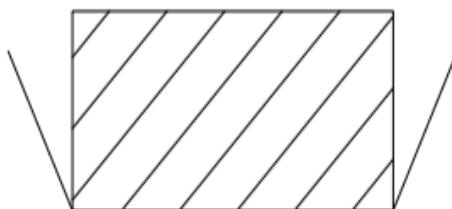


Рисунок 2.2.2.1 – Схема установки образцов

На рисунке 2.2.2.2 представлен график хода суточного испарения с поверхности снега за 17 февраля. Чтобы уйти от заметных колебаний, мы осредняли значение испарения за каждые сутки. Данная проблема требует дальнейшего рассмотрения.

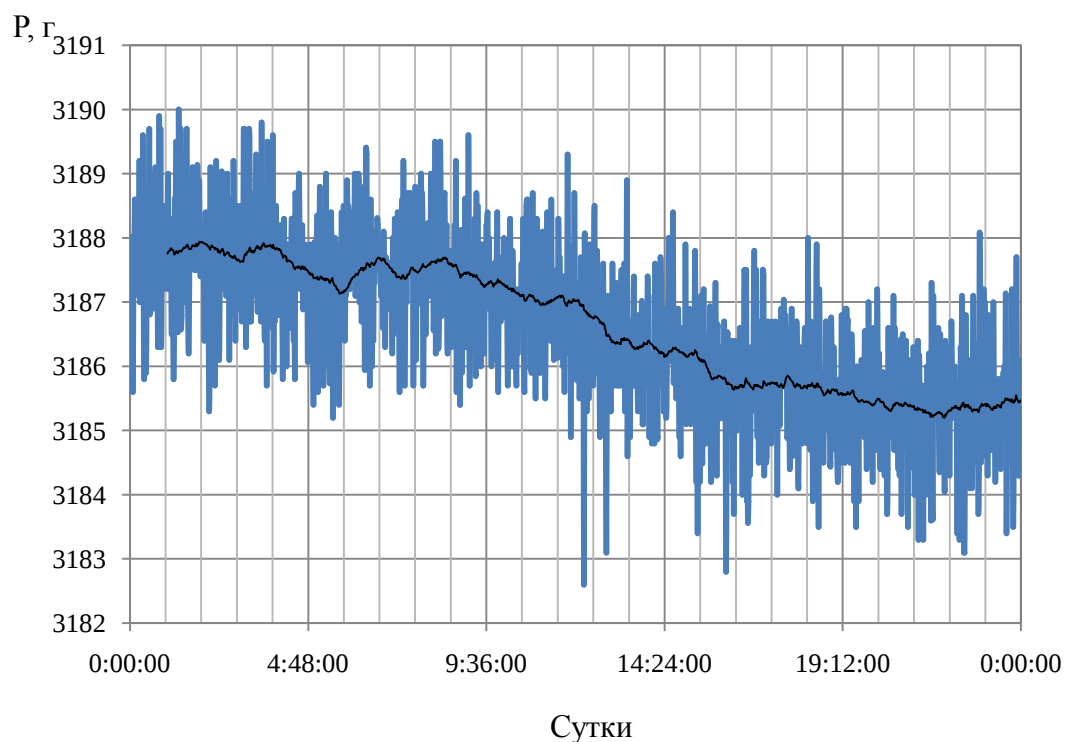


Рисунок 2.2.2.2 - График изменения значения веса в течение суток, эксперимент 2018 г.

2.2.3 Полученные результаты и методы их обработки

После исключения неподходящих значений, был отобран 33 суточный ряд наблюдений. В таблице 2.2.3.1 представлены осредненные значения веса образцов за каждые сутки, общие и ежесуточные потери веса, а также значение испарения за каждые сутки.

Таблица 2.2.3.1 – Сводная таблица результатов измерений 2018 г.

Дата	T, °C	m снег, г	m лед, г	Δ, г		Е, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8
14 февраля	-	-	-	-	-	-	-
15 февраля	-11.0	3192	4855	2	-	0.15	-
16 февраля	-5.6	3190	-	4	-	0.30	-
17 февраля	-3.7	3186	-	2	-	0.15	-
18 февраля	-3.4	3184	-	3	-	0.23	-
19 февраля	-4.5	3181	-	3	-	0.23	-
20 февраля	-8.2	3178	-	1	-	0.08	-
21 февраля	-14.3	3177	-	2	-	0.15	-
22 февраля	-14.9	3175	-	4	-	0.30	-
23 февраля	-12.7	3171	-	1	-	0.08	-
24 февраля	-15.4	3170	-	5	-	0.38	-
25 февраля	-10.0	3165	-	5	-	0.38	-
26 февраля	-11.7	3160	-	5	-	0.38	-
27 февраля	-16.8	3155	-	3	-	0.23	-
28 февраля	-17.3	3152	-	3	-	0.23	-
1 марта	-13.9	3149	-	5	-	0.38	-
2 марта	-11.7	3144	-	8	-	0.60	-
3 марта	-7.1	3136	4777	-	78	-	1.63
4 марта	-10.6	-	4773	-	4	-	0.08
5 марта	-10.0	-	4765	-	8	-	0.17

Дата	T, °C	m снег, г	m лед, г	Δ, г		E, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8
6 марта	-7.9	-	4752	-	13	-	0.27
7 марта	-6.6	-	4728	-	24	-	0.50
8 марта	-5.4	-	4709	-	19	-	0.40
9 марта	-2.0	-	4681	-	28	-	0.59
10 марта	-2.6	2998	4666	138	14	10.4	0.30
11 марта	0.8	2989	-	9	-	0.69	-
12 марта	-1.0	2975	-	14	-	1.09	-
Сумма	-	-	-	217	189	16.39	3.95

По таблице 2.2.3.1 видно, что испарение с поверхности снега происходит в 4 раза интенсивнее, чем с поверхности льда. Это связано с большей воздухопроницаемостью снега и как следствие, выносом водяного пара из более глубоких слоев снежного покрова.

Параллельно, было рассчитано испарение по формуле П.П. Кузьмина по метеорологическим данным, взятым с АМС АМК. Итоги представлены в таблице 2.2.3.2.

Таблица 2.2.3.2 – Испарение, рассчитанное по эмпирической формуле, для поверхности снега

Дата, время	E(t)	U10, м/с	Rh, %	d	E, мм
1	2	3	4	5	6
14.02.2018	3.21	0.37	82.4	0.57	0.15
15.02.2018	2.15	0.17	84.9	0.32	0.08
16.02.2018	2.94	0.32	84.1	0.47	0.12
17.02.2018	3.63	0.07	91.1	0.32	0.08
18.02.2018	3.74	0.03	89.8	0.38	0.09
19.02.2018	3.33	0.04	87.3	0.42	0.10
20.02.2018	2.53	0.02	85.3	0.37	0.09
21.02.2018	1.56	0.00	80.5	0.30	0.07
22.02.2018	1.47	0.17	79.9	0.30	0.07
23.02.2018	1.75	0.09	82.1	0.31	0.08
24.02.2018	1.38	0.31	78.9	0.29	0.07
25.02.2018	2.20	0.39	76.6	0.51	0.13
26.02.2018	1.82	0.41	68.9	0.57	0.15
27.02.2018	1.04	0.48	75.2	0.26	0.07
28.02.2018	1.11	0.59	75.0	0.28	0.07
01.03.2018	1.62	0.20	77.7	0.36	0.09
02.03.2018	2.04	0.47	73.0	0.55	0.15
03.03.2018	2.88	0.38	72.7	0.79	0.20
04.03.2018	2.15	0.49	76.1	0.51	0.14
05.03.2018	2.33	0.40	75.6	0.57	0.15
06.03.2018	2.45	1.76	62.1	0.93	0.30
07.03.2018	3.07	1.27	61.9	1.17	0.36
08.03.2018	3.65	1.68	71.4	1.05	0.34
09.03.2018	4.88	2.05	75.5	1.20	0.41
10.03.2018	5.18	1.57	81.7	0.95	0.30
11.03.2018	6.02	1.24	-81.0	10.90	3.29
12.03.2018	5.13	1.54	87.7	0.63	0.20
13.03.2018	7.29	1.92	97.1	0.21	0.07
14.03.2018	6.55	1.84	91.9	0.53	0.18
15.03.2018	3.37	1.20	70.9	0.98	0.29
16.03.2018	2.33	0.83	66.6	0.78	0.22
17.03.2018	2.73	0.68	70.8	0.80	0.22
18.03.2018	4.68	2.56	74.0	1.22	0.45
Сумма			75.8		8.78

Далее, испарение с поверхности льда рассматриваться не будет, из-за невозможности его сравнения с эмпирическими данными.

По полученным данным об испарение, рассчитанным этими способами, построен график суммарного испарения с поверхности снега

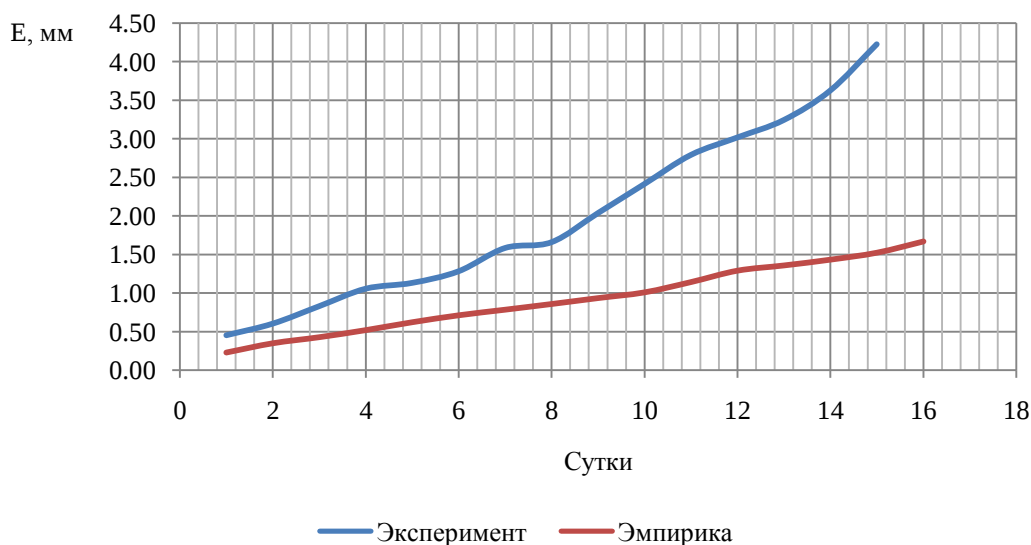


Рисунок 2.2.3.1 - График суммарного E с поверхности снега, эксперимент 2018 г.

Также, составлена сводная таблица для сравнения значений испарения с поверхности снега, рассчитанного по натурным данным и по эмпирическим формулам. Ряд сокращен в связи с неполными непрерывными наблюдениями за испарением с поверхности снега.

Таблица 2.2.3.3 - Сводная таблица значения E, рассчитанного разными способами

Дата	T, °C	E, мм	
		Формулы	Эксперимент
1	2	3	4
14 февраля	-	-	-
15 февраля	-11.0	0.15	0.15
16 февраля	-5.6	0.08	0.30
17 февраля	-3.7	0.12	0.15
18 февраля	-3.4	0.08	0.23
19 февраля	-4.5	0.09	0.23
20 февраля	-8.2	0.10	0.08
21 февраля	-14.3	0.09	0.15
22 февраля	-14.9	0.07	0.30
23 февраля	-12.7	0.07	0.08
24 февраля	-15.4	0.08	0.38
25 февраля	-10.0	0.07	0.38
26 февраля	-11.7	0.13	0.38
27 февраля	-16.8	0.15	0.23
28 февраля	-17.3	0.07	0.23
1 марта	-13.9	0.07	0.38
2 марта	-11.7	0.09	0.60
Сумма	-	1.52	4.22

Сравнение полученных данных показало, что испарение, полученное по формулам почти в 3 раза меньше испарения, по натурным данным. Весовой способ является более точным, так как учитывает большее количество факторов испарения.

На рисунке 2.2.3.2 видно, что пики суточного хода испарения, рассчитанного по эмпирическим формулам и натурным данным, разнонаправлены. Также, отмечается большая интенсивность испарения при более низких температурах окружающей среды. Вероятно, это связано с тем, что при более низких температурах устанавливается солнечная погода, а в такие дни испарение происходит активнее.

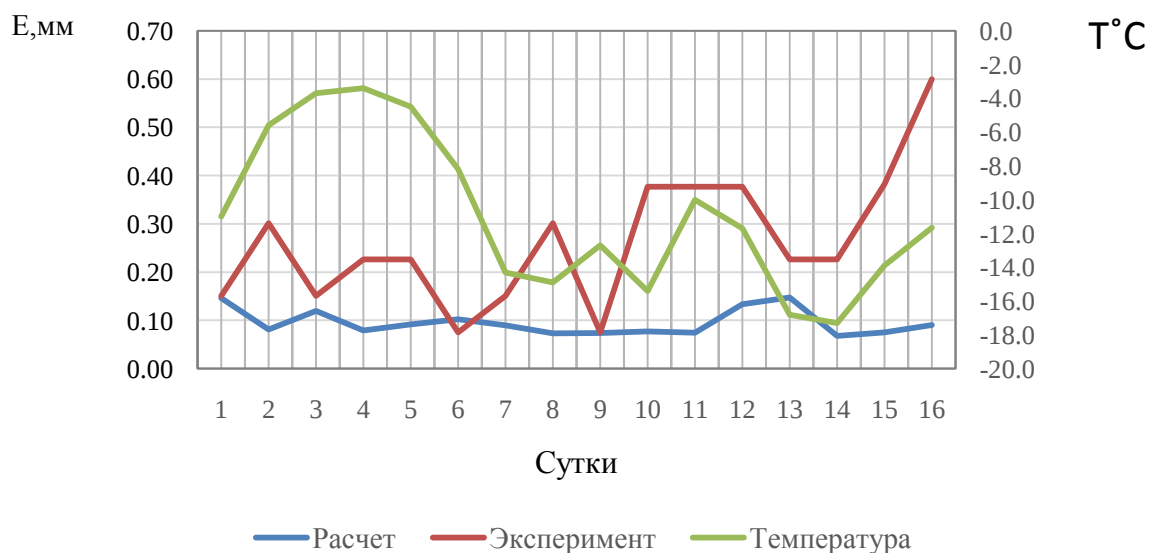


Рисунок 2.2.3.2 – Ход измеренного, рассчитанного испарения и температуры воздуха, эксперимент 2018 г.

Также, была выполнена проверка рядов на значимость тренда. На оси абсцисс были отложены значения суточных испарений, полученные в ходе эксперимента, на оси ординат – рассчитанные эмпирическим путем. По критерию $|R| < \sigma_{Rt_{2\alpha}}$, где $t_{2\alpha}$ – теоретическое значение статистики Стьюдента при уровне значимости $2\alpha = 5\%$, тренд не значим, и, следовательно, между рядами нет зависимости. Произведение $\sigma_{Rt_{2\alpha}} = 0,486$, а $R = 0,198$.

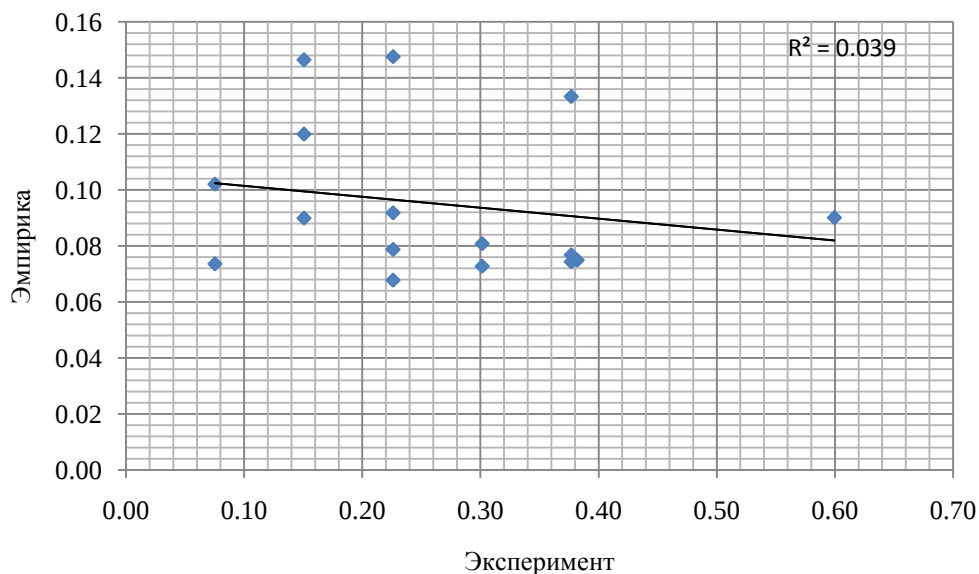


Рисунок 2.2.3.3 – Проверка тренда на значимость

Полученный вывод еще раз подтверждает, что лишь расчетных способов не достаточно, для определения фактического испарения с поверхности снега.

2.2.3 Выводы, соответствующие поставленной задаче

Отработка разработанной методики показала, что она, в целом эффективна. Полученные данные по разработанному перечню наблюдений дают возможность для полной оценки исследуемой воднобалансовой составляющей.

Далее, планируется апробация метода непосредственно в зоне Арктической пустыни. Собранные данные помогут в усовершенствовании методики наблюдений за испарением с поверхностей льда и снега в условиях высокоширотного климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нахождение значения испарения с поверхностей льда и снега имеет большое практическое значения для описания и прогнозирования процессов, возникающих в Арктических регионах в связи с изменяющимся климатом.

Поскольку значения испарения с поверхностей льда и снега для высокоширотных и среднеширотных зон несколько отличаются, появилась необходимость в детальном анализе и усовершенствовании имеющихся методик наблюдений за данными воднобалансовыми составляющими.

Нами была разработана методика для количественной оценки испарения с поверхностей льда и снега в зоне арктической пустыни. При этом был получен единый комплекс натурных наблюдений и работ.

Комплексный подход в определение искомых параметров позволил экспериментально и эмпирически получать данные о величине испарения с поверхности льда и снега.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 1. Наземная подсистема получения данных о состоянии природной среды. Основные положения и нормативные документы (РД. 52.04.107-86) (с 01.01.2009 в части разделов 2 и 3 заменен на РД 52.04.567-2003)
- 2) Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 7. Часть II. Наблюдения за испарением с водной поверхности
- 3) Руководство по производству наблюдений над испарением с почвы и снежного покрова
- 4) Руководство воднобалансовым станциям / ГГИ – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.:Гидрометиздат, 1973.-306с.
- 5) Руководство по градиентным наблюдениям и определению составляющих теплового баланса, Гидрометеиздат, Л., 1964 г.;
- 6) СТО ГГИ 52.08.37–2015. Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу
- 7) Р 52.08.280–90. Рекомендации. Отраслевые нормы времени на наблюдения за испарением с поверхности воды, почвы и снежного покрова
- 8) Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года: постановление Правительства РФ от 21 апреля 2014 г. N366г. //Рос. газ. – 2014. – 24 апр.
- 9) Кузьмин П.П. О расчетном и экспериментальном способах определения испарения с поверхности снежного покрова./ Кузьмин П.П. Материалы V закавказской научной конференции по изучению снежного покрова снежных лавин и ледников Кавказа Труды ЗАК НИГМИ Выпуск 58(64), Гидрометеиздат, Л., 1974 г.;
- 10) Константинов А.Р. Испарение в природе/ Константинов А.Р. Гидрометиздат Л., 1968 г.-532с;

- 11) Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши;
- 12) Окоренков В.Ю. Метрологическая надежность метеорологических средств измерений и автоматизированных информационно-измерительных систем. – СПб. : Астерион, 2013 – 312с. ;
- 13) А.М. Горчаков Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье/ А.М. Горчаков Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды дальневосточный Ордена трудового красного Знамени научно-исследовательский институт
- 14)/ В. А. Урываев/ Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. / В. А. Урываев - Л. : Гидрометеиздат, 1953. - 231 с. : ил. - Библиогр. в конце кн. - Б. ц.
- 15) Винников С.Д. Гидрофизика / Винников С.Д., Б.В. Проскуряков Гидрометиздат Л., 1988 г. – 248с.
- 16) А.Н. Постников Метод расчета испарения с почвы в различных природных зонах/ А.Н. Постников //Ученые записки РГГМУ, 2009г , №10, - 21-31с;
- 17) Постников А.Н. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России/ Постников А.Н. // Ученые записки РГГМУ , 2016 г, № 42, -55-63 с
- 18) Беспалов Д.П. Психрометрические таблицы / Беспалов Д.П. Козлов В.Н., Матвеев Л.Т. Л: Гидрометиздат, 1972г.-236с.
- 19) Беспалов Д.П. Психрометрические таблицы (Добавления для низких значений влажности) / Беспалов Д.П. Козлов В.Н., Матвеев Л.Т. Л: Гидрометиздат, 1976г.-31с.
- 20) https://pulscen.s3.amazonaws.com/assets/000/244/775/11b7_isparomier-ggi-3000.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJR44XLNRQVCSDJTQ&Expires=1525350002&Signature=MstCfPVcuoSIK2%2BXpjMyy%2BxQ5Mg%3D
- 21) <http://www.findpatent.ru/patent/5/51788.html>