ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ТИХООКЕАНСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Сидоренко Нина Юрьевна

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИСПАРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЮГА ПРИМОРСКОГО КРАЯ

1.6.21 – геоэкология (науки о Земле)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Бугаец Андрей Николаевич

Владивосток - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение
Глава 1. Современное состояние вопросов оценки испарения в задачах
гидрологического моделирования9
1.1 Развитие исследований, посвященных изучению испарения 11
1.2 История развития методов измерений и расчетов испарения в
гидрологических исследованиях 19
1.3 Методы оценки испарения в современных гидрологических моделях 32
Глава 2. Физико-географическая характеристика района исследований 39
2.1 Физико-географические условия района исследований 39
2.2 Гидрографическое описание исследуемых водосборов 51
2.3 Характеристика гидрологического режима рек 61
Глава 3. Методы исследования 65
3.1 Методы расчета потенциального испарения 67
3.2 Модель формирования стока HBV 78
Глава 4. Результаты моделирования динамики компонентов водного
баланса
4.1 Анализ фактического и расчетного испарения 85
4.2 Оценки чувствительности результатов моделирования к использованию
методов расчета потенциального испарения
4.3 Результаты моделирования динамики компонентов водного баланса 102
4.4. Геоэкологическое обоснование выбора метода расчета испарения при оценке притока в лимитирующий период на примере Раковского
водохранилища
Заключение 116
Список литературы 119

Введение

Актуальность исследования связана с решением одной из важнейших задач геоэкологии в области изучения роли геосферных оболочек Земли в глобальных циклах переноса воды, а именно исследовании испарения как одного из основных компонентов водного баланса, обеспечивающего обновление и перераспределение водных ресурсов в земной биосфере. В условиях умеренного климата испарение является основным компонентом водного баланса и может составлять более половины годового объема влаги, поступающего на дневную поверхность [Львович, 1986; Клиге и др., 1998]. Как в пространственном, так и во временном отношении испарение представляет собой сильно изменчивый природный процесс, для описания которого требуется привлечение методов гидрологического моделирования, основанных на корректном математическом описании гидрологических процессов.

Эффективность применения тех или иных методов расчета испарения прежде всего связана с проблемой соотнесения пространственных масштабов с измерений практически интересующих объектов размерами гидрологических исследований. Наиболее распространенным способом оценки испарения в гидрологических моделях является преобразование потенциальной эвапотранспирации (Potential Evapotranspiration, PET) в актуальную, или фактическую (Actual Evapotranspiration, AET). Выбор методов оценки РЕТ для применения в гидрологических моделях практически не регламентируется. Метод Пенмана-Монтейса [Monteith, 1965] считается универсальным для применения в различных климатических условиях, но его использование требует наличия ряда климатических характеристик, которые могут быть недоступны на всех станциях. В регионах, где недостаточно данных для использования комплексного метода Пенмана-Монтейса или его эквивалентов, для оценки потенциального испарения обычно используются более простые методы, требующие меньшее количество входных данных.

Однако применение альтернативных методов или уравнений для оценки потенциального испарения в районе исследования должно быть соответствующим образом обосновано.

Целью исследования является оценка влияния различных методов расчета потенциального испарения на эффективность и результаты гидрологического моделирования динамики компонентов водного баланса и процессов формирования стока.

Задачами исследования являются:

- сравнение результатов расчетов среднемесячных значений испарения полученных с помощью различных методов с результатами расчетов по методу Будыко, данными водных испарителей и наблюдениями, выполненными с помощью испарителей на экспериментальных водосборах, расположенных в районе исследования;
- калибровка и верификация гидрологической модели с использованием РЕТ, полученного с помощью наиболее часто применяемых в практике гидрологического моделирования методов, различающихся детальностью описания процессов испарения и требованиями к составу исходных данных;
- сравнение результатов расчетов динамики элементов водного баланса и параметров модели при использовании различных методов расчета потенциального испарения;
- сформулировать региональные рекомендации для выбора методов расчета испарения в гидрологических моделях с учетом целей моделирования, репрезентативности сети и состава данных наблюдений;
- на основе геоэкологического подхода обосновать рекомендации по выбору метода расчета потенциального испарения для расчета притока к водохранилищам питьевого и хозяйственно-бытового назначения в лимитирующие периоды.

Объектом исследования являются 18 водосборов, площадью от 2.4 до 755 км², расположенных в пределах бывшей Приморской воднобалансовой

станции. Территория относится к водосборам рек Комаровки и ее главному притоку – Раковке, которые расположены в Уссурийском и Михайловском районе Приморского края.

Область исследования соответствует паспорту специальности ВАК, шифр 1.6.21 – Геоэкология (Науки о Земле) по пунктам: 1.2. «Изучение роли оболочек в глобальных геосферных циклах переноса 1.7. воды»; «Геоэкологические аспекты устойчивого 1.16. развития регионов»; «Моделирование геоэкологических процессов». В ходе исследования проведено моделирование гидрологических процессов с использованием различных методов расчета потенциального испарения. Определены ограничения использования методов расчета потенциального испарения в зависимости от детальности описания процессов и даны общие рекомендации по использованию полученных с применением этих методов результатов гидрологического моделирования для региональных исследований в области изучения динамики компонентов водного баланса и управления водными ресурсами.

Методы исследования. В работе использованы четыре метода расчета потенциального испарения: Пенмана-Монтейса [Monteith, 1965], Пристли-Тэйлора [Priestley, Taylor, 1972], Одина [Oudin et al., 2005b] и Харгривза [Hargraves, Samani, 1985]. Указанные методы являются наиболее часто применяемыми в практике гидрологического моделирования [Zhao et al., 2013], при этом они достаточно сильно отличаются друг от друга детальностью описания процессов испарения и требованиями к составу исходных данных. Методы Пенмана-Монтейса и Пристли-Тэйлора относят к физически-обоснованных методов определения потенциального классу испарения, Одина и Харгривза – являются эмпирическими зависимостями. В качестве методической основы гидрологического моделирования использована широко известная концептуальная модель с открытым кодом HBV, в которой потенциальное и актуальное испарение связаны текущим состоянием емкости, имитирующей динамику почвенного влагозапаса. Для

обработки и оценки результатов моделирования использованы принятые в гидрометеорологии критерии эффективности, методы пространственного и статистического анализа.

Научная новизна работы состоит в предложенных автором научно обоснованных рекомендациях для выбора методов расчета потенциального испарения в гидрологических моделях с учетом целей моделирования, репрезентативности сети и состава данных наблюдений.

Практическая проведенных исследований. Снижение значимость неопределенностей при моделировании генетических составляющих речного стока является основанием масштабирования полученных в результате калибровки модели значений параметров модели и гидрофизических характеристик подстилающей поверхности водосбора по принципу ландшафтного сходства. На основе результатов моделирования даны региональные рекомендации по применению методов расчета потенциального испарения при решении задач в области оценки водных ресурсов и потенциала их использования.

Достоверность и апробация результатов. В работе использованы данные Росгидромета, широко применяемые в гидрологической практике модель HBV и методы расчета потенциального испарения. Материалы диссертации использованы в рамках работы автора по теме НИОКТР АААА-А20-120031990013-1 (ФГБУ «ДВНИГМИ»), докладывались на заседаниях Ученого совета «ДВНИГМИ», семинарах лаборатории гидрологии и климатологии ТИГ ДВО РАН. Основные положения диссертации доложены и представлены конференций: 1) «Географические В ходе четырех научных И геоэкологические исследования на Дальнем Востоке», Владивосток, 04-05.12.2008; 2) «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов», 24-28.08.2010; 3) «Третьи Барнаул, виноградовские чтения. Грани гидрологии», Санкт-Петербург, 28–30.03.2018; 4) «Гидрометеорологическое обеспечение на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири: наука и практика», Владивосток, 20-22.08.2024 г.

Предметом защиты являются оценки эффективности результатов гидрологического моделирования в зависимости от методов расчета потенциального испарения и региональные рекомендации по применению этих методов с учетом детальности описания процессов испарения и требованиями к составу исходных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- Только физически-обоснованные методы демонстрируют удовлетворительное соответствие с результатами вычисления среднемесячных значений потенциального испарения методом Будыко и данными измерений, полученными с помощью водных испарителей.
 Эмпирические методы более точно воспроизводят максимумы теплого период года, при этом, среднемноголетние значения потенциального испарения имеют значительное положительное смещение.
- При моделировании гидрографа стока применение более сложных методов расчета потенциального испарения не приводят к более высоким оценкам эффективности моделирования. При использовании эмпирических моделей испарения, завышение значений потенциального испарения необходимо компенсировать с помощью менее физически обоснованных значений параметров моделей, при этом динамика элементов водного баланса искажается относительно региональных данных.
- Разница в оценке влияния испарения на сток при применении методов Пенмана-Монтейса и его упрощения – метода Пристли-Тейлора незначительна, из чего можно заключить, что менее требовательный к исходным данным метод Пристли-Тейлора может быть предпочтительным в контексте региональных исследований водного баланса.

Личный вклад соискателя. Представленные в диссертационной работе результаты исследований, получены автором или при непосредственном его участии.

Публикации. По теме исследования опубликовано 8 работ, отражающих основные положения исследования, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и индексируемых международной системой цитирования Web of Science.

Практическая значимость работы заключается в представленных в работе научно-обоснованных региональных рекомендациях для выбора методов расчета потенциального испарения в гидрологических моделях с учетом целей моделирования, репрезентативности сети состава данных наблюдений.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 239 наименований. Объем работы составляет 144 страницы, включая 32 иллюстрации и 7 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному соавторам, принявшим руководителю, всем участие В проведении исследования и публикациях, коллективу сотрудников ДВНИГМИ, ТИГ ДВО РАН и ИВП РАН, благодаря взаимодействию с которыми были достигнуты результаты, положенные в основу диссертационного исследования, а также УГМС, коллективу Приморского предоставившему данные гидрометеорологического мониторинга.

Глава 1. Современное состояние вопросов оценки испарения в задачах гидрологического моделирования

Исследования водного и теплового балансов занимают значительное место в области наук о Земле. Основной целью этих исследований является изучение закономерностей, определяющих метеорологический И гидрологический режим различных географических районов, и использование полученных обобщений как при изучении общих проблем физической географии, включая проблему географической зональности, так и для расчета и прогноза важных с практической точки зрения гидрометеорологических процессов и явлений [Будыко, 1948]. Рост запросов к данным тепловоднобалансовых наблюдений и расчетов оказал значительное влияние на исследований, изучению развитие климатологических посвященных пространственного распределения составляющих теплового баланса.

Перераспределение тепла в атмосфере в вертикальном направлении осуществляется в процессе влагообмена, связанного с тратой тепла на уровне подстилающей поверхности и с выделением тепла конденсации в атмосфере, а также в процессе турбулентного теплообмена [Будыко, 1948]. В течение года на земную поверхность выпадает более 500 тыс. км³ атмосферных осадков, из которых две трети возвращается в атмосферу с поверхности земли за счет суммарного испарения, что делает его ключевым элементом гидрологического цикла [Baumgartner et all., 1975]. В условиях умеренного климата испарение является основным компонентом водного баланса и может составлять более половины годового количества, поступающего на дневную поверхность, объема влаги [Львович, 1986; Клиге и др., 1998]. При исследованиях испарения как элемента водного баланса речных водосборов основное внимание уделяется оценке суммарного количества испарившейся влаги за расчетный интервал времени, однако речной бассейн включает разнородные участки, характер поверхности которых изменяется по территории и во времени. Поэтому испарение с речного бассейна складывается из испарения с

поверхности почвы, воды, болот, снега (зимой), осадков, задержанных растительностью, и транспирации (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1. Виды испарения

Испарение с речных водосборов на протяжении более или менее продолжительного периода, включающее в качестве составных частей почти все из перечисленных видов испарения, часто называют суммарным испарением, в котором сочетаются доли влаги, испарившейся разными путями [Булавко, 1971]. С участков суши, покрытых растительностью, общее испарение складывается из трех составляющих: испарения с почвы под растительным покровом, транспирации растительностью и испарения осадков, задержанных наземными частями растений [Чеботарев, 1978]. Такой комплексный вид испарения принято называть эвапотранспирацией.

Роль и значение отдельных видов испарения зависят от характеристик водосбора (озерность, заболоченность, почвенный и растительных покров) и времени года. В условиях зон достаточного и избыточного увлажнения основную роль в суммарном испарении играют: летом – испарение с поверхности почвы и транспирация растительного покрова, а зимой – испарение с поверхности снега. Весной и осенью повышается доля испарения с почвы. Испарение с водной поверхности при расчетах водного баланса речных водосборов следует учитывать лишь в тех случаях, когда площадь

водной поверхности занимает значительную долю общей площади водосбора. [Булавко, 1971]. Так как гидрографическая сеть любого бассейна составляет по площади менее 1 % всего водосбора, то роль испарения с водной поверхности в водном балансе речных водосборов пренебрежимо мала и доля испарения со свободной водной поверхности в суммарном испарении водосбора, главным образом, зависит от его озерности [Константинов, 1968].

Испарение (состоящее из транспирации, испарения с почвенного покрова, водной поверхности и сублимации) наряду с атмосферными осадками И речным стоком являются основными переменными, определяющими водный баланс участка суши. Испарение с речных бассейнов представляет собой сложный многокомпонентный процесс. Трудности его большим не только с количеством различных оценивания связаны составляющих испарения, но и с тем, что они сложно взаимодействуют друг с другом в пространственном и внутригодовом аспекте. Попытки точного измерения бассейнового испарения путем детализации измерения отдельных составляющих и их суммирования, как правило, не приводят к успеху [Попова, Гарцман, 2012].

Несмотря на большое количество исследований, направленных на установление основных закономерностей и разработку эффективных методов определения испарения с различных подстилающих поверхностей, существующие в настоящее время способы расчета испарения значительно менее точны, чем способы определения других членов водного баланса (осадков, стока). В следующих разделах главы будут рассмотрены основные этапы развития методов изучения тепло- влагообмена на границе подстилающая поверхность – атмосфера.

1.1 Развитие исследований, посвященных изучению испарения

Первые исследования процессов испарения были начаты в 19 веке такими учеными и исследователи как Дж. Дальтон, Г.В. Рихман, Г.И. Вильд,

Э.В. Штеллинг и др. Дальнейшее развитие исследований испарения связано с появлением в начале 20 века работ русских гидрологов Оппокова Е.В., Ольдекопа Е.М. и почвоведа Коссовича П.С., которые в итоге повлияли на развитие ряда современных научных направлений данной области. В работе «О режиме речного стока в бассейне верхнего Днепра» Е.В. Оппоков получил весьма важный вывод о существенной изменчивости членов водного баланса бассейнов от года к году в связи с изменчивостью метеорологических условий [Будыко, 1948]. Также большое значение имела работа Е.М. Ольдекопа «Об испарении с поверхности речных бассейнов», опубликованная в 1911 году, где впервые рассматривался механизм взаимодействия водного и теплового баланса. На основании обширного материала наблюдений за осадками, стоком и испарением для ряда бассейнов были получены качественные выводы о взаимосвязи этих членов водного баланса и предложена количественная эмпирическая формула, связывающая испарение, осадки и сток. Роль этого исследования освещена в работе Д.Л. Соколовского «Обзор исследований по вопросам речного стока и методики его расчетов» [Соколовский, 1946].

Во второй половине 20 века большой вклад в развитие исследований испарения внесли такие отечественные ученые как Будыко М.И, Урываев А.П., Константинов А.Р., Бабкин В.И., Булавко А.Г., Вершинин А.П., Вуглинский В.С., Зубенок Л.И., Браславский А.П., Будаговский А.И., Кузнецов В.И., Викулина З.А., Голубев В.С. и многие другие. Михаилом Ивановичем Будыко в монографии 1948 года «Испарение в естественных условиях» [Будыко, 1948] был предложен метод, позволяющий связать испарение с насыщенностью почвы влагой и энергетическим балансом поверхности. В математических моделях климата, которые в настоящее время используются в зарубежных и российских климатических центрах, для расчетов изменений испарения и почвенной влаги до сих пор используется метод, предложенный М.И. Будыко более 75 лет назад.

В числе важных научных трудов следует отметить также монографию Урываева В.А. «Экспериментальные гидрологические исследования на

Валдае» [Урываев, 1953], и монографию Константинова А.Р. «Испарение в природе» [Константинов, 1968], посвященную вопросам измерения испарения с поверхности почвы, воды и снега, расчету испарения различными методами, а также исследованиям режима испарения в естественных условиях.

Следующий важный этап развития отечественных и зарубежных исследований связан с разработкой так называемых комплексных схем расчета испарения. Согласно этим схемам, оценка испарения происходит в два этапа: на первом этапе оценивается испаряемость (максимально возможное испарение в определенных условиях), а на втором, в зависимости от принятых гипотез участия почвенной влаги в испарении, осуществляется ее переход от испаряемости к испарению [Будыко, 1948, 1952; Penman, 1963].

Концепция потенциального суммарного испарения (Potential Evapotranspiration, PET) была впервые представлена Торнтвейтом в 1948 году для классификации климата, и затем была популяризирована в сельском хозяйстве и водных ресурсах как предварительный расчет фактического суммарного испарения (Actual Evapotranspiration, AET). АЕТ зависит не только от влагозапаса почвы, но и от дефицита влаги в воздухе, состояния растительности. РЕТ – это максимально возможная скорость испарения, которая происходит с непрерывно насыщаемой поверхности (при отсутствии дефицита влаги) в окружающих метеорологических условиях [Thornthwaite, 1948, Lhomme, 1997]. Таким образом, если достаточное количество воды доступно для испарения и транспирации, действительное суммарное испарение АЕТ достигнет максимального потенциального значения. В противном случае АЕТ будет меньше РЕТ.

В 1948 году Х.°Л.°Пенман [Penman, 1948] объединив методы теплового баланса и турбулентной диффузии, получил уравнение для расчета испарения с поверхности открытой воды на основе стандартных климатологических данных о солнечной радиации, температуре, влажности и скорости ветра. [Penman, 1963, Пенман, 1968] Для перехода от испаряемости к испарению Пенман использовал гипотезу Веймейера

[Veihmeyer, Hendrickson, 1950] о скорости извлечения почвенной влаги растениями и на ее основании ввел понятия «константа корневых систем», а также потенциальный и фактический дефицит почвенной влаги. Под константой корневой системы растений понимается то количество почвенной влаги, которое может быть легко извлечено данным типом растительности из данной почвы (например, мощностью 25 мм). Следующие 25 мм почвенной влаги извлекаются корневой системой уже с затруднением и степень ее извлечения становится незначительной [Бабкин, Вершинин, 1973].

Позже, для учета растительности и создаваемого ею аэродинамического сопротивления, модель испарения Пенмана была дополнена Монтейсом Дж. Л. [Monteith, 1965]. Поверхностное сопротивление в формуле Монтейса описывает сопротивление потока пара через отверстия устьиц растений, общую площадь поверхность Аэродинамическое листа И почвы. сопротивление представляет собой сопротивление растительности при росте вверх и связано с трением воздуха, протекающего над растительным покровом. Хотя процесс обмена в вегетационном слое слишком сложен, чтобы полностью описываться двумя факторами сопротивления, была получена высокая корреляция между измеренным и вычисленным значением эвапотранспирации, особенно для однородной эталонной поверхности травы. Поэтому, для того чтобы избавиться от необходимости определять уникальные параметры испарения для каждой культуры, высоты растения и стадии роста, авторами была введена концепция эталонной поверхности: «гипотетической эталонной культуры с предполагаемой высотой посева 0.12 м, фиксированным поверхностным сопротивлением 70 с/м и альбедо 0.23» [Allen et al., 1998].

Потенциальное суммарное испарение (РЕТ) является важным показателем водного баланса в различных пространственных масштабах. Оно является важной переменной при оценке фактического суммарного испарения, моделировании речного стока и динамики компонентов эко/геосистем. Однако

в литературе термин «потенциальное суммарное испарение» определяется поразному, и количественная оценка РЕТ с использованием существующих математических формул часто дает противоречивые результаты.

Относительно недавно была разработана концепция эталонного суммарного испарения (ET_0) – которое определяется как скорость, с которой почвенная влага испаряется с поверхности, где развит определенный вид растительности [Jensen, Burman, 1990]. Эта концепция разработана для стандартизации оценки использования воды сельскохозяйственными культурами и отражает изменения в устьицах растений и аэродинамическом сопротивлении. При применении на водосборах, где данные 0 землепользовании не учитываются, или учитываются как однородное покрытие (например, в моделях с сосредоточенными параметрами) этот коэффициент может быть оценен с большими погрешностями [Bos et al., 2009], и в подобных случаях обычно используется концепция РЕТ.

В настоящее время существует большое количество формул расчета РЕТ. Их можно разделить на пять групп, в основе которых лежит: 1) водный баланс, 2) массоперенос, 3) комбинированный метод, 4) метод, основанный на солнечной радиации и 5) метод, основанный на температуре воздуха [Xu, Singh, 2001].

Множество формул расчета РЕТ затрудняет выбор такой формулы, которая в наибольшей степени соответствовала бы сформулированным целям и задачам, поэтому они часто анализируются и сравниваются для конкретной исследуемой гидрологической системы [Verstraeten et al., 2008; Brutsaert, 1982; Singh, 1989; Chiew et al., 1995; Jensen et al., 1990; Morton, 1994; Singh, Xu, 1997a; Xu, Singh, 2000, 2001, 2002; Cermak et al., 2004; Fisher et al., 2005; Oudin et al., 2005a, 20056; Donohue et al., 2010]. Формула Пенмана (или ее вариант Пенмана-Монтейса) из-за ее признанной согласованности с измерениями испарения лизиметрами используется в качестве эталона Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) [Jensen, Burman, 1990, Allen et al., 1998; Oudin et al., 2005а] и Американской ассоциацией гражданских инженеров (American Society of Civil Engineers, ASCE) [Allen et al., 2005] используется многочисленными метеорологическими службами. Однако, некоторые авторы (например, [Singh, Xu, 19976]) показали, что комплексная формула Пенмана-Монтейса приводит к лучшим оценкам только в том случае, если входные переменные хорошо измеряются или оцениваются с высокой точностью, что требует существенного объема исходных данных.

В работе [Mintz, Walker, 1993] для 36 водосборов, расположенных на юго-востоке Соединенных Штатов, площадью от 0.25 до 8213 км², в основном покрытых лесом, было проведено сравнение трех методов расчета РЕТ, основанных на температуре воздуха (Торнтвэйта, Хамона и Харгривза-Самани) с тремя методами Тюрка, Маккинка и Пристли-Тейлора, основанных на применении данных солнечной радиации. Исследование показало, что значения РЕТ, рассчитанные с помощью всех шести методов, были сильно коррелированы – коэффициент корреляции Пирсона составил от 0.85 до 1.0. Однако многомерные статистические тесты показали, что значения РЕТ, полученные различными методами, значительно отличались друг от друга. Между методами РЕТ, основанными на температуре, были обнаружены большие различия, чем между методами, основанными на солнечной радиации. В целом, методы Пристли-Тейлора, Тюрка и Хамона показали лучшие результаты, чем остальные. Основываясь на критериях доступности исходных данных и корреляции со значениями фактического суммарного испарения, методы Пристли-Тейлора, Тюрка и Хамона были рекомендованы для регионального применения в юго-восточной части Соединенных Штатов.

В работе Фармера и др. [Farmer et al., 2011] поднимается проблема существования большого количества моделей РЕТ, ориентированных на использование ежемесячных методов расчета испарения, в то время как на самом деле высока потребность в данных, связанных с методами, обеспечивающими расчет РЕТ в суточном разрешении. Ежемесячные оценки являются ценными в качестве основы для понимания процессов водного и теплового баланса, но для практических приложений требуются данные более высокого временного масштаба.

Согласно исследованиям FAO, модифицированный метод Пенмана-Монтейса (FAO-56) является наиболее широко используемым методом расчета суммарного испарения с суточным временным шагом [Jensen, 1990; Doorenbos, 1979; Allen et al., 1996]. Среди ключевых параметров модифицированного метода Пенмана-Монтейса – измеренные данные о температуре воздуха, скорости ветра, суммарной радиации и дефиците давления водяного пара. Но полные наборы данных измерений, содержащие все эти величины, встречаются редко, даже с месячными временными интервалами.

В работе [Fisher, Pringle, 2013] для гумидных условий штата Миссисипи выполнено сравнение результатов расчетов РЕТ с использованием основного метода FAO-56 и трех альтернативных: 1) сокращенного варианта FAO-56, 2) метод Харгривза и 3) Тюрка. Показано, что уравнение Тюрка, в котором качестве исходных данных были использованы измеренные температуры воздуха и расчетные значения солнечной радиации, дает лучшие оценки суммарного испарения по FAO-56, чем другие методы. В работе [Droogers, Allen, 2002] было продемонстрировано, что адекватные оценки РЕТ можно рассчитать на основе широкодоступных месячных характеристик (максимум, минимум, среднее) температуры воздуха и количества осадков.

Требования к данным делают применение метода Пенмана-Монтейса проблематичным, особенно в регионах мира с редкой сетью гидрометеорологического мониторинга. В подобной ситуации наиболее эффективным решением может быть использование продуктов реанализа и прогнозов глобальных численных моделей климата и погоды, например, данные реанализов ECMWF [Hersbach et al., 2020], NCEP [Saha et al., 2014], JMA [Kobayashi et al., 2015] и NASA [Rienecker et al., 2011].

В работе [Мотовилов и др., 2022] на основе статистического анализа суточных рядов наблюдений на 1719 метеостанциях России получена

приближенная формула для расчета среднесуточного дефицита влажности воздуха по среднесуточной температуре воздуха и суточным суммам осадков. Формула предложена с целью сокращения в региональных моделях формирования стока количества метеорологических данных, необходимых для оценки суммарного испарения за счет исключения менее доступной информации об измеренных дефицитах влажности воздуха. С помощью статистических критериев авторами показано, что расчеты с использованием приближенной формулы для большинства сравниваемых водосборов дают примерно такую же точность результатов моделирования, что и расчеты с использованием фактических дефицитов влажности воздуха.

В целом современные исследования динамики испарения могут быть дифференцированы на три основные группы:

- Гидрологические работы, наиболее многочисленные, в большинстве случаев посвящены изучению испарения для определения его влияния на водный режим рек и озер [Кузьмин, Зубенок, 1968; Качалова, 1985; Федюшин, 1985; Лобанов, 1987; Шерешевский, Ткаченко, 1987; Космакова и др., 1989; Кочиашвилли, 1990; Голубев, Цыценко, 1992; Голубев и др., 2002; Сперанская, Фуксова, 2018; и др.].
- Метеорологические работы рассматривают, главным образом, влияние испарения на трансформацию воздушных масс; агрометеорологические исследования посвящены определению влияния испарения на водный режим почвы и растений.
- Океанографические исследования обычно имеют своей целью изучение испарения как характеристики теплового баланса океанов, а также выяснение связей испарения с соленостью воды и океаническими течениями.

Гидрологические работы можно разделить на работы, посвященные испарению с водной поверхности и на работы, направленные на изучение испарения с поверхности суши. В контексте диссертационного исследования наиболее важными являются работы первого направления, более подробный обзор которым дан ниже.

1.2 История развития методов измерений и расчетов испарения в гидрологических исследованиях

Данные наблюдений являются фундаментальной основой геофизики. Для изучения различных видов испарения разработано большое количество принципиально отличных друг от друга методов и приборов: испарителей и лизиметров, методов водного баланса и теплового баланса, турбулентной диффузии, комплексные методы, а также большое количество эмпирических формул. Важнейшее место в изучении испарения принадлежит приборам – это, главным образом, испарители и лизиметры, которые позволяют непосредственно измерять испарение с поверхности суши или водной поверхности. В нашей стране термин «испаритель» применяется для приборов, измеряющих испарение как с поверхности суши, так и воды. В зарубежных странах прибор для измерения испарения с поверхности суши который приобрел называют лизиметром термином, широкое распространение к середине XIX в.

Широкое применение этих устройств объясняется простотой производства наблюдений и обработки материалов. Оценка испарения с поверхности воды производится по разности уровней воды в испарителе, с учетом выпавших осадков за период. С поверхности почвы – по изменению веса почвенного монолита, помещенного в испаритель, с учетом выпавших осадков за период и количества воды, просочившейся через монолит. Данные, полученные с помощью различных испарителей, используются для проверки методик расчета испарения, исследования гидрологического режима и изучения факторов, обусловливающих процесс испарения в естественных условиях.

Испарители, используемые в нашей стране, по своему назначению делятся на приборы для измерения испарения с поверхности суши, и приборы

для измерения испарения с поверхности воды. Приборы для измерения испарения с поверхности суши подразделяются на гидравлические и весовые почвенные испарители. В гидравлических испарителях изменение запаса влаги в почвенном монолите определяется по величине погружения монолита (при изменении его веса) относительно уровня воды в баке, в котором плавает монолит, заключенный в металлический цилиндр. В весовых испарителях используется принцип механического взвешивания, он основан на методе водного баланса с той лишь разницей, что изменение влагосодержания слоя почвы между двумя сроками наблюдения определяется не путем измерения влажности почвы, а по изменению веса вырезанного из почвы монолита, который заключен в испаритель (рисунок 1.2).

Основное преимущество гидростатического принципа взвешивания по сравнению с механическим состоит в том, что он позволяет измерять с любой заданной точностью малейшие изменения большого веса груза. Принципиальные основы данного метода, а также гидравлический испаритель большой модели площадью 5 м² и глубиной 2 м, и гидравлический почвенный испаритель малой модели площадью 2 м² и глубиной 1.25-1.5 м разработаны [Урываев, 1953]. Разновидностью B.A. Урываевым гидравлического испарителя большой модели является лесной гидравлический испаритель, позволяющий измерять и регистрировать испарение с отдельных деревьев в возрасте до 20 - 30 лет.

Сооружение гидравлического испарителя большой модели представляет определенные трудности, в основном технического характера. Поэтому он не был рекомендован для широкого внедрения в систему мониторинга и применялся лишь в научно-исследовательских целях. Для более широкого использования принципа гидростатического взвешивания В. А. Урываевым совместно с П. Н. Бурцевым разработана конструкция гидравлического испарителя малой модели (ГПИ-51, ГПИ-53), упрощенная и облегченная по сравнению с испарителем большой модели.



Рисунок 1.2. Виды испарителей, используемых в нашей стране

В гидрометеорологической сети нашей страны широкое применение получил весовой испаритель ГГИ-500 с площадью почвенного монолита 500 см² и глубиной в зависимости от условий применения испарителя 0.5 и 1.0 м. Испарители глубиной 0.5 м предназначены для определения испарения с парового поля, луга, залежи, целины, поля с сельскохозяйственными культурами в зонах избыточного и достаточного увлажнения, глубиной 1.0 м измерения испарения с сельскохозяйственных полей В зоне ЛЛЯ недостаточного увлажнения без смены монолита течение сезона В [Руководство..., 1963].

Особенностью испарителей ГГИ-500 является возможность с их помощью раздельно определять транспирацию и испарение с почвы. Для этого одним из испарителей измеряют общее испарение (транспирация и испарение с почвы), тогда как с помощью другого измеряют только испарение с почвы. Растения над таким испарителем срезают и подвешивают в прежнем положении для создания искусственного затенения. Разность показаний этих

испарителей дает величину транспирации за период между взвешиванием испарителей [Будыко, 1952].

Для измерения испарения с болот применяется специальный тип болотных испарителей, разработанных В. В. Романовым [Романов, 1962], для измерения испарения со снега – снеговой весовой испаритель [Руководство..., 1963]. Для определения величины испарения с водной поверхности используются устанавливаемые в грунте испарительные бассейны площадью 100 и 20 м², и испаритель ГГИ-3000 с площадью испаряющей поверхности 3000 см², который может устанавливаться как в грунт, так и на воде на специальных плотах.

Подробное описание применяющихся за рубежом различных типов весовых испарителей, лизиметров и микроиспарителей приводится в монографии Константинова [Константинов, 1968]. Используемые в зарубежных странах лизиметры можно разделить на следующие основные виды (рисунок 1.3) [Meissner, Seyfarth, 2004; Payero, Irmak, 2008; Allen et al., 1991]:

- по возможности взвешивания монолита (с взвешиванием и без взвешивания);
- по связи с грунтовыми водами (с регулируемым уровнем грунтовых вод и с постоянным уровнем грунтовых вод);
- по технологии заполнения грунтом (с ненарушенной структурой грунта и с нарушенной структурой грунта монолита).

Существуют лизиметры небольшого размера, например, разработанный Мешкатом и др. площадью 0.44 м² [Meshkat et al., 1999], и большого, например, разработанный Прютом и Ангусом в 1960 г. площадью 28.27 м² [Pruitt, Angus, 2007; Pruitt, Lourence, 1985]. Различие лизиметров по размерам и высоте, главным образом, зависит от того, над каким видом испарения необходимо вести наблюдения, а также от характеристик растительного покрова. Большие и средние лизиметры в основном используются для измерения общего испарения [Climate..., 2008].



Рисунок 1.3. Виды лизиметров, используемых в зарубежных странах

Как показано в работах [Будыко, 1952; Константинов, Струзер, 1954; Струзер, 1955, 1958; Субботин, 1964; Кузьмин и др., 1968; Виноградов, 1978; Вершинин, Калюжный, 1979; Вершинин и др., 1981; Голубев и др., 1981; Рекомендации..., 1976], между показаниями испарителей и действительным испарением в природе имеют место систематические расхождения. Знак и величина этих расхождений меняются не только в зависимости от природноклиматической зоны и времени года, но и под влиянием местных условий и характера погоды в пределах одной и той же зоны. Причин, приводящих к таким расхождениям, достаточно много и действуют они одновременно и часто разнонаправлено. Эти причины обусловливают различие в динамике поступления влаги и термодинамических процессов в испарителе и окружающей почвы.

Определенную роль в формировании систематических расхождений играет теплообмен между монолитом почвы в испарителе и окружающей средой, осуществляющийся через металлические стенки и дно испарителя. Теоретические оценки влияния этого фактора, выполненные в работе [Голубев и др., 1981], показали, что его влияние на показания испарителей может быть существенным. Результаты экспериментов с различными типами испарителей

в работе Вершинина и Виноградова [Вершинин, Виноградов, 1982] показали, что температура почвенных монолитов в испарителях ГГИ-500-50 на 1-2° больше, чем на окружающей территории и вследствие этого испарение по этим испарителям оказалось на 15% больше, чем по теплоизолированным испарителям. Также в испарителях нарушена взаимосвязь почвенной влаги монолита с влагой почвы на разных глубинах в естественных условиях. Кроме этого, испарители не фиксируют поверхностный сток.

Этот вывод подтверждается также исследованиями на водных испарителях, которые С 1975 проводились Государственным года гидрологическим институтом (ГГИ). Испарение, измеренное в испарителе любой конструкции и размера, будет отличаться от среднего слоя испарения для всего водоема вследствие различия гидрометеорологической обстановки вблизи испарителя и на водоеме в целом, а также влияния конструктивных особенностей испарителя. При определении испарения с водоема по данным наблюдений на испарительных установках вводятся поправки, учитывающие эти особенности. Эти же поправки вводятся и при переходе от показаний одних испарительных приборов к другим. Вопросам перехода от показаний ГГИ-3000 испарителей показаниям наземных К континентального водноиспарительного бассейна площадью 20 м² было посвящено значительное количество исследований, например, таких как работы Константинова А.Р., Вуглинского В.С., Федорова Т.Г., Голубева В.С., Кузнецова В.И., Урываева А.П. и др. [Кузнецов, 1954, 1970; Константинов и др., 1960; Вуглинский и др., 1981, Голубев, Урываев, 1983]. Также большое количество исследований посвящено усовершенствованию конструкции испарителей для повышения точности наблюдений за испарением с водной поверхности, например, работы Вершинина А.П., Голубева В.С., Кузнецова В.И. и др. [Вершинин, 1981; Голубев и др., 1980; Кузнецов, 1954; Химин, Калюжный, 1977].

Одним из главных ограничений является то, что испарители характеризуют испарение в месте установки прибора, на которой он

расположен. Для того, чтобы по данным испарительных установок оценить испарение с поверхности речного водосбора, необходимо иметь густую сеть почвенных испарителей, охватывающих различные виды ландшафтов, что в водосборов условиях незначительных ПО площади довольно даже затруднительно. Это является основной причиной того, что применение почвенных испарителей нельзя считать универсальным методом ДЛЯ измерения интенсивности испарения с поверхности суши И климатологических обобщений.

В связи с этим в настоящее время большее распространение получили расчетные методы определения составляющих теплового баланса, которые позволяют вычислять величины компонентов водного и теплового баланса только по данным массовых метеорологических наблюдений [Мотовилов и др., 2022].

Существующие методы расчета испарения можно разделить на группы: водного баланса подстилающей поверхности; теплового баланса; турбулентной диффузии водяного пара; комплексные методы; эмпирические формулы.

Определение испарения с использованием метода водного баланса сводится к нахождению разности между приходными и расходными членами уравнения водного баланса. Применительно к задаче определения испарения с водной поверхности метод водного баланса используется следующим образом: для какого-либо водоема учитывается поверхностный приток и сток, осадки на поверхность зеркала водоема, расход воды на фильтрацию в ложе водоема или, наоборот, приток подземных вод, а также изменение уровня воды в водоеме за рассматриваемый интервал времени [Чеботарев, 1975]. При определении испарения с поверхности почвы (в том числе и покрытой растительностью) методом водного баланса необходимо учесть изменения запасов влаги в почве, осадки, поверхностный сток и влагообмен рассматриваемого слоя почвы с нижележащими слоями (в том числе и за счет изменения уровня грунтовых вод). Применение метода водного баланса ограничено трудностями экспериментального определения влагообмена с нижележащими слоями почвогрунтов, а также небольшой точностью определения влагозапасов в зоне аэрации. Поэтому обычно метод водного баланса применяется для оценки среднемноголетнего годового испарения с речных водосборов по известным характеристикам осадков и стока с использованием упрощенного уравнения водного баланса [Горчаков, 1983].

Метод теплового баланса основан на уравнении теплового баланса деятельной поверхности. Он позволяет оценить декадное и месячное испарение практически с любой открытой, сравнительно ровной поверхности и применяется в двух вариантах: для определения испарения с полей, занятых низкорослой растительностью высотой до 20 см и более 20 CM. Среднеквадратическая ошибка метода составляет при определении испарения за отдельные декады и месяцы около 15 % [Рекомендации..., 1976]. Метод не рекомендуется применять для условий сильно сухих районов (пустынь и полупустынь), где точность определения составляющих теплового баланса, как правило, оказывается недостаточной, а также для крутых склонов, где эти измерения методически затруднены и тоже не обеспечивают необходимой точности [Рекомендации..., 1976]. В работе Вершинина А.П. [Вершинин, 1981] показано, что в пустынной зоне завышение рассчитанных значений испарения по осредненным за декаду исходным данным по отношению к измерениям может достигать 50%. Получение сведений о радиационном балансе и теплообмене в почве, особенно за короткие промежутки времени, требует проведения трудоемких работ, что ограничивает применение этого метода. Также этот метод неприменим в периоды выпадения осадков [Чеботарев, 1975]. Кроме того, при наличии разных знаков у градиентов температуры и влажности воздуха получаемый результат оказывается неустойчивым, рекомендуется В этом случае использовать метод турбулентной диффузии [Вершинин, 1981].

Метод турбулентной диффузии основан на определении вертикального потока водяного пара в приземном слое атмосферы путем измерения градиентов метеорологических элементов в этом слое. По сути, основную идею этого метода для расчета интенсивности испарения (или потока водяного пара) в общей форме можно записать в виде $E = \alpha K \Delta e$, где Δe – разность значений абсолютной влажности на верхней и нижней границах слоя, K – коэффициент турбулентного обмена на высоте 1 м; α – коэффициент, зависящий от высоты границ слоя и размерностей Δe и *K*. Существенным недостатком этого метода является большая трудоемкость при организации наблюдений. Кроме того, этот метод имеет ограниченное применение при малых скоростях ветра, а также в условиях неоднородной подстилающей поверхности или сильно пересеченного рельефа. Также как и для метода турбулентной теплового баланса, применение метода диффузии ограничивается невозможностью производить градиентные наблюдения во время выпадения осадков [Чеботарев, 1975].

Комплексные методы расчёта испарения, основаны на совместном учете элементов энергетического баланса и циркуляции водяного пара в атмосфере. Испарение или затраты тепла на испарение, определяется по измерениям вертикальных градиентов температуры и влажности в приземном слое воздуха, а также по измерениям радиационного баланса и теплооборота в почве. Одним из наиболее широко используемых комплексных методов расчета испарения с речных водосборов, который позволяет определять значения испарения за месячные интервалы времени не только в среднем за многолетний период, но и за отдельные годы, является метод, разработанный М.И. Будыко [Будыко, 1948]. За рубежом наиболее известными комплексными методами для оценки эвапотранспирации является уравнение Пенмана-Монтейса [Monteith, 1965] и, его упрощения – метода Пристли-Тэйлора [Priestley, Taylor, 1972].

В методе Будыко в качестве исходных данных используются месячные суммы испарения и испаряемости, продуктивные запасы влаги в метровом

слое почвы в начале и конце месяца, и критическое значение продуктивной влаги в метровом слое почвы, при превышении которого испарение равно испаряемости. Поскольку непосредственные измерения этих величин весьма немногочисленны, были разработаны рекомендации для их расчета в зависимости от гидрометеорологических условий рассматриваемой территории. Так, значение испаряемости определяется в зависимости от радиационного баланса, температуры и влажности воздуха, критические продуктивные влагозапасы в метровом слое почвы (средние за месяц) — в зависимости от геоботанической зоны и средней температуры воздуха [Рекомендации..., 1976].

Детальный учет всех составляющих рассматриваемой схемы делает ее достаточно громоздкой. Относительная средняя квадратическая ошибка определения испарения по методу Будыко за месяцы отдельных лет в условиях зоны недостаточного увлажнения может достигать 30-35 % и более, т.к. в схеме отсутствует учет осадков, выпадающих в течение расчетного интервала времени [Бабкин, Вуглинский, 1982].

Расчет эвапотранспирации на основе уравнений теплового баланса и массопереноса с открытой водной поверхности, впервые был предложен Г. Л. [Penman, 1948]. B 1964 г. уравнение Пенмана Пенманом было модифицировано Дж. Л. Монтейсом с учетом данных о растительности и почве, которые были включены в уравнение в виде аэродинамического сопротивления и потока тепла в почву соответственно [Monteith, 1965]. Аэродинамическое сопротивление учитывает перенос тепла и паров воды с поверхности растения. Для расчета приходящей радиации используются астрономические характеристики и данные о продолжительности солнечного сияния, поток тепла в почву определяется в зависимости от теплоемкости почвы и температуры воздуха, исходя из предположения, что температура поверхности почвы определяется температурой воздуха. Комплексная модель Пенмана-Монтейса, по данным Jensen, Doorenbos, Pruitt, Allen и других, после полевой проверки в США показала лучшие результаты из 20 других методов,

основанных на регрессионном анализе [Jensen, 1990; Doorenbos, 1979; Allen, 1992; Allen et al., 1996].

В работах Jensen, Doorenbos, Allen показано, что модель FAO-56 не может быть распространена как глобальная [Jensen, 1990; Doorenbos, 1979; Allen et al., 1996]. По их мнению, модель особенно чувствительна к скорости уровня влажности и испарения в зависимости ОТ равномерности распределения растительной поверхности. В работе Бабкина В.И. [Бабкин, 1973] была рассмотрена возможность использования метода Пенмана на примере бассейна р. Поломети. Исследование показало, что использование метода возможно в зоне достаточного увлажнения, для которой результаты расчетов оказались удовлетворительными. Применение этой методики в зонах недостаточного увлажнения может привести к значительным ошибкам. Будыко М.И. [Будыко, 1959] в свое время также проводил анализ работы Пенмана и обосновывал применение данного метода в районах избыточного или достаточного увлажнения. Также комплексный метод Пенмана-Монтейса в разных модификациях использовался в работах В.Г. Андреянова, В.С. Мезенцева, В.В. Романова и некоторых других авторов [Андреянов, 1960; Мезенцев, 1955, 1957; Романов, 1962].

Метод Пристли–Тейлора (или радиационный метод) основан на предположении о том, что для больших увлажненных территорий радиационная составляющая испарения должна преобладать над адвективной. Данный метод пригоден, главным образом, в условиях низкой адвекции. В полузасушливых регионах с высокой адвективной составляющей в энергетическом балансе, применение данного метода приводит к завышенным оценкам эвапотранспирации [Братсерт, 1985].

Во влажных и гумидных климатических условиях в качестве альтернативы методу Пенмана-Монтейса может использоваться метод Пристли–Тэйлора, который, по сути, является упрощением формулы Пенмана-Монтейса за счет исключения компонента аэродинамического сопротивления, который заменяется эмпирическим коэффициентом α, принимающим в зависимости от географических условий значения в интервале $0 < \alpha \le 2$. Для больших увлажненных участков суши и водных поверхностей «без адвекции» Пристли и Тейлор [Priestley, Taylor, 1972] получили в качестве оптимального значения $\alpha = 1.26$. Позднее Дейвис и Аллен [Davies, Allen, 1973] – для хорошо орошаемой травы, Стьюарт и Роуз [Stewart, Rouse, 1976] – для мелких озер и прудов, а позднее и для увлажненных лугов, поросших осокой [Stewart, Rouse, 1977] пришли к единому заключению: $\alpha = 1.26$. Последующие исследования с применением большего количества исходных данных показали, что величина α может быть чуть больше, а именно приближаться к 1.28 [Братсерт, 1985].

К эмпирическим относится большая группа методов, основанных на установлении связей между испарением и отдельными метеорологическими элементами: температурой и влажностью воздуха, осадками, скоростью ветра и т.п. Эти методы предполагают меньшее количество входных переменных и часто используются для определения испарения на недостаточно изученных бассейнах.

Простейшие эмпирические формулы для суммарного испарения связывают его величину со средними значениями дефицита влажности воздуха или с психрометрической разностью температур. Более сложные соотношения учитывают влияние температуры и влажности воздуха, скорости ветра, количества осадков, длительности солнечного сияния и других факторов. Например, для расчета испарения с поверхности водных объектов в большинстве современных формул используется закон Дальтона: $E = \kappa \Delta e$, где κ – суммарный коэффициент испарения; Δe – разность упругости водяного пара, содержащейся в воздухе на высоте 2 м.

Из этой группы можно отметить методы П.С. Кузина, А.Р. Константинова, А.Л. Алпатьева, Б.И. Полякова, В.С. Мезенцева, С.И. Харченко, Р. Майера и др. Результаты ряда методов выражаются в виде графиков и номограмм. Например, метод, разработанный П.С. Кузиным,

основан на предположении о пропорциональности величины испарения с поверхности бассейна в зоне достаточного увлажнения дефициту влажности воздуха [Соколовский, 1968]. Такое предположение, с физической точки зрения, имеет смысл при условии равенства температур воздуха и почвы, что, как правило, не наблюдается. Однако для средних годовых величин их разница не настолько велика, чтобы существенно исказить выводы. Годовые суммы испарения по методу Кузина определяются снятием с графика месячных сумм испарения по среднемесячным температурам воздуха и суммированием их за год. В настоящее время, из-за низкого временного разрешения, этот метод считается устаревшим.

В основе метода А. Р. Константинова [Константинов, 1968] лежит схема расчета испарения по градиентным данным. Расчетная схема представлена в виде номограмм, с помощью которых по температуре и упругости водяного пара определяется значение нормы суточного, сезонного и годового суммарного испарения. У данного метода такой же недостаток, как и у метода Кузина. Он разработан для конкретных диапазонов изменения температуры и упругости водяного пара, в связи с этим его применение для других климатических зон связано с трудностями экстраполяции изолиний испарения, что в свою очередь может привести к получению ошибочных значений испарения.

Одним из наиболее обоснованных эмпирических методов определения внутригодового распределения испарения является метод Б. В. Полякова, который предложил эмпирическую формулу для определения не абсолютных значений месячных сумм испарения, а поправок к разностям осадков и стока за рассматриваемый период. Эти поправки выражаются в виде функции влажности поверхностного слоя почвы и средних месячных температур. Проверка уравнения Полякова для большого числа пунктов Европейской территории СССР дала хорошие результаты [Будыко, 1948].

За рубежом среди наиболее часто используемых в практике эмпирических методов можно выделить формулы Одина [Oudin et al., 2005],

Харгривза [Hargraves, 1985], Тюрка [Turc, 1961], Торнтвейта и Мазера [Thorntwaite, Mather, 1955], которые отличаются друг от друга степенью требовательности к составу исходных метеоданных.

1.3 Методы оценки испарения в современных гидрологических моделях

В настоящее время методической основой для решения большинства научных задач и широкого спектра прикладных вопросов гидрологии речных бассейнов является математическое моделирование [Kirchner 2006; Виноградов, Виноградова, 2010; Мотовилов, Гельфан, 2018; Beven 2001; Seibert, Vis, 2012; Бугаец и др., 2018]. Успешное применение модельных комплексов зависит от множества факторов: соответствия заложенных в модель процессов и параметров характеру природных условий; степени гидрометеорологической изученности территории, для которой проводятся исследования; климатических особенностей и характера взаимодействия в системе «атмосфера-подстилающая поверхность»; ландшафтных и других особенностей.

Испарение представляет собой динамический процесс, интенсивность которого зависит от трех основных факторов: 1) обеспеченности необходимой для испарения энергией; 2) способности отводить водяной пар от испаряющей поверхности за счет аэродинамических процессов (ветра и градиента влажности воздуха над испаряющей поверхностью); и 3) наличия почвенной влаги для испарения при ограничении подачи воды [Chow et.al., 1988]. Первые два фактора зависят от климатических и ландшафтных условий, последний – от текущего гидрологического состояния водосбора.

Как было показано в предыдущих разделах, существующие методы оценки испарения либо дают результаты в грубом временном масштабе, либо имеют трудновыполнимые допущения, что приводит к значительным погрешностям, и в большинстве случаев рассчитываются с однородной подстилающей поверхности – воды, обнаженной почвы или определенного типа растительности, при этом текущее гидрологическое состояние водосбора обычно не учитывается. Более репрезентативные результаты для различных пространственно-временных масштабов могут быть получены с помощью расчетных данных гидрологических моделей о водном и энергетическом балансе водосбора [Xu, Li, 2003]. По сравнению с результатами обобщений, выполненных только на основе данных измерений, модельные оценки внутренне непротиворечивы [Dong et.al, 2020] и соответствуют масштабу расчетных элементов моделей [Бугаец и др., 2018]. В тоже время, модельные расчеты, как правило, имеют определенные несоответствия с данными наблюдений, что связано с упрощенным описанием гидрологических процессов, агрегацией или осреднением параметров и данных для расчетных элементов.

В гидрологических моделях наиболее распространенный способ оценки испарения – это преобразование потенциальной эвапотранспирации РЕТ (Potential Evapotranspiration) в актуальную, или фактическую AET (Actual Evapotranspiration) с учетом текущей влажности почвы, типа растительного покрова или индекса площади листьев LAI (Leaf Area Index), который имеет тесную связь со стадией роста растительности [Dyck, 1985]. Априорный выбор подходящей формулы РЕТ, даже для конкретного места и климатических условий, является нетривиальной задачей [Seiller, Anctil, 2016; Kirchner, 2006; Oudin et al., 2005a, Zhao, 2013]. Поэтому проведение детальных исследований для определения того, какие формулы расчета потенциального испарения являются наиболее надежными в применении к моделям формирования стока наиболее является олной ИЗ актуальных задач гидрологического моделирования.

Несмотря на то, что осадки и испарение одновременно воздействуют на интенсивность процессов тепло- водообмена, при оценке эффективности моделирования в большинстве исследований точность оценки РЕТ и АЕТ обычно считается менее важной, чем точность определения количества осадков. Научных проектов, направленных на оценку чувствительности гидрологических моделей к формулам РЕТ довольно мало, некоторые

недавние работы только частично заполнили этот пробел [Andréassian et al., 2004; Oudin et al., 2005a, 2005б; Kannan et al., 2007; Kay, Davies, 2008].

В работе [Parmele, 1972] показано, что недооценка чувствительности гидрологических моделей к РЕТ влияет на расчетный гидрограф стока и другие компоненты водного баланса, постоянная погрешность в РЕТ имеет кумулятивный эффект и может привести к значительным ошибкам в отношении как меженных, так и пиковых расходов воды. Однако последующие исследования показали, что эти погрешности РЕТ могут быть компенсированы гидрологическими моделями в процессе калибровки параметров или корректировки входных данных [Paturel et al., 1995].

Аналогично некоторые исследователи также пришли к выводу, что чувствительность гидрологического моделирования к РЕТ может быть снижена за счет калибровки параметров модели [Kirchner, 2006]. В исследованиях [Edijatno, 1991; Burnash, 1995; Fowler, 2002] и несколько позже [Andréassian et al., 2004; Oudin et al., 2005a, 20056] показано, что оценка чувствительности моделей к РЕТ демонстрирует противоречивые результаты – использование более физически обоснованных методов РЕТ не приводит к лучшему результату моделирования. В работах [Sheffield et al., 2012; Trenberth et al., 2014], отметили, что физически обоснованный метод расчета суммарного испарения, который учитывает изменения в доступной энергии, влажности и скорости ветра, может привести к меньшим изменениям в водных ресурсах, особенно по сравнению с расчетными формулами определения РЕТ, основанными только на температуре воздуха.

Метод Пенмана–Монтейса [Monteith, 1965] считается универсальным для применения в различных климатических условиях, но его использование требует измерений ряда климатических характеристик, которые могут быть недоступны на всех метеостанциях. Кроме этого, существующие несоответствия между неопределенностью во входных данных, параметрах и структуре гидрологических моделей могут быть не совместимы с уровнем детализации процесса эвапотранспирации и не позволяют использовать все преимущества комплексного метода Пенмана-Монтейса. В регионах, где недостаточно данных для использования уравнения Пенмана-Монтейса или его эквивалентов, для оценки испарения обычно используются более простые методы, требующие меньшее количество входных данных. Однако применение альтернативных методов или уравнений для оценки PET в районе исследования должно быть соответствующим образом обосновано [Lu et.al., 2005; Назари и др. 2020; Мотовилов и др. 2022].

Во многих исследованиях, связанных с применением моделирования для оценки последствий изменения климата, использовались и тестировались разнообразные варианты оценки потенциального и актуального испарения. Для оценки чувствительности результатов гидрологического моделирования к РЕТ сравнивались множество формул для разных регионов мира. В работе [Kingston et al., 2009] (шесть различных формул PET), моделируя реакцию на увеличение среднего значения глобальной температуры, авторы пришли к выводу, что выбор метода определения РЕТ является основным источником неопределенности в прогнозах будущих изменений водных ресурсов. В исследованиях [Bae et al., 2011] (семь формул PET), [McKenney, Rosenberg, 1993] (восемь формул PET), [Prudhomme Williamson, 2013] (12 формул PET) также продемонстрирована большая вариация полученных результатов моделирования при использовании разных вариантов расчета РЕТ. При оценке чувствительности к изменению климата (18 формул PET) [Bormann, 2011] PET что все модели расчета демонстрируют показано, разную чувствительность, но по чувствительности методы не удается сгруппировать с точки зрения различных типов моделей РЕТ (основанные на температуре, радиации или комбинированные уравнения), и был сделан вывод, что модели РЕТ следует проверять в региональном контексте, прежде чем применять их к определенному региону в рамках исследования изменения климата.

Для определения чувствительности гидрологических прогнозов к выбору формул потенциальной эвапотранспирации в работе [Seiller, Anctil, 2016] использовано 24-ре формулы РЕТ. Расчеты были выполнены на основе

имеющихся метеорологических наблюдений и данных климатических моделей для базового (1970–2000 гг.) и будущего (2041–2070 гг.) периодов. В результате были получены большие различия между 24 моделированными временными рядами РЕТ, однако эти расхождения лишь умеренно влияют на эффективность калибровки гидрологических моделей. Выбор формулы влияет на гидрологические прогнозы и выводы об изменении климата для наиболее важных фаз гидрологического режима, таких как весенний и осенний паводки и летняя межень. Чувствительность гидрологического отклика исследуемых водосборов оказалась ниже при использовании комбинированных методов, чем для эмпирических уравнений, основанных на зависимостях от температуры воздуха и солнечной радиации.

В статье [Oudin et al., 20056] представлены результаты тестирования 27 формул РЕТ и их влияние на модельный сток. Сделан вывод, что большинство формул РЕТ дают аналогичные результаты, иллюстрирующие низкую чувствительность гидрологических моделей к выбору РЕТ. Однако формулы, основанные на температуре и солнечной радиации, дали лучшие результаты, в отличие от зависимостей, основанных или включающих скорость ветра и относительную влажность. В работе [Kannan et al., 2007] простые (менее физически обоснованные) формулы МакГиннесса [McGuinness, Bordne, 1972] и Дженсен-Хайзе [Jensen, Haise 1963] для расчета РЕТ оказались более формула Пенмана. эффективными при моделировании стока, чем Существенно разные результаты при оценке изменения климата с использованием методов Пенмана и Одина были получены в работе [Кау, Davies, 2008]. Шеффилд и др. [Sheffield et al, 2012] показали расхождения в значениях индекса засухи Палмера при использовании эмпирической (Торнтвейта) и физически обоснованной (Пенмана) формул расчета РЕТ.

Изменение концентрации CO₂ в атмосфере может привести к физиологическим изменениям растений, таким как раскрытие и изменение количества (площади листьев) устьиц, которые в свою очередь вызовут изменения в регулировании транспирации [Kay et al., 2013]. Эти связи между
метеорологическими условиями, физиологией растений и изменением климата могут быть очень сложными и могут привести к дополнительным неопределенностям в оценках динамики компонентов водного баланса [Betts et al., 2007; Bell, et al., 2011, 2012; Kay et al., 2013].

Результаты перечисленных выше исследований подтвердили необходимость тестирования различных вариантов расчета РЕТ на изучаемых водосборах для решения проблемы неопределенности при расчете испарения в гидрологических моделях [Sperna Weiland et al., 2012]. Испарение зависит от четырех основных физических переменных: температуры воздуха [GIEC, 2007], давления водяного пара [Durre et al., 2009], солнечной радиации [Wild, 2009] и скорости ветра [McVicar et al., 2008] и их трансформация в контексте изменения климата будет оказывать значительное влияние на испарение [Donohue et al., 2010]. Выбор соответствующей формулы РЕТ, которая объединяет эти переменные, может иметь решающее значение при интерпретации результатов гидрологического моделирования.

В качестве краткого заключения прежде всего следует отметить, что во множестве литературных источников указывается важность оценки испарения как компонента теплового и водного баланса. Выбор адаптированного к региональным условиям уравнения расчета испарения для гидрологического моделирования может оказаться затруднительным и требует особого внимания. Несмотря на то, что метод Пенмана-Монтейта (FAO-56) стал стандартом де-факто для оценки потенциальной эвапотранспирации, это сложный метод, требующий учета большого количества параметров. Необходимые данные наблюдений часто отсутствуют и для их получения приходится использовать расчетные методы или данные численных моделей атмосферы. Эмпирические методы требуют меньшего количества входных параметров, как правило, они представляют собой физико-статистические уравнения зависимости испарения с минимальными, максимальными или среднесуточными метеорологическими характеристиками. Эти методы

расчета находят, главным образом, региональное применение и, как правило, справедливы для тех районов, в условиях которых они разрабатывались.

В целом выбор метода оценки РЕТ зависит от доступности и качества метеорологических данных и особенностей местности. Эффективность применения тех или иных методов расчета эвапотранспирации прежде всего связана с проблемой соотнесения пространственных масштабов измерений с размерами практически интересующих объектов гидрологических исследований. Не вызывает сомнений, что перспективы в исследовании испарения и разработке методов расчетов наряду с получением новых экспериментальных данных связаны с развитием математических моделей, которые в полной мере могли бы использовать существующие, априорные представления об этом процессе и данные наблюдений в конкретном речном бассейне [Мотовилов, Гельфан, 2018].

Глава 2. Физико-географическая характеристика района исследований

2.1 Физико-географические условия района исследований

Район исследований располагается в южной части Приморского края в бассейне р.°Комаровка (левый приток р. Раздольной) (рисунок 2.1). Выбор бассейна обусловлен проводившимися на его территории фактическими наблюдениями над испарением. На территории бассейна р. Комаровка и ее главного притока р. Раковка (общая площадь 1490 км²) с начала 1950-х по конец 1980-х годов функционировала Приморская воднобалансовая станция, за период работы которой сформировался уникальный архив специальных гидрометеорологических наблюдений. В начале 1990-х гг. весь комплекс воднобалансовых наблюдений на ПВБС был закрыт, и она была преобразована в гидрологическую станцию 1 разряда Г-1 Приморская.



Рисунок 2.1. Карта-схема расположения района исследований

Почти со всех сторон указанная территория хорошо очерчена естественными границами. На востоке и юге она выражена северными склонами отрогов гор Пржевальского, на западе проходит по водоразделу р. Раздольной, а на севере совпадает с хребтом, являющимся водоразделом между верховьями рек Илистой и Раковки. Река Комаровка впадает в р. Раздольную слева на 93-м км от устья у г. Уссурийска [Горчаков, 1983].

Климат определяется географическим положением на границе азиатского материка и Тихого океана, сложным строением его поверхности и имеет ярко выраженный муссонный характер циркуляции атмосферы. Зимой господствуют воздушные массы, зарождающиеся вне пределов края в глубине азиатского материка на плоскогорьях и в горах Монголии и Восточной Сибири, а летом – в северной части Тихого океана.

Лето теплое, влажное, со значительным количеством осадков. Зимой над территорией устанавливается область повышенного давления, ЧТО способствует сильному выхолаживанию земной поверхности, преобладает сухая и холодная погода. В конце весны – начале лета над восточными районами Азии формируется высотный гребень, при этом создаются благоприятные условия для антициклогенеза над холодными водами Охотского моря и северо-западной частью Тихого океана. В результате морские районы оказываются занятыми областью высокого давления, а над Восточной Азией формируется барическая депрессия. Над термически неоднородными поверхностями суши и моря, а также холодным Приморским течением образуются туманы, слоистые облака, моросящие дожди. Это первая стадия летнего муссона.

Во второй стадии (с июля по сентябрь) контраст температур между материком и океаном значительно уменьшается. Условия для антициклогенеза становятся северными Дальневосточными над морями менее благоприятными, вследствие чего область высокого давления разрушается. На характер погоды большее все влияние начинает оказывать северотихоокеанский антициклон, который к августу достигает самого своего

40

северного положения. С юго-востока на Приморский край выходят очень влажные и теплые океанические тропические массы. На вторую половину лета приходится основное количество обильных обложных и ливневых дождей.

Наличие стадийности в муссонной циркуляции обуславливает режим погоды в начале и конце летнего периода. В течение осени происходит постепенный переход от летнего типа циркуляции к зимнему, в ноябре уже окончательно устанавливается типичная зимняя циркуляция на всей территории Приморья.

Радиационный режим определяется относительно низкими широтами и особенностями подстилающей поверхности. Годовое значение радиационного баланса по данным метеостанции «Тимирязевский», расположенной на территории бассейна р. Раковка, составляет 48.8 ккал/см². Максимальные баланса месячные суммы радиационного приходятся на июнь $(9-10.5 \text{ ккал/см}^2)$. С октября по ноябрь, когда территория покрывается снегом, радиационный баланс уменьшается (2.5 ккал/см²). Наименьшие значения приходятся на декабрь-январь (-0.7 – -1.1 ккал/см²). Период с положительным радиационным балансом составляет 10 месяцев, смена знака происходит в конце января - начале февраля и в третьей декаде ноября.

Температурный режим обуславливается в основном характером атмосферной циркуляции и рельефом местности. Горная система Сихотэ-Алинь является естественным барьером между восточными прибрежными и западными предгорными районами, который препятствует свободному стоку с континента на Японское море холодного воздуха зимой и переносу туда же теплого воздуха летом. Период с отрицательными среднемесячными температурами длится примерно 5 месяцев (ноябрь – март). Самыми теплыми месяцами являются август (Тимирязевский) и сентябрь (Приморская), самым холодным – январь (рисунок 2.2).

Переход среднесуточной температуры через 0 °С весной происходит по всей исследуемой территории почти одновременно в конце марта. Осенью переход в сторону отрицательных значений происходит в первой декаде

41

ноября. Первый осенний и последний весенний заморозки приходятся в среднем на начало сентября и начало мая соответственно. Безморозный период составляет в среднем 140-150 дней. Первые устойчивые морозы появляются в конце ноября и прекращаются в первой половине марта.



Рисунок 2.2. Климатические диаграммы, метеостанции Тимирязевский (а), Приморская (б)

Характерным для исследуемой территории является глубокое и длительное промерзание, причем наиболее развиты процессы промерзания малоснежных районах. В горных районах почвы В южных рано устанавливающийся и длительно существующий мощный и ровный снежный покров препятствует глубокому промерзанию почвы. В долинах горных рек развиты налёдные процессы, пучение и криогенное выветривание почв. Над территорией Уссурийской и Приханкайской низменностей наблюдаются явления температурной инверсии, в результате – склоны гор часто теплее прилегающих долин.

Средняя дата появления снежного покрова – 12 ноября, в годы с ранней зимой снежный покров может появляется в середине октября, в годы с продолжительной и теплой осенью – в начале января. Продолжительность

периода устойчивого снежного покрова составляет около 150 дней. В верховьях бассейна р. Комаровки (до п. Центральный) снежный покров благодаря значительной залесенности залегает сравнительно равномерно, водосбор п. Центрального В основном покрыт кустарниковой ниже растительностью и залегание снежного покрова становится умереннонеравномерным. Высота снежного покрова значительно колеблется из года в год. В наиболее малоснежные зимы максимальная высота снежного покрова может составлять всего 3 см, а в многоснежные может достигать 1 метра на закрытых и 30 см на открытых участках. Незначительная высота снежного покрова способствует глубокому промерзанию, достигающему 150 см и более. Продолжительность периода промерзания почво-грунтов колеблется от года к году от 133 до 236 суток, причем наименьшая продолжительность (133-169 сут.) наблюдается на склонах южной экспозиции, наибольшая (189-236 сут.) – характерна для северных облесенных склонов (п. Комаровский).

Начиная с 1-2 декады февраля на крутых южных склонах появляются проталины. С начала марта высота снежного покрова начинает уменьшаться. К концу апреля территория полностью освобождается от снега. Оттаивание верхнего слоя почвы происходит во второй половине апреля, полное оттаивание горизонтов – в конце мая – начале июня, на северных склонах, как правило, в начале июля. Продолжительность оттаивания на южных склонах достигает 45 суток и, в общем, зависит от максимальной глубины промерзания. Период оттаивания горных склонов, покрытых лесом значительно больше, и достигает иногда 86 суток (на равнине 70 суток).

Режим осадков определяется условиями муссонной циркуляции, циклонической деятельностью и характером рельефа. Из годового количества осадков в холодный период выпадает около 10-20%, в теплый период – до 80% годовой суммы. Минимум осадков наблюдается в январе – феврале. От февраля к августу происходит довольно быстрое возрастание месячных сумм осадков, и затем их падение к ноябрю (рисунок 2.3). Годовое и месячное распределение осадков отличается крайней изменчивостью, например, по

43

метеостанции «Тимирязевский» в 1972 г. годовое значение осадков составило 1044 мм, а в 1973 – 464 мм.



Рисунок 2.3. Среднемесячные (а) и годовые (б) суммы атмосферных осадков (мм) на м/ст. Тимирязевский

Для теплого периода характерны частые и интенсивные дожди, вызывающие почти ежегодные разливы рек. В первую половину лета наблюдаются преимущественно длительные осадки обложного характера. Во второй половине лета – начале осени (июль-сентябрь) преобладают осадки ливневого характера (максимумы более 150-200 мм за сутки), обусловленные тропическими (тайфунами) или юго-восточными морскими циклонами. Дожди с количеством осадков более 50 мм повторяются ежегодно.

Измерение температуры почвы на различных глубинах производится на метеостанции «Тимирязевский». Минимальные значения температуры почвы отмечаются на глубине 0.2 м в январе, затем до глубины 3.2 м идет повышение температуры почвы. Такой ход температур характерен для всего холодного периода. В теплый период наблюдается обратная картина, т.е. понижение температур почвы с глубиной. Нулевая изотерма декабря месяца проходит на глубине 0.6 м, постепенно опускаясь до глубины 1.4 м в марте, в апреле она поднимается на глубину 0.7 м.

Бассейн р. Комаровки представлен различными формами рельефа. В верхнем течении рельеф складывается междуречными, нередко плосковерхими с покатыми (15-30°) склонами хребтов, поднимающимися на

100-200 м над поймами долин. Веерообразная сеть небольших ключей и речек расчленяет всю площадь на ряд увалов, средней высотой 250-400 м, лишь на водоразделе с рекой Артемовкой есть высоты около 700 м над уровнем моря.

Склоны гор умеренно крутые, местами очень крутые и обрывистые. В районе главных водоразделов склоны по форме профиля выпуклые, в среднем течении рек они выполаживаются и рельеф принимает крупнохолмистый характер. В нижнем течении очертания рельефа становятся более плавными, переходящими в слабо всхолмленную равнину – Раздольненскую депрессию.

В геологическом строении бассейна р. Комаровки принимают участие породы палеозойского, мезозойского и кайнозойского (палеоген-неогенового) возраста, а также покровные плейстоценовые отложения [Геологическая карта..., 1960]. Породы палеозойского комплекса распространены к югу и юго-востоку от бассейна р. Комаровки и являются ложем для кайнозойских отложений, местами палеозойские породы выходят на дневную поверхность. Литологически они представлены переслаиванием глинистых сланцев и песчаников, алевролитами, известковыми сланцами и известняками (песчаноизвестковистая свита), филозит-порфирами и их туфами, порфиритами и их туфами (эффузивно-туфогенная свита).

Мезозойские отложения вскрываются в бассейне р. Раковки. Их разрез начинается с комплекса отложений верхнего триаса, представленного толстоплитчатыми массивными однородными грубозернистыми песчаниками с прослоями ожелезненных песчаников и мелкогалечниковых конгломератов, аргиллитов, алевралитов и каменных углей. Нижнетриасовые отложения представлены мелкозернистыми глинистыми песчаниками и алевралитами.

Выше залегают юрские отложения, представленные конгломератами, мелкогалечниковыми плитчатыми И массивными песчаниками. Меловые отложения включают в себя несколько толщ, представленных следующими литологическими разностями: песчаниками, конгломератами, алевролитами, аргиллитами, пластами каменного угля и сланцами. Палеоген-неогеновые (третичные) отложения В бассейне

45

р. Барсуковки представлены переслаиванием песчаников, аргиллитов, алевролитов и пластами бурого угля.

Плейстоценовые отложения почти сплошным чехлом различной мощности покрывают всю исследуемую территорию. В предгорьях они представлены преимущественно делювиальными отложениями. В долинах рек – аллювиальными и лимническими. Аллювиальные отложения представлены глинистыми песчано-галечными разностями. Мощность аллювиальных отложений колеблется от 3 м (поймы, русла и 1 надпойменная терраса) до 15 м (2 надпойменная терраса и выше). В предгорьях мощность аллювия может достигать 30-40 м [Короткий и др., 1980; 1997].

Интрузивные породы (граниты, гранитоиды) палеозойского возраста можно наблюдать по обоим берегам р. Раковки, бассейне ручья Кривой Ключ. Базальтовые покровы развиты в верховьях р. Комаровки и в долине р. Каменки (здесь они занимают до 80 % площади).

По условиям залегания и циркуляции подземных вод выделяются следующие горизонты: воды палеозойских отложений, воды третичных (палеоген-неогеновых) отложений и воды аллювиальных отложений. Водовмещающими породами палеозойских отложений являются песчаники и известняки. Среди третичных (палеоген-неогеновых) отложений водоносными являются песчаники, конгломераты и сами угольные пласты. В силу сложности фациальных условий, хорошо выдержанных водоносных горизонтов не наблюдается. Все водоносные линзы расположены поэтажно, чаще самостоятельные, реже – имеющие гидравлическую связь между собой.

Водоносные горизонты аллювиальных отложений приурочены к песчаным разностям и галечникам, слагающим долину р. Комаровки. Водоносный горизонт аллювиальных отложений в бассейне р. Раковки приурочен к песчано-галечниковым отложениям. Среди палеоген-неогеновых отложений водоносными являются песчаники. Обводненность аллювиальных отложений незначительная, что объясняется небольшой мощностью водоносного горизонта.

46

Исследованиям почвенного покрова на территории южного Приморья посвящено множество работ [Ковда и др., 1957; Иванов, 1964, 1966, 1976; Пшеничников, 1976; Пшеничникова, 1989; Ознобихин, Синельников 1985, Шелест, 2001; Синельников, 2005; Назаркина, 2008; Бугаец и др., 2015, и др.]. По почвенно-географическому районированию территория бассейна реки Комаровка относится к Восточной буроземно-лесной области бурых и подзолисто-бурых лесных почв суббореального пояса [Добровольский, Урусевская, 2006].

Почвенный покров бассейна р. Комаровка включает весь спектр разнообразия почв, характерный для равнины и низкогорья Приморского края. В южной горной части бассейна он представлен комбинациями различных видов горных бурых лесных почв (почвообразующие породы в основном элювий и элюво-делювий песчаника и туфа, реже базальта и гранита). Практически половину площади бассейна занимают равнинные территории в преобладают его северной центральной частях, где сочетания И буроподзолистых, некоторых видов лугово-бурых, луговых глеевых почв. Почвообразующие породы представлены соответственно делювиальными Небольшая глинами аллювиальными отложениями. И часть занята расположенными вдоль водотоков бурыми лесными почвами на аллювии и остаточно-пойменными почвами [Бугаец и др., 2015].

По долинам рек бассейна р. Комаровки выделяются луговые глеевые; лугово-болотные и болотные; и пойменные типы почв. Луговые глеевые почвы развиты на дренированных прирусловых участках первой надпойменной террасы под разнотравно-злаковыми ассоциациями. Особенностями условий залегания луговых глеевых почв являются плоский рельеф с большим количеством замкнутых блюдцеобразных понижений и наличие практически неводопроницаемых материнских пород (тяжелые глины). Сочетание этих особенностей при часто повторяющихся осадках небольшой интенсивности приводит к сильному переувлажнению этих почв, а иногда к полному затоплению земельных массивов.

По морфологическому строению профиля луговые глеевые почвы довольно разнообразны. Это выражается в различной мощности гумусового горизонта (от 10-15 см до 60-70 см), содержании гумуса и его качества, проявлении взаимосвязанных между собой процессов оглеения И оподзоливания. Луговые глеевые почвы залегают обычно в комплексе с Лугово-болотные лугово-болотными болотными почвами. И почвы формируются в условиях длительного переувлажнения. В отдельные годы переувлажнение их наблюдается в течение почти всего вегетационного периода. Поверхность лугово-болотных почв обычно закочкарена. В профиле их выделяется перегнойный или торфяно-перегнойный горизонт, который подстилается оглеенным горизонтом (сизой глиной).

По характеру аккумулятивно-гумусового горизонта лугово-болотные почвы разделяются на перегнойно-глеевые (перегнойный горизонт черного цвета мощностью 15-20 см), торфянисто-перегнойно-глеевые (торфянистый горизонт мощностью 5-10 см) и торфянисто-глеевые (мощностью торфяного горизонта до 20 см, перегнойный слой полностью отсутствует или имеет малую мощность). Последние имеют небольшой процент распространения в верхней части бассейна р. Комаровки, но по мере продвижения вниз занимаемые ими площади увеличиваются.

Пойменные почвы представлены, в основном, грубоскелетным аллюводелювием, у поверхности отмечается присутствие мелкозема, который скреплен корнями древесных, кустарниковых и травянистых растений, на глубине 30-50 см мелкозем нередко полностью отсутствует. На склонах с большими уклонами дождевая вода быстро инфильтруется в почвенный профиль и движется к русловой сети в толще грубоскелетных отложений под растительно-почвенным слоем по системам внутрипочвенных дрен.

В средней и нижней частях долин горных рек бассейна р. Комаровка почвообразующие породы представлены суглинками (средними и легкими), супесями, подстилаемыми песчано-галечными отложениями. В отдельных

48

случаях песчано-галечные отложения выходят непосредственно на поверхность.

Особенности растительного покрова исследуемой территории описаны в работах Комарова В.Л. [Комаров, 1953], Кудинова [Кудинов, 2004], Петропавловского Б.С. [Петропавловский, 2004], Брижатой А.А. [Брижатая, 2008] и др. По типу ландшафта рассматриваемая область является лесной. В большинстве районов области лесистость составляет около 70-80%. Однако, в районах, подверженных интенсивному антропогенному воздействию, лесистость снижена до 50-20% [Атлас..., 2005].

В геоботаническом отношении территория ПВБС отнесена к Приморскому горно-долинному Сучано-Владивостокскому округу широколиственных и кедрово-широколиственных лесов Маньчжурской материковой провинции Дальневосточной хвойно-широколиственной области [Колесников, 1969].

Леса бассейна р. Комаровки входят в область хвойношироколиственных лесов, богатых разнообразием видового состава древесной, кустарниковой и травяной растительности.

По растительному покрову территорию ПВБС можно разделить на три основные части: верхнюю, среднюю и нижнюю. Верхняя часть включает в себя территорию Уссурийского заповедника им. В.Л. Комарова, покрытую почти нетронутой тайгой. Здесь преобладают смешанные широколиственно-кедровые и широколиственно-пихтово-еловые леса.

В пределах бассейна р. Раковки – по левобережью до Тоскаевской пади растительный покров имеет ярко выраженную поясность. На высоте от 600-800 м до 1000 м располагается пояс пихтово-еловых лесов с примесью кедра. Здесь преобладают папоротниковые и разнотравно-осоковые пихто-еловые леса с примесью кедра, березы желтой, клена и липы. Подлесок редкий или почти отсутствует.

В высотных отметках от 200 до 800 м находится пояс кедровошироколиственных лесов. Он характеризуется большим набором видов растений, с разнообразным подлеском, образованным чубушником, элеутерококком, лещиной, бересклетом, жимолостью. В покрове преобладают папоротники, осока, разнотравье. По верховьям р. Комаровки проходит северная граница распространения пихты цельнолистной, граба, актинидии полигамы, вишни сахалинской.

На высотах до 200 м располагается пояс широколиственных лесов, покрывающих предгорья, обращенные к долинам рек. Преимущественно эти склоны северных экспозиций. Здесь преобладают многопородные, кленоводубово-лиственные леса с примесью даурской березы, ясеня маньчжурского и др. Подлесок обыкновенно хорошо развит и разнообразен по составу кустарников. На южных склонах произрастают дубовые леса, встречаются теплолюбивые виды древесных пород (клен ложнозибольдов, ясень носолистный и др.).

В средней части бассейна р. Комаровки от устья р. Комаровская падь до впадения р. Каменушка рельеф более сглажен, склоны покрывают широколиственные, преимущественно дубовые леса, долины заняты или растительностью, или распаханы. В этой бассейна луговой части широколиственные леса подвергались интенсивным вырубкам, сохранились лишь молодые и перестойные деревья. Наибольшей вырубке подвергались леса бассейнов рек Семеновская падь, Волха, Барсуковка, Каменушка.

В нижней части территории ПВБС (от устья р. Ивнячки) долина 2-5 ширину. Широколиственные Комаровки достигает КМ В леса распространены до устья р. Ивнячки, ниже по течению они вырублены. Склоны увалов распаханы. Кустарниковые заросли дубняка и орешника встречаются лишь на вершине сопок. Ниже села Раковки рельеф относительно преобладают выровненный, злесь порослевые группировки. Широколиственные леса произрастают до устья р. Лихачевки, ниже они сменяются остепненными дубняками с леспедецей и лещиной в подлеске.

2.2 Гидрографическое описание исследуемых водосборов

Река Комаровка впадает в р. Раздольную в 94 км от устья. Длина реки составляет 65 км. Водосбор имеет асимметричную форму. В реку Комаровку впадает 413 притоков общим протяжением 910 км. Главным притоком является река Раковка (755 км²). Густота речной сети составляет около 0.7 км на 1 км². Долина реки в верхней части V-образная, в среднем течении долина принимает трапециевидную форму. Склоны долины в верхнем и среднем течении умеренно крутые высотой 150-200 м, в нижнем течении пологие, высотой 15-70 м, пересечены долинами притоков. Все правобережные склоны имеют преимущественно южную, а левобережные – северную экспозиции. Большинство склонов долин притоков имеют юго-восточную и юго-западную экспозиции. Склоны покрыты лесом, ниже впадения р. Каменушки лес постепенно сменяется кустарником, а в нижней части они в основном открыты.

Пойма преимущественно двухсторонняя, в верхней части шириной 100– 200 м, ниже увеличивается до 2.0 км. Поверхность поймы волнистая, с понижениями и повышениями до 1-3 м, заливается слоем воды до 4 м.

Русло реки в нижнем течении умеренно извилистое, в нижнем – сильно извилистое, умеренно разветвленное. Течение реки спокойное, вода прозрачная. Во время прохождения паводков скорость воды значительно возрастает, на участках русла, сложенных крупным галечником, образуются буруны, вода становится мутной. Берега реки обрывистые, высотой 1-2 м, в нижнем течении до 4 м, подвержены размыву.

Объектами исследования являются 18 водосборов, площадью от 2.4 до 755 км², относящихся к бассейнам рек Комаровки и ее главному притоку – Раковке, которые расположены в Уссурийском и Михайловском районах Приморского края (таблица 2.1, рисунок 2.4).

№ п/п	Река	Гидрологически й пост	Площадь водосбора, км ²	Расстояние от истока, км	Средняя высота, м	Средний уклон водосбора, ‰
1	Ключ студеный	Пионерский	2.4	1.4	201	134
2	Семеновская падь	Доковский	5.6	3.9	261	222
3	Волха	Верхний	17.6	5	280	204
4	Комаровская падь	Егерьский	24	10	328	290
5	Каменка	Каменский	31	11	341	157
6	Глуховка	Мостовой	31.1	5.9	100	62.7
7	Учхозный ключ	Дальний	36.2	10	320	246
8	Барсуковка	Лесничий	37.4	16	289	135
9	Бакарасьевка	Дубининский	47.5	13	88	53
10	Комаровка	Комаровский	60.3	13	320	218
11	Волха	Нижний	69.5	10	300	192
12	Михайловка	Михайловский	123	21	73	20.7
13	Репьевка	Воздвиженский	154	28	63	15.9
14	Комаровка	Центральный	157	25	300	260
15	Раковка	Раковский	198	35	272	137
16	Комаровка	Садовый	395	37	260	206
17	Комаровка	Сахарный завод	616	61	215	105
18	Раковка	Опытный	755	69	130	60.8

Таблица 2.1 Основные сведения о водосборах

Территория водосбора р. Комаровки представлена безлесыми равнинными водосборами рек, характерными ДЛЯ Раздольненско-Приханкайской низменности, И лесными горными водосборами, характерными для всего горного массива Сихотэ-Алинь (исключая самую высокогорную его часть). Выше поста Центральный водосбор р. Комаровка целиком расположен в пределах горно-таежной части бассейна. Долина реки в районе поста ящикообразная, шириной 180–220 м. Пойма левобережная, заросшая лесом и кустарником, пересечена балками. Русло на участке поста прямолинейное, галечно-каменистое, деформирующееся. Правый берег каменистый, обрывистый, левый – пологий, размываемый. Все водотоки бассейна имеют характерный для низкогорий вид, русла их слабоизвилистые, с большими уклонами, сложены преимущественно галечниками различной крупности.



Рисунок 2.4. Картосхема расположения исследуемых бассейнов рек; номера на карте соответствуют нумерации в (таблица 2.1).

Пост Садовый замыкает верхнюю часть водосбора р. Комаровки. Здесь, по сравнению с северным участком, бассейн имеет более сложное строение. Ниже п. Центральный основное влияние на формирование стока реки Комаровки оказывают впадение рек Барсуковки (справа), Волхи и Каменушки (слева), конфигурация речной сети бассейна способствует быстрой концентрации паводка, нередки случаи, когда пик паводка на посту Садовый опережает пик на вышележащем посту Центральный. Эта часть водосбора была подвергнута наибольшей вырубке леса. Долина реки в районе поста ящикообразная, шириной 0.5–1.5 км. Дно поросло редким смешанным лесом. Пойма, шириной 1.2 км, правобережная, поросшая лесом, местами открытая, занята пашней и лугом; затопляется при высоких уровнях. Русло реки извилистое, на участке поста прямолинейное. Берега крутые высотой 3.0–3.5 м, заросшие. Дно реки ровное, галечное, деформирующееся.

Пост Сахарный Завод расположен в низовьях р. Комаровки. Рельеф бассейна ниже поста Садовый преимущественно холмистый, с пологими холмов, высотой 50-70 м, широким распространением склонами С сельскохозяйственных угодий и жилой застройки. Долина реки шириной более 4 км, пойменная, склоны пологие, поросшие кустарником, местами открытые (пашни, огороды). Пойма на участке поста правобережная, шириной до 2 км, пересечена старицами и небольшими озерами. Русло извилистое с разветвлениями, песчано-галечное, неустойчивое. Берега высокие, местами обрывистые, заросшие. Долина и пойма реки значительно стеснены мостовыми переходами, дорожными насыпями и дамбами мелиоративных систем.

Водосбор р. Глуховка (п. Мостовой) представляет среднюю часть бассейна р. Комаровки. Рельеф в основном холмистый с пологими склонами. Основная часть водосбора открытая, распаханная. Долина преимущественно трапецеидальная, в нижнем течении сливается с долиной р. Комаровки. Преобладающая ширина по дну 150–300 м, в 5.5 км от устья она расширяется до 500 м и занята под пашни, сенокосы, огороды, местами поросла кустарником. Пойма имеет в основном ширину 20-80 м, вблизи устья 100-130 м. Поверхность поймы ровная, местами поросшая кустарником. Русло извилистое. Берега высотой 2–3 м, крутые размываемые, грунты глинистые и суглинистые. Ложе реки неустойчивое, песчано-илистое, заросшее кустарником и травяной растительностью.

Река Раковка впадает в р. Комаровка с правого берега, в трёх километрах от её устья и имеет длину 76 км. Бассейн имеет асимметричную форму и вытянут с юго-востока на северо-запад. Речная сеть бассейна развита слабо, крупных притоков река не имеет. Верхняя часть бассейна имеет абсолютные

высоты 400–450 м. В истоке реки, на водоразделе, высота отдельных вершин достигает 600 м. Горы в этой части бассейна имеют вид обособленных возвышенностей, вытянутых от границы водораздела с юго-востока на северозапад. Склоны гор крутые (25–40°), умеренно пересечены долинами ключей, падями и распадками. Ниже с. Раковка горный рельеф сменяется крупнохолмистым с высотами 200–240 м, а ниже с. Дальстрой – среднехолмистым.

Долина реки умеренно извилистая, трапециевидная, в верховьях шириной 0.3–0.4 км, достигает наибольшей ширины выше с. Михайловка (3.4 км). Русло реки до с. Раковка умеренно-извилистое, умеренноразветвленное на рукава и протоки. Преобладающая ширина реки колеблется от 6 до 20 м. Пойма реки Раковки до впадения р. Тоскаева падь прерывистая, двухсторонняя, переходящая с одного берега на другой, шириной 15–30 м. Беспойменные участки чередуются с пойменными через 0.3–0.6 км. Ниже пойма сплошная, двусторонняя, шириной от 50 м до 1.5 км. Затопление поймы происходит большей частью в период летних дождевых паводков и, в редкие годы, весной.

В долине рек Раковка и ее притока – Лихачевка расположено Раковское искусственного Строительство водохранилище происхождения. водохранилшища было начато в 1976 году, закончено и введено в эксплуатацию – в 1986 году. Река Раковка, давшая название водохранилищу, в 42,5 км от устья была перегорожена земляной плотиной высотой 27,3 метра, длиной 605,0 метров и шириной по гребню 6,0 метров. Уже в период строительства водохранилище использовалось для осуществления питьевого, хозяйственно-бытового и производственного водоснабжения Уссурийского городского округа. В настоящее время оно дополнительно выполняет объектом противопаводковую функцию. Также является водным рыбохозяйственного используется любительского значения И для рыболовства.

По генезису водохранилище является долинным, питаемым из рек Раковка и Лихачевка. По характеру регулирования стока – это многолетнее водохранилище, имеющее 10-летний водообмен.

Появление ледовых образований на водохранилище приходится в среднем на первую декаду ноября, образование устойчивого ледостава на вторую декаду декабря. Продолжительность ледостава 140-160 дней, с наибольшей толщиной льда 90 см.

Весеннее половодье выражено хорошо и происходит в апреле-мае вместе с накладывающимися на него дождевыми паводками. Доля стока в период весеннего половодья в объеме годового стока составляет 15% в многоводные годы и увеличивается до 50% в маловодные.

Продолжительность летне-осенних паводков – с июня по сентябрь. В этот период характерно чередование резко выраженных подъемов и спадов уровня на р. Раковка. Интенсивность подъема и спада уровней – высокая, может достигать 1.5 – 2.0 м/сутки. В течение летне-осеннего периода в среднем проходит два – три паводка, между ними наступает кратковременная межень.

Наблюдения за испарением с поверхности почвы в разное время проводилось на 11 почвенно-испарительных площадках, оборудованных весовыми испарителями ГГИ-500-50 и на почвенном испарительном полигоне, оборудованном четырьмя гидравлическими почвенными испарителями (ГПИ) малой модели ГР-17 (рисунок 2.5, таблица 2.2). Из 11 почвенных испарительных площадок три, имеющие в обозначении букву «a», переносились или были переоборудованы, соответственно ряд наблюдений был нарушен. Четыре почвенных испарительных площадки (№ 1, 2, 3, 4 (4a)) с весовыми испарителями размещались на правом очень пологом склоне р. Раковка территории агрометеостанции «Тимирязевский», на С производством наблюдений за испарением с сельскохозяйственных культур.



Рисунок 2.5. Картосхема исследуемой территории, номера на карте соответствуют нумерации в таблице 2.1

Почвенная испарительная площадка № 5 находилась в лесу на южном склоне долины р. Комаровка для измерения испарения под пологом леса. Поверхность площадки горизонтальная покрыта луговой почти И растительностью, типичной для редко затопляемых пойм. Почвы дерновоаллювиальные супесчаные, на глубине свыше 40-50 см содержится значительное количество гальки разного размера и степени окатанности. Грунтовые воды аллювия поймы гидравлически связаны с речными. Располагаясь обычно на глубине 2-3 м, в период паводков они поднимаются до дневной поверхности. Ряд данных наблюдений за испарением на этой площадке составляет 23 года, с 1974 по 1996 гг.

	Принадлеж-	Расположение		Гол	Год	Годы с			
Номер			Тип	ТОД	оконча	отсутстви-			
площад-	ность к	относительно		начала	ния	ем			
КИ	водосбору	метеоплощадки	испаритсля	наол- ий*	набл-	наблюде-			
				ии	ий	ний			
Почвенные испарительные площадки									
1	Р. Раковка	В 1.5 км на C3 от АГМС Тимирязевский	ГГИ-500-50	1961	1980	1975, 1976 1979			
2	Р. Раковка	В 0.8 км на ЮЗ от АГМС Тимирязерский	ГГИ-500-50	1961	1980	нет			
3	Р. Раковка	В 1.0 км на ЮЗ от	ГГИ-500-50	1961	1980	нет			
4	Р. Раковка	В 1.3 км на Ю от АГМС Турки по старовний	ГГИ-500-50	1961	1976	нет			
4a	Р. Раковка	В 1.3 км на Ю от АГМС	ГГИ-500-50	1975	1976	нет			
10	Р. Раковка	В 1.1 км на ЗСЗ от А ГМС Тимираророгий	ГГИ-500-50	1968	1986	1984			
10a	Р. Раковка	На метеоплощадке	ГГИ-500-50	1985	1993	нет			
5	Р. Комаровка	В 0.2 км к C3 от ПВБС (Центральный)	ГГИ-500-50	1974	1996	нет			
8	Р. Комаровка	На метеоплощадке ПВБС (Центральный)	ГГИ-500-50	1962	1996	нет			
9	Лог Луговой	В 13 км на C3 от ПВБС(Центральный)	ГГИ-500-50	1967	1975	нет			
9a	Лог Луговой	В 13 км на C3 от ПВБС(Центральный)	ГГИ-500-50	1975	1995	нет			
		Почвенно-испарител	іьный полигоі	H					
Целин-	Р. Раковка	На метеоплощадке АГМС Тимирязевский	ГР-17 (ГПИ №1)	1973	1983	нет			
ныи участок			ГР-17 (ГПИ №2)	1973	1974	нет			
Ποσστο		II	ГГИ-500-50	1973	1984	нет			
Делянка №1	Р. Раковка	на метеоплощадке АГМС Тимирязевский	ГР-17 (ГПИ №3)	1973	1981	нет			
-	Р. Раковка		ГГИ-500-50	1973	1993	1987			
Делянка №3		на метеоплощадке АГМС Тимирязевский	ГР-17 (ГПИ №4)	1973	1990	1982, 1983 1986, 1987			
π	Р. Раковка	TT	ГГИ-500-50	1973	1993	нет			
делянка №2		на метеоплощадке АГМС Тимирязевский	ГР-17 (ГПИ №5)	1973	1993	1983 1987			
Водноиспарительные площадки									
б/н	Р. Раковка На метеоплощадке АГМС Тимирязевский		ГГИ-3000	1957	н/в	1970 1971			
б/н	Р. Комаровка	На метеоплощадке ПВБС (Центральный)	ГГИ-3000	1958	н/в	1970 1971			

Таблица 2.2 Сведения о почвенных и водноиспарительных площадках ПВБС

* Год начала наблюдений, результаты которых были опубликованы

Почвенная испарительная площадка № 8, с рядом наблюдений с 1962 по 1996 гг., располагалась на поляне правой пойменной террасы р. Комаровка. Еще один пункт размещался в бассейне лога Лугового (№ 9 (9а)) в 13 км на северо-запад от метеоплощадки ПВБС, в средней части экспериментального водосбора лога Лугового, в 2 км севернее с. Глуховка. Площадка размерами 5х8 м размещалась в середине треугольной поляны со стороной 5 м. С северной стороны поляны произрастал бархат, с остальных сторон кустарник и деревья (дуб, лещина) высотой 1-4 м. Поверхность площадки слегка кочковатая, имеет юго-западный уклон и покрыта луговым разнотравьем. Почвы маломощные лугово-илистые, тяжелосуглинистые. Грунтовые воды до 5 м отсутствуют. На площадке № 9 наблюдения проводились с 1967 по 1975гг, на площадке № 9а – с 1975 по 1995гг.

Почвенная испарительная площадка № 10 (10а) находилась на правом склоне долины р. Раковка на постоянном целинном воднобалансовом участке АМС «Тимирязевский». Площадь участка 5200 м², поверхность ровная со слабым южным и юго-западным уклоном. В 60 м к северо-западу от площадки расположены заросли ивы высотой до 4 м. Растительный покров – луговое разнотравье с преобладанием полыни обыкновенной, полыни красночеренковой и мятлика. Почвы на участке лугово-бурые, глеевые оподзоленные. Грунтовые воды до глубины 10 м отсутствуют. На площадке № 10 наблюдения проводились с 1968 по 1983гг, на площадке № 10а – с 1985 по 1993гг.

Почвенный испарительный полигон был заложен с целью решения ряда задач, связанных с наблюдением за испарением с поверхности почвы, а также для более надежного и детального изучения испарения с целины и с полей основных сельскохозяйственных культур Приморья (соя, пшеница, клевер, целина). Полигон был расположен на правом, очень пологом склоне долины реки Раковка, и представлял собой два участка, которые разделялись полевой дорогой – целинный и сельскохозяйственный, разбитый на три равных делянки размерами 26х29 м. Почвы на делянках луговые, бурые, глеевые, оподзоленные, тяжелосуглинистые. Делянки были оборудованы гидравлическими почвенными испарителями ГР-17, параллельно с ними эксплуатировались и весовые почвенные испарители. Почвенные испарители на делянках № 2 и 3 имеют ряд наблюдений с 1973 по 1993 гг., на делянке № 1 – с 1973 по 1984 гг.

Из всех гидравлических испарителей на почвенном испарительном полигоне лишь на ГПИ № 5, расположенном на делянке № 3, проводились наблюдения с 1973 по 1993 гг. К сожалению, ряд на данном испарителе все же является неполным в связи с периодами отсутствия на почвенном испарительном полигоне наблюдателя и периодами его затопления и неисправностей приборов. Остальные три гидравлических испарителя имеют ограниченный ряд наблюдений (на целинном участке с 1973 по 1983 гг., на делянке № 1 с 1973 по 1981 гг., на делянке № 2 с 1973 по 1990 гг.) и большое количество пропусков, связанных, опять же, с ремонтом приборов после затоплений, модернизацией, отсутствием наблюдателя, проведением строительных работ на площадке и т.п.

Так как наблюдения на гидравлическом испарителе считаются наиболее точными из испарительных установок [Рекомендации..., 1976], то выбор периода исследований определялся возможностью сравнения полученных расчетных и модельных данных с фактическими наблюдениями на ГПИ. После проведения анализа рядов фактических данных самого точного из испарительных установок ПВБС - гидравлического испарителя ГР-17, был выбран, как наиболее полный, период наблюдений с 1973 по 1987 гг.

Из почвенных весовых испарителей модели ГГИ-500-50 с рядом наблюдений с 1973 по 1987 гг. были отобраны два испарителя, установленные на делянках № 2 и 3 почвенного испарительного полигона в бассейне р. Раковка, два испарителя на почвенных испарительных площадках № 5 и № 8 в бассейне р. Комаровка, и испаритель № 9а, расположенный в бассейне лога Луговой.

Наблюдения за испарением с водной поверхности на ПВБС проводились на метеостанциях Тимирязевский (31961) и Приморская (31962) в теплый период года с апреля по октябрь с помощью испарителей ГГИ-3000 (таблица 2.2). Один из испарителей был расположен в долине р. Комаровки на правом берегу в 30 м от уреза воды, второй был установлен на правом пологом склоне р. Раковка. Источником данных о фактическом испарении послужили Материалы наблюдений Приморской воднобалансовой станции [Материалы наблюдений..., 1973-1993].

2.3 Характеристика гидрологического режима рек

Исследованием гидрологического режима и водного баланса рек ПВБС в разные годы занимались такие исследователи как Урываев П.А. [1959а, 19596, 1964], Гарцман И.Н. [1968, 1969], Бефани А.Н. [1966], Глубоков В.Н. [1977], Лыло В.М. [1971], Горчаков А.М [1972, 1974,1975, 1983], Гарцман Б.И. [2007, 2008, 2015] и др. В развитие исследований испарения в Приморье и на территории ПВБС значительный вклад внесли Урываев П.А., Урываев А.П., Горчаков А.М., Березников К.П., Плиткин Г.А., Рябчиков Г.Я., Иванова Э.А., Межонная И.В. [Урываев П.А., 1961; Урываев А.П., 1973; Горчаков, 1983; Березников и др. 1966; Березников, 1970, 1972, 1977; Березников, Пономарева, 1977; Плиткин, 1988; Рябчиков, 1976; Иванова, 1976; Межонная, 1988].

Среднемноголетний годовой сток для рек ПВБС колеблется от 68 до 430 мм и находится в непосредственной зависимости от свойств подстилающей поверхности, рельефа и количества годовых осадков. Изменчивость (коэффициент вариации) его по времени от бассейна к бассейну колеблется от 0.44 до 0.88. За начало гидрологического года для рек Приморской воднобалансовой станции целесообразно принимать конец зимнего периода, приуроченный в среднемноголетнем разрезе к середине марта. Именно в начале этого месяца наблюдается минимум интенсивности влагооборота. Сток февраля для рек ПВБС составляет в среднем менее 0.3 % годового, практически исчезая для открытых равнинных рек и очень малых облесенных водосборов.

Для рек ПВБС, расположенных в разных ландшафтных условиях весеннее половодье начинается со значительной сдвижкой во времени. Если на равнинных реках основная часть талого стока проходит в марте – начале апреля, то на горных – в апреле - начале мая. Однако для горных рек характерно ежегодное, хотя и незначительное повышение стока в марте за счет частичного таяния снега на открытых участках и облесенных южных склонах. К началу весеннего половодья на территории ПВБС может накапливаться до 120 мм воды в виде снега [Лыло, 1971]. Различия в снегонакоплении на северных равнинных и южных горных бассейнах весьма существенны [Урываев, 1959б, 1964] при примерно равном от года к году соотношении.

Объем сублимации осадков с поверхности снежного покрова за три месяца зимы составляет не более 3 % годового объема испарения. Благодаря интенсивной солнечной радиации, свойственной этим широтам, весеннее снеготаяние начинается еще до перехода среднесуточных температур воздуха через 0°С. После смены муссонов, т.е. при участии адвективного тепла, этот процесс еще более ускоряется даже на защищенных участках. В работе [Гарцман, 1969] указывается, что потери зимних осадков до начала весеннего половодья составляют 30-60 мм, в зависимости от защищенности и других факторов эти потери в течение зимы неравномерны. В значительной степени убыль снега объясняется положительным радиационным балансом в отдельные сутки и часы, начиная с середины зимы. Однако увеличения стока при этом не происходит. Талая вода проникает в почву и там снова замерзает, т.е. значительная часть указанных потерь фактически идет на увеличение запасов влаги в почвогрунтах, что в дальнейшем благоприятствует формированию стока в период весенних дождей и только незначительная часть действительно теряется на испарение. По данным наблюдений на ПВБС за 10 лет среднее суммарное испарение за зиму (декабрь-февраль) составляет около 12 мм и столько же за март.

Таким образом, за исключением редких лет, снеговое питание рек ПВБС незначительно. Большую роль в формировании стока в весенний сезон играют жидкие осадки апреля – июня. По данным [Гарцман, 1969], соотношение между нормами питания весеннего половодья талыми и дождевыми водами оценивается как 1: 2.5. Такое соотношение характерно в основном для горных рек. Если принять сток апреля как сток преимущественно снегового происхождения, то по отношению к стоку весеннего происхождения (март – июнь) он составляет около 40%. Для равнинных бассейнов соотношение иное. Здесь сток преимущественно снегового происхождения формируется в марте, и его доля в объеме весеннего половодья в среднем составляет 25 %. В годовом разрезе преимущественно происхождения доли стока снегового соответственно составляют 18 % для горных и 7% - для равнинных бассейнов.

Водность каждого конкретного года фактически определяют характерные для Приморья ливневые осадки тайфунного происхождения, которые вызывают катастрофические паводки [Горчаков, 1983]. Во время прохождения тайфуна (за 1-2 дня) может выпасть половина годовой нормы осадков. Два-три средних тайфуна при любом половодье также обуславливают многоводный год, и, наоборот, отсутствие тайфунов летом при значительном половодье обуславливает в целом маловодный год.

Одной из особенностей рек ПВБС является их способность довольно быстро сбрасывать поступившую в них влагу. Небольшое время добегания и быстрая реакция на интенсивные осадки горных водосборов обеспечивается благодаря большим уклонам, сильноскелетным почвам, обеспечивающим инфильтрацию любой развитой осадков интенсивности И системе внутрипочвенных дрен, по которым происходит т.н. контактный сток. Быстрая реакция равнинных бассейнов на осадки при слабых уклонах склонов и тальвегов обусловлена преимущественно поверхностном стокообразованием [Бефани, 1966; Горчаков, 1983; Гарцман и др. 2015, Бугаец и др., 2015]. В обоих случаях благоприятствующие (первые) и сдерживающие (вторые) моменты, компенсируя друг друга, создают общую картину одновременности

63

происхождения паводков и равной их продолжительности для всех водосборов ПВБС.

Отличительной особенностью горных водосборов является наличие довольно продолжительной ветви гидрографов спада паводков, обусловленной временем добегания грунтовых вод (дождевых вод, просочившихся в зону насыщения). Для равнинных рек взаимодействие поверхностных и грунтовых вод, если и имеет место, то только в самых верховьях водосборов. Большая часть осадков на водосборах этого типа аккумулируется в бессточных понижениях и из-за наличия в покрове тяжелых плотных глин не достигает зоны насыщения и расходуется в основном на сток и испарение. Например, р. Раковку в среднем и нижнем течении можно отнести к равнинной реке, но в верховье (30% всей площади) – это типичная горная река.

Зимний сток неустойчив во времени и очень низок. В декабре-феврале стой стока составляет не более 20 мм, причем основная доля этого стока проходит в декабре. В среднем для р. Комаровка у Центрального слой стока за зиму составляет 6.2 мм, для р. Репьевки у Воздвиженского – 0.7 мм. По отношению к годовому зимний сток составляет не более 5%. Большая часть рек ПВБС промерзает еще в начале зимы. В годы с теплым и дождливым ноябрем и декабрем сроки промерзания рек затягиваются до конца января. Горные реки с площадями водосборов 5 – 25 км² перемерзают очень резко, а горные реки с площадями свыше 25 км² вообще не промерзают. Для открытых равнинных рек такой предел не установлен – промерзает даже р. Раковка с площадью водосбора 755 км².

Глава 3. Методы исследования

В современных моделях формирования стока, использующихся в исследованиях динамики гидрологических систем (речных водосборов) и компонентов водного баланса, наиболее распространенным способом оценки испарения является преобразование потенциальной эвапотранспирации РЕТ (Potential Evapotranspiration) в действительную, или фактическую AET (Actual Evapotranspiration). Термин потенциальная эвапотранспирация (PET), впервые ввел Торнтвейт (Thorntwaite, 1948) при классификации климатов. Сейчас под этим термином понимают максимальную скорость испарения с большой площади (во избежание возможных эффектов локальной адвекции), имеющей сплошное и однородное покрытие в виде достаточно увлажненной растительности.

Хотя понятие РЕТ широко используется в практике гидрологического моделирования, сама концепция РЕТ до сих пор не имеет четкого определения в масштабе речного водосбора. В связи с этим выбор методов оценки РЕТ в гидрологических моделях практически не регламентируется. РЕТ часто рассчитывают с помощью метеорологических данных, полученных в условиях, далеких от реализации всех потенциальных возможностей. В гидрологической литературе представлено множество моделей расчета потенциальной эвапотранспирации, каждая из которых предъявляет различные требования к данным.

В ситуациях, когда наблюдается недостаточное количество метеорологических станций и, соответственно, метеоданных, на территории водосбора, специалистам часто приходится решать какие методы расчета испарения следует использовать при моделировании: сложные, с серьезными требованиями к исходным данным, или возможно, использование более простых формул с минимальным набором исходных данных без особых потерь в качестве [Oudin et al., 2005b].

Так, часто наилучшим способом описания процесса, при этом обеспечивающим максимальную точность расчетов стока, становится самая простая зависимость от величин, измеряющихся регулярно и с минимальными погрешностями. При этом ошибки расчетов испаряемости могут быть компенсированы за счет подгонки параметров в других блоках модели (проблема «эквифинальности») [Beven, 2001]. В связи с этим возникает необходимость обоснований, которые позволяют судить о целесообразности применения методов разной сложности в гидрологическом моделировании в условиях ограниченности информации.

В данной главе представлено описание четырех наиболее часто применяемых в гидрологических моделях методов расчета потенциального испарения: Пенмана-Монтейса (PM) [Monteith, 1965], Пристли-Тэйлора (PM) [Priestley, Taylor, 1972], Одина (OD) [Oudin et al., 2005b] и Харгривза (HG) [Hargraves, Samani, 1985]. Указанные методы являются наиболее часто применяемыми в практике гидрологического моделирования [Zhao et al., 2013], при этом они достаточно сильно отличаются друг от друга детальностью описания процессов испарения и требованиями к составу исходных данных. Методы РМ и РТ относят к классу физическиобоснованных методов определения РЕТ, ОD и HG – являются эмпирическими зависимостями. Кроме этого, для анализа и сравнения расчетных значений РЕТ между собой и с данными непосредственных измерений, полученных с помощью испарителей, произведен расчет испарения с использованием комплексного метода Будыко, как наиболее признанного, который физически обоснован, так как в нём учитываются основные определяющие испарение факторы: радиационный баланс, температура и влажность воздуха [Будыко, 1948, 1952]. Во втором подразделе приводится описание использованной в качестве методической основы гидрологического моделирования широко известной концептуальной модели HBV, в которой потенциальное и актуальное испарение связаны текущим состоянием емкости, имитирующей динамику почвенного влагозапаса.

3.1 Методы расчета потенциального испарения

Комплексный метод Будыко позволяет определить среднее месячное испарение с естественно увлажненных территорий по средним месячным значениям количества осадков x, стока y, температуры t и характеристики влажности воздуха e.

Расчеты испарения производятся по формулам [Рекомендации..., 1976]:

$$E = E_0 \frac{W_1 + W_2}{2W_0} \operatorname{пpu} \frac{W_1 + W_2}{2} < W_0 \tag{3.1}$$

И

$$E = E_0 \quad \Pi p \mu \quad \frac{W_1 + W_2}{2} \ge W_0, \tag{3.2}$$

где E и E_0 – месячные суммы испарения и испаряемости; W_1 , W_2 — продуктивные запасы влаги в метровом слое почвы в начале и конце месяца; W_0 – критический продуктивный запас влаги в метровом слое почвы, при котором и выше его испарение E равно испаряемости E_0 .

Запас продуктивной влаги в конце месяца *W*₂ вычисляется по формулам:

$$W_2 = \frac{c}{a} \, \Pi p \mu \, \frac{W_1 + W_2}{2} < W_0 \tag{3.3}$$

$$W_2 = W_1 + x - y - E_0 \quad \text{при} \quad \frac{W_1 + W_2}{2} \ge W_0, \tag{3.4}$$

где

$$c = W_1 b + x - y,$$
 (3.5)

$$b = 1 - \frac{E_0}{2E_0},\tag{3.6}$$

$$a = 1 + \frac{E_0}{2E_0},\tag{3.7}$$

При расчетах по комплексному методу Будыко различают два периода года – теплый и холодный [Рекомендации..., 1976]. К теплому периоду, кроме месяцев с положительной средней месячной температурой воздуха, добавляются предыдущий (последний в конце холодного периода) или

последующий (за концом теплого периода) месяц со средней отрицательной температурой воздуха при условии, если по абсолютной величине она оказывалась меньше температуры соседнего с ним месяца теплого периода.

Месячная испаряемость *E*₀ определяется по эмпирическим графикам связи ее с приближенным значением дефицита влажности воздуха

$$d = (e_t - e), \tag{3.8}$$

где e_t — вычисляемая по средней месячной температуре воздуха с помощью психрометрических таблиц максимальная упругость водяного пара, e — средняя многолетняя месячная упругость водяного пара воздуха.

Графики зависимости E_0 от d построены М.И. Будыко для различных геоботанических зон. Для построения данных графиков автором использовались значения испаряемости, вычисленные по разработанному им методу в зависимости от радиационного баланса, температуры и влажности воздуха. Всего Будыко выделил 10 геоботанических областей, определение которых происходит с помощью карты [Рекомендации..., 1976]. Затем по графикам связи определяется E_0 за все месяцы теплого периода года.

Критические запасы продуктивной влаги W_0 в метровом слое почвы (средние за месяц), при которых и выше которых испарение *E* равно испаряемости E_0 , определяются также в зависимости от геоботанической зоны и средней многолетней месячной температуры воздуха *t* по специальным таблицам, разработанным М.И. Будыко. Уточнение толщины активного для растений слоя почвы в том случае, даже если она значительно отличается от принятого значения 1 м, не вносит существенных изменений в результаты вычислений, поскольку испарение в расчетной схеме пропорционально отношению W/W_0 , которое мало зависит от толщины слоя почвы [Рекомендации..., 1976].

Продуктивные запасы влаги в метровом слое почвы $\frac{W_1+W_2}{2}$ (средние за месяц) определяются исходя из заданного для начала первого месяца теплого периода значения запаса влаги W_1 . Для всех последующих месяцев они

вычисляются по формулам 3.3 и 3.4 в зависимости от соотношения между величинами $\frac{W_1+W_2}{2}$ и W_0 . При этом запас влаги W_1 для начала каждого расчетного месяца (начиная со второго месяца теплого периода) принимается равным запасу влаги W_2 для конца предыдущего месяца.

Приближенное значение запаса влаги метрового слоя почвы для начала первого месяца теплого периода W_1 снимается с карты С.А. Вериго и Л.А. Разумовой [Вериго, Разумова, 1963]. После того, как определяется значение W_1 , начинается расчет значений W_2 для всех остальных месяцев.

Месячные суммы испарения вычисляются по формуле 3.1 или 3.2 в зависимости от соотношения между найденными для каждого месяца значениями $\frac{W_1+W_2}{2}$ и W_0 .

Проверка правильности выполненного вычисления испарения производится исходя из условий замыкания уравнения водного баланса для каждого месяца теплого периода в отдельности:

$$E = x - y - (W_1 - W_2), (3.9)$$

Комплексная схема Пенмана-Монтейса (РМ) описывается уравнением [Allen et al., 1998]:

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (R_{net} - G) + p_{air} \cdot c_p \cdot [e_s - e_a]/r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c/r_a)},\tag{3.10}$$

где ET – эвапотранспирация, мм/сут; λ – скрытая теплота парообразования, МДж/(м²·сут) (эвапотранспирация, выраженная в МДж/(м² сут), представляет собой λET , или скрытый тепловой поток); Δ – изменение кривой упругости насыщения пара, кПа/°С; R_{net} – радиационный баланс, МДж/(м²·сут); G – поток тепла в почву, МДж/(м²·сут); p_{air} – плотность воздуха, кг·м³, c_p - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, МДж/(кг·°С); e_s – упругость насыщения водяного пара, кПа; e_a - фактическая упругость водяного пара, кПа; γ - психрометрическая константа, кПа/°С; \mathbf{r}_c – совокупное сопротивление поверхности, с/м; r_a – аэродинамическое сопротивление, с/м.

Для расчета по формуле 3.10 требуются данные по минимальной и максимальной температуре воздуха, скорости ветра, солнечной радиации, относительной влажности.

Сопротивление поверхности r_c в формуле (3.10) описывает сопротивление потока пара через отверстия устьиц растений, общую площадь листа и испаряющую поверхность почвы (там, где растительность не покрывает почву полностью, фактор сопротивления должен включать испарение с поверхности почвы).

Взаимодействие между сопротивлением поверхности и плотным растительным покровом может быть выражено следующим образом:

$$r_c = \frac{r_1}{LAI_{active}},\tag{3.11}$$

где r_1 – суммарное сопротивление хорошо освещенного листа; LAI_{active} индекс активной (освещенной) части листа (м² (поверхности листа) / м² (поверхности почвы).

Индекс площади листа (LAI) – это площадь верхней стороны листа, отнесенная к единице площади почвы под листом. Он выражается в квадратных метрах лиственного покрова на квадратный метр поверхности почвы и, по сути, является безразмерной величиной. Активный LAI – это индекс лиственной поверхности, который активно участвует в переносе тепла и пара. Это обычно верхняя, освещенная часть густой кроны. LAI варьирует для различных культур, и наиболее распространенными для многих зрелых растений являются значения от 3 до 5. LAI для культуры изменяется в течение сезона и достигает максимума перед цветением, также зависит от густоты растений и разнообразия культур.

Суммарное сопротивление листа r_1 представляет собой среднее сопротивление отдельного листа. Это сопротивление является специфическим для каждой культуры и изменяется в зависимости от типа растительности. На

величину *r*₁ оказывают влияние интенсивность радиации, температура и дефицит давления пара.

Аэродинамическое сопротивление r_a связано с трением воздуха, протекающего над растительным покровом:

$$r_{a} = \frac{ln[\frac{z_{m}-d}{z_{om}}]ln[\frac{z_{h}-d}{z_{oh}}]}{k^{2}u_{z}},$$
(3.12)

где z_m - высота измерения скорости ветра, м; z_h - высота измерения влажности воздуха, м; d - высота смещения нулевой плоскости, м; z_{om} - длина шероховатости, определяющая передачу момента, м; z_{oh} - длина шероховатости, определяющая перенос тепла и пара, м; k - постоянная фон Кармана, равное 0,41; u_z - скорость ветра на высоте z, м/с.

Уравнение ограничено для условий, когда распределение температуры, атмосферного давления и скорости ветра следует почти адиабатическим условиям (без теплового обмена). Для широкого спектра культур высота смещения нулевой плоскости d и длины шероховатости, определяющая передачу момента z_{om} , определяются через высоту растений h (м) с помощью уравнений:

$$d = \frac{2}{3h} \tag{3.13}$$

$$z_{om} = 0.123h$$
 (3.14)

Длина шероховатости, определяющая передачу тепла и пара *z_{oh}* может быть аппроксимирована:

$$z_{oh} = 0.1 z_{om} \tag{3.15}$$

Хотя процесс обмена в вегетационном слое слишком сложен, чтобы полностью описываться двумя факторами сопротивления, авторами метода была получена хорошая корреляция между измеренным и вычисленным значением эвапотранспирации, особенно для однородной эталонной поверхности травы. Поэтому, для того чтобы избавиться от необходимости определять уникальные параметры испарения для каждой культуры, высоты растения и стадии роста, авторами метода была введена концепция эталонной поверхности: «гипотетической эталонной культуры с предполагаемой высотой посева 0.12 м, фиксированным поверхностным сопротивлением 70 с/м и альбедо 0.23» [Allen et al., 1998]. Таким образом, «упрощенное» комплексное уравнение Пенмана-Монтейса для оценки эвапотранспирации с эталонной поверхности (*ET*₀) выглядит следующим образом:

$$ET_o = \frac{0.408\,\Delta\,(R_{net}-G) + \lambda \frac{900}{T+273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \lambda(1 + 0.34 u_2)},\tag{3.16}$$

где ET_o – суммарное испарение, мм/день; T – температура воздуха на высоте 2м, °C; u_2 - скорость ветра на высоте 2м, м/с.

При расчетах испарения следует учитывать, что отклонения высоты растительного покрова от принятой эталонной высоты в 0,12м, а также локальные факторы окружающей среды, могут значительно изменить значение ET_o .

Для расчета радиационного баланса R_{net} используются астрономические характеристики и данные о продолжительности солнечного сияния, поток тепла в почву *G* определяется в зависимости от теплоемкости почвы и температуры воздуха, исходя из предположения, что температура поверхности почвы базируется на данных о температуре воздуха.

Для расчетов необходимы данные о высоте над уровнем моря и широте расположения исследуемой территории. Эти характеристики используются для приведения метеоданных к местному среднему значению атмосферного давления как функции от высоты над уровнем моря, и расчета радиационного баланса R_{net} . Широта выражается в радианах.

Изменение кривой упругости насыщения пара ∆ рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \right]}{(T+237.3)^2},\tag{3.17}$$

где T – температуры воздуха, °С.
Значения ∆ для различных температур воздуха приводятся в таблицах приложения «Эвапотранспирация сельскохозяйственных культур. Рекомендации по расчету потребности сельскохозяйственных культур в воде» [Allen et al., 1998].

Радиационный баланс R_{net} — это разница между поступающей и исходящей радиацией, как коротковолновой, так и длинноволновой. Существует баланс между поглощенной энергией, отраженной и излучаемой земной поверхностью, или разница между поступающей коротковолновой R_{ns} и исходящей длинноволновой радиацией R_{nl} :

$$R_{net} = R_{ns} - R_{nl} , \qquad (3.18)$$

 R_{net} обычно положителен в течение дневного времени и отрицателен в ночное время. Суточное значение R_{net} за период 24 часа почти всегда положительно, за исключением экстремальных условий на высоких широтах.

Коротковолновая радиация R_{ns} , получаемая из баланса между приходящей и отраженной солнечной радиацией, равна:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \,, \tag{3.19}$$

где α - альбедо или коэффициент отражения кроны, равный 0.23 для гипотетической эталонной травяной поверхности; *R_s* – приходящая солнечная радиация, МДж/(м² сут).

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a,\tag{3.20}$$

где *n* - фактическая продолжительность солнечного сияния, ч; *N* - максимально возможная продолжительность солнечного сияния, часы дневного света, ч; *n/N* - относительная продолжительность солнечного сияния; R_a – космическое излучение, МДж/(м² сут); a_s - постоянная, выражающая часть космического излучения, достигающего Земли в облачные дни (при n = 0); $a_s + b_s$ - постоянная, выражающая, достигающая часть космического излучения, достигающая часть космического излучения, выражающая часть космического излучения, достигающая часть космического излучения, достигающая часть космического излучения, достигающая насть космического излучения, достигающая часть космического излучения, достигающая насть космического излучения, достигающая насти земли в ясные дни (при n = N).

В зависимости от атмосферных условий (влажность, запыленность) и угла наклона Солнца (зависящего от широты и времени года), значения a_s и b_s будут меняться. Там, где данные по фактической солнечной радиации отсутствуют и не может быть произведена калибровка для коэффициентов a_s и b_s , рекомендуется использовать значения $a_s = 0,25$ и $b_s = 0,50$.

Космическое излучение *R*_a рассчитывается по формуле:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s sun(\varphi) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_s)], \qquad (3.21)$$

где G_{sc} - солнечная постоянная, равная 0,0820 МДж/(м² мин); d_r - относительное расстояние от Земли до Солнца; ω_s - угол заката Солнца, рад; φ – широта местности, рад; δ – наклон Солнца, рад.

Широта φ выражается в радианах и является положительной для северного полушария и отрицательной - для южного.

Относительное расстояние от Земли до Солнца *d_r* и наклон Солнца δ вычисляются следующим образом:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right),\tag{3.22}$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right),\tag{3.23}$$

где *J* - количество дней в году между 1 (1 января) и 365 или 366 (31 декабря). Угол заката Солнца *ω_s* равен:

$$\omega_s = \arccos[-tg(\varphi)tg(\delta)], \qquad (3.24)$$

Значения R_a на 15-е число каждого месяца для различных широт приводятся в приложении [Allen et al., 1998]. Они отличаются от среднесуточных величин каждого месяца менее, чем на 1% для всех широт в течение безморозных периодов и приводятся для упрощения расчетов.

Поток тепла в почву G – это энергия, затрачиваемая на нагревание почвы. G положителен, когда почва разогревается и отрицателен, когда она охлаждается. Хотя поток почвенного тепла невелик по сравнению с радиационным балансом R_{net} и может быть проигнорирован, количество энергии, получаемой и отдаваемой почвой в этом процессе, теоретически должно быть добавлено или вычтено из R_{net} при определении эвапотранспирации.

Для описания потока тепла в почву *G* используется уравнение:

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z, \qquad (3.25)$$

где c_s - теплоемкость почвы, МДж/(м² сут); T_i - температура воздуха во время i, °C; T_{i-1} - температура воздуха во время i-1, °C; Δt - продолжительность временного интервала, сут; Δz - эффективная глубина почвы, м.

Поскольку изменение температуры почвы запаздывает за изменением температуры воздуха, следует рассматривать среднюю температуру при определении суточного теплового потока, т. е. Δt должно превышать одни сутки. Глубина проникновения тепловой волны определяется длительностью временного интервала. Эффективная глубина почвы Δz , как правило, составляет около 0.10-0.12 м для интервала в один или несколько дней, но может достигать и 2 м для периодов, измеряемых месяцами. Поток тепла в почву зависит от минерального состава почвы и ее влажности.

Скрытая теплота парообразования λ выражает энергию, требуемую для преобразования единицы массы воды в пар при постоянных давлении и температуре. Значение скрытой теплоты изменяется как функция температуры. При высокой температуре требуется меньше энергии, чем при низкой. Но, поскольку λ изменяется незначительно, при нормальной температуре для уравнения Пенмана-Монтейса принята величина 2.45 МДж/кг. Это скрытая теплота парообразования для температуры воздуха выше 20 °C.

Дефицит давления пара – это разница между упругостью насыщения водяного пара (e_s) и фактической упругостью водяного пара (e_a) для данного периода времени. Для таких периодов, как неделя, декада, месяц, e_s рассчитывается с использованием максимальной T_{max} и минимальной T_{min} температур воздуха, осредненных за период времени:

$$e_s = \frac{e^0 T_{max} + e^0 T_{min}}{2},$$
 (3.26)

где e^0 - упругость насыщения водяного пара при температуре T, кПа; T – температура воздуха, °C.

Значение e^0 , определяется по приложению, приведенному в [Allen et al., 1998]. Использование в уравнении (3.26) данных о средней температуре воздуха, а не T_{max} и T_{min} , будет выражаться в занижении значения e_s , и следовательно, занижении ET_o .

Скорости ветра, измеренные на различной высоте, отличаются друг от друга, так как трение о поверхность снижает скорость ветра над ней. Для расчета эвапотранспирации требуются данные о скорости ветра на высоте 2 м над поверхностью Земли. Чтобы скорректировать данные по скорости ветра, измеренной на другой высоте, можно использовать логарифмический ветровой профиль:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln\left(67.8z - 5.42\right)},\tag{3.27}$$

где u_2 - скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью земли, м/с; u_z - скорость ветра, измеренная на высоте z над поверхностью земли, м/с; z - высота измерений, м.

Метод Пристли-Тэйлора (РТ) широко используется для оценки испарения в различных масштабах и является основой для различных гидрологических и климатических моделей. Его можно использовать в качестве альтернативы методу РМ в гумидных климатических условиях. Данный метод, по сути, является упрощением формулы (3.10), из которой исключен компонент аэродинамического сопротивления:

$$PET = \alpha_{PET} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G), \qquad (3.28)$$

где *а*_{РЕТ} – эмпирический коэффициент.

Коэффициент α_{PET}, еще известный как коэффициент Пристли-Тейлора [Priestley, Taylor, 1972] отражает эффект вертикального перемешивания сухого и влажного воздуха и приводит равновесное испарение в соответствие с фактическим испарением. Таким образом, с качественной точки зрения, значение α_{PET} не может быть меньше 1, потому что воздух всегда ненасыщен и может только бесконечно приближаться к насыщенному состоянию, независимо от того, насколько влажным является воздух у поверхности.

В исследовании Пристли и Тейлора [Priestley, Taylor, 1972] значение α_{PET} было установлено равным 1.26. Хотя фиксированное значение α_{PET} позволяет обоснованно оценить испарение с влажной поверхности [Yang, Roderick, 2019], некоторые исследования показали, что α_{PET} изменяется во времени и пространстве; например, α_{PET} часто демонстрирует более высокое значение в холодных условиях и становится ниже с повышением температуры [De Bruin, Keijman, 1979]. Это указывает на то, что α_{PET} должен быть переменной, а не постоянной величиной. Исследования показали, что значение α_{PET} =1.26 может быть использовано во влажном климате (с относительной влажностью воздуха более 60 %) и 1.74 - в засушливом климате (с относительной влажностью менее 60 %) [Assouline et al., 2016; Guo et al., 2015; Jury, Tanner, 1975; Lhomme, 1997b; Van Heerwaarden et al., 2009; Eichinger et al., 1996; McNaughton, Spriggs, 1986; Crago et al, 2023; Maes et al., 2019]. В настоящем исследовании α_{PET} принят константой и равен 1.26.

При выборе предпочтительного метода определения испарения необходимо учитывать увлажненность участка, стоимость необходимого оборудования требования И к его эксплуатации И техническому обслуживанию, а также качество доступных метеорологических данных. В тех необходимо финансовую случаях, когда учитывать составляющую исследований, либо вызывает сомнения качество данных, или отсутствуют исторические ряды данных часто используется метод Харгривза [Hargreaves and Samani, 1985], разработанный в 1985 году.

Данный метод является одним из основанных на температуре методов определения суммарного испарения, включенных в Систему гидрологического моделирования (HEC-HMS). Метод основан на

77

эмпирической зависимости суммарного испарения от солнечной радиации и температуры воздуха. Этот метод был апробирован на объектах по всему миру [Hargreaves and Allen, 2003] и позволяет фиксировать суточные изменения потенциального суммарного испарения с временными интервалами моделирования менее 24 часов.

Если данные о поступлении солнечной радиации к верхней границе атмосферы отсутствуют, то эту величину можно вычислить по широте исследуемой местности и времени года.

Формула Харгривза (HG) имеет вид:

$$PET = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot (T_{avg} + 17.8), \qquad (3.29)$$

где T_{max} , T_{min} и T_{avg} – максимальная, минимальная и средняя температура воздуха соответственно, °С; H_0 – поступление солнечной радиации к верхней границе атмосферы, МДж/(м²·сут).

Формула Одина (OD) использует еще меньшее количество входных данных, она основана на использовании только среднесуточной температуры воздуха T_{avg} [Oudin et al., 2005a, 2005b]. В основе лежит исследование эффективности более 25 существующих методов оценки испарения для более чем 300 водосборов. Формула Одина широко используется в современных гидрологических изысканиях:

$$PET = \begin{cases} \frac{0.408 \cdot H_0 \cdot (T_{avg} + 5)}{100}, \text{ если } Tavg + 5 > 0\\ 0 \end{cases}$$
(3.30)

3.2 Модель формирования стока HBV

Для гидрологического моделирования использована широко известная модель HBV [Bergström, 1976, 1992]. HBV (Hydrologiska Byrns Vattenbalansavdelning) – это концептуальная модель формирования стока с сосредоточенными (эффективными для речного бассейна) параметрами, которая включает описание гидрологических процессов в масштабе водосбора. Данная модель была разработана Шведским метеорологическим и

гидрологическим институтом (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SMHI) и первоначально использовалась для моделирования стока в Швеции. С 1976 года различные версии этой модели применяются более чем в 40 странах мира с разными климатическими условиями, как, например, скандинавские и африканские страны.

За время существования модель использовалась для различных масштабов: от небольших участков лизиметрических станций [Lindström, Rodhe, 1992] до всего водосбора Балтийского моря [Bergström, Carlson, 1994; Graham, 1999]. НВV применяли для оценки водных ресурсов [Jutman, 1992, Brandt, Bergström, 1994], прогнозирования паводков [Лупаков и др., 2022], моделирования при проектировании плотин [Bergström et al., 1992], определения биогенной нагрузки [Arheimer, 1994, 1999] и др. Было протестировано множество модификаций модели, в том числе полураспределенные версии [Lindström et al., 1997; Van Verseveld, et.al., 2024].

Модель HBV также достаточно широко используется в России. В работах [Борщ и др., 2023, 2024; Симонов и др., 2021, 2023; Симонов, 2023] выполнена оценка применимости концептуальной модели для водосборов, находящихся в различных природных условиях и имеющих различные морфометрические характеристики и создана единая автоматизированная система выпуска гидрологических прогнозов среднесуточного расхода для территории России. Множество исследований в области изучения процессов формирования стока, динамики водного баланса, генетических компонентов стока с использованием данной модели было проведено в Приморском крае с помощью указанной гидрологической модели [Bugaets et al., 2019, 2023; Лупаков, Бугаец, 2022; Лупаков и др., 2021, 2022, 2023, 2024; Губарева и др., 2019; Сидоренко и др. 2024].

В качестве входных модель использует данные о количестве осадков и температуре воздуха, а также суточные либо ежемесячные данные о потенциальном испарении. Временной шаг обычно составляет сутки, но при необходимости возможно использовать и более короткие расчетные интервалы. Данные о температуре воздуха используются для расчетов накопления и таяния снега.

HBV Модель состоит из нескольких блоков, отвечающих за интерполяцию метеорологических элементов, накопление и таяние снега, оценку эвапотранспирации, учет влажности почвы, генерацию И трансформацию стока (рисунок 3.1). В работе использована версия модели HBV с двумя стокоформирующими емкостями S1 (верхняя, мм) и S2 (нижняя, мм) (рисунок 3.2). Основное уравнение водного баланса водосбора в модели HBV представлено в виде:

$$P - AET - Q = SP + SM + UZ + LZ, \qquad (3.31)$$

где *P* – осадки (мм), *AET* – испарение (мм), *Q* – речной сток (мм), *SP* – влагозапас снежного покрова (мм), *SM* – влагозапас концептуальной почвенной емкости, *UZ* и *LZ* – влагозапасы верхней и нижней стокоформирующих емкостей соответственно.



Рисунок 3.1. Общая схема модели HBV

Осадки по площади водосбора обычно рассчитываются как средневзвешенные значения с учетом веса каждой из расположенных на водосборе или вблизи метеостанций:

$$P_{wsd} = \sum w_i P_i , \qquad (3.32)$$

где, *P_{wsd}* – осадки над водосбором, *P_i* и *w_i* – осадки и вес каждой метеостанции. Для назначения весов метеостанции может быть использованы различные методы интерполяции, например, полигонов Тиссена.



Рисунок 3.2. Блок-схема модели HBV

На первом этапе расчетов производится разделение осадков на жидкую и твердую фазы с помощью порогового значения температуры воздуха (*TT*, °C). Аккумуляция и таяние снежного покрова M (мм/сут) рассчитывается с помощью т.н. метода градусо-дней, для чего используется параметр стаивания *CFMAX* (мм/(С°·сут)):

$$M = CFMAX(T(t)) - TT)$$
(3.33)

Для бассейнов со значительным диапазоном высот возможна разбивка на высотные зоны. Для каждой из зон количество осадков и температура воздуха могут быть скорректированы с помощью параметров PCALT и TCALT соответственно:

$$V_h = V_0 + \frac{Grad_{h-h_0}}{h-h_0}, \qquad (3.34)$$

где, V_0 и V_h – осадки или температура воздуха на высоте h_0 и h, $Grad_{h-h_0}$ – градиент переменной. Градиент осадков обычно составляет 10-20%, температуры -0.6°С на 100 м.

Поправочный коэффициент *SFCF* используется для коррекции количества твердых осадков в целях компенсации ошибок измерений, сублимации и других факторов, явно не учитывающихся в модели.

Стаявший снег и жидкие осадки пополняют емкость, имитирующую почвенный влагозапас. Параметр FC (мм) – максимальное значение, SM – текущее состояние влагозапаса почвенной емкости. Интенсивность испарения определяется состоянием почвенной емкости через соотношение SM/FC и параметром LP (задается как доля FC), представляющим пороговое значение SM, по достижении которого значение актуального модельного испарения AET приравнивается к потенциальному испарению PET (рисунок 3.2):

$$AET = \begin{cases} PET \cdot min \left\{ \left(\frac{SM(t)}{FC \cdot LP} \right), 1 \right\}, \text{ при } \frac{SM}{FC} < LP \\ PET, \text{ при} \frac{SM}{FC} \ge LP \end{cases}. \tag{3.35}$$

Значения РЕТ могут быть дополнительно скорректированы с помощью параметра Cet соотношением:

$$PET(t) = (1 + Cet(T - T_m) \cdot PET_m, \qquad (3.36)$$

где T_m – среднемесячное значение температуры воздуха (C°), PET_m – среднемноголетнее значение PET на конкретные сутки (мм). В модели заданы ограничения интервала значений корректировки PET: $0 \le PET(t) \le 2 \cdot PET_m$.

Из емкости S1 модель генерирует два компонента стока Q0 и Q1 которые, обычно интерпретируются как быстрый поверхностный, и замедленный, внутрипочвенный. Грунтовый (меженный или базовый) сток модель генерирует как отток из емкости S2. Для описания каждого компонента стока используется линейное уравнение вида:

$$Qn(t) = Kn \cdot S(t), \tag{3.37}$$

где Qn – отток из соответствующей емкости (S1 или S2), Kn – коэффициент истощения (рецессии), S(t) – текущий влагозапас емкости (мм).

Формирование Q0 возможно только при достижении влагозапаса в верхней емкости S1 порогового значения HL (мм) (рисунок 3.3). Динамика пополнения стокоформирующей емкости S1 (recharge, мм/сут) зависит от отношения ее текущего и максимального влагозапаса SM/FC, количества влаги на верхней границе водосбора (P, мм) и параметра BETA:

$$\frac{\text{recharge}}{P(t)} = \left[\frac{SM(t)}{FC}\right]^{BETA}.$$
(3.38)

Параметр ВЕТА (3.38) контролирует увеличение запаса почвенной влаги с каждого миллиметра осадков или таяния снега.



Рисунок 3.3. Вклад осадков или снеготаяния в почвенную емкость

Динамика влагозапаса нижней емкости S2 определяется балансом между максимальной скоростью просачивания PERC (мм/сут) из емкости S1 и оттоком Q2. Сумма всех компонентов стока (Q0, Q1 и Q2) на каждый расчетный шаг трансформируется до замыкающего створа с помощью треугольной трансформационной функции с основанием MAXBAS (сут):

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i)Q_{sum}(t-i+1)$$
(3.39)

где Qsim – расчетный слой стока в замыкающем створе, Q_{sum} – суммарный (Q0+Q1+Q2) слой стока за время (t – i + 1), i – расчетный шаг моделирования, c(i) – функция бассейновой трансформации:

$$c(i) = \int_{i-1}^{i} \frac{2}{\text{MAXBAS}} - \left| u - \frac{\text{MAXBAS}}{2} \right| \times \frac{4}{\text{MAXBAS}^2} du$$
(3.40)

Глава 4. Результаты моделирования динамики компонентов водного баланса

4.1 Анализ фактического и расчетного испарения

Для оценки фактического испарения на исследуемой территории были проведены сравнение и анализ данных, полученных с помощью гидравлических, почвенных весовых и водных испарителей.

Сравнение суммарного месячного испарения по данным почвенных весовых испарителей ГГИ-500-50 №2 и №3 (расположенных на делянках 2 и 3 почвенного испарительного полигона в бассейне р. Раковка) показывает, что за один и тот же месяц на двух испарителях испарение может отличаться в полтора - два раза, например, за август 1975 года величина испарения на испарителе №2 составила 90 мм, а на испарителе №3 – 160 мм (рисунок 4.1), что отражает характерную особенность данного вида приборов – регистрацию испарения исключительно в конкретной точке, а именно в месте установки прибора.



Рисунок 4.1. Суммарное месячное испарение в бассейне р. Раковка по данным почвенных весовых испарителей

При осреднении значений испарения, полученных по почвенным весовым испарителям, расположенным в бассейнах рек Раковка и Комаровка за 1973-1987 годы различия сглаживаются и среднемесячные многолетние значения испарения для бассейнов рек Раковка и Комаровка практически не отличаются (рисунок 4.2).





Суммарное месячное испарение по данным гидравлических почвенных испарителей ГР-17 (ГПИ №1, ГПИ №4 и ГПИ №5), расположенных на территории почвенного испарительного полигона в бассейне р. Раковка также различается иногда в полтора - два раза. Например, в августе 1975 года величина испарения на ГПИ №1 составила 87 мм, на ГПИ №4 – 97 мм, а на ГПИ №5 – 191 мм (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3. Суммарное месячное испарение в бассейне р. Раковка по данным гидравлических почвенных испарителей

Суммарное месячное испарение за 1973 – 1987 годы по данным водных испарителей ГГИ-3000, расположенных на территории метеостанций

Приморская (бассейн р. Комаровка) и Тимирязевский (бассейн р. Раковка), представлены на рисунке 4.4. В среднем испарение с водной поверхности испарителя, расположенного в бассейне р. Раковка выше на 10-15 мм, чем испарителя, расположенного в бассейне р. Комаровка.



Рисунок 4.4. Суммарное месячное испарение по данным водных испарителей, расположенных в бассейнах рек Раковка и Комаровка

На рисунках 4.5, 4.6 представлены результаты обобщения месячных значений испарения за 1973 – 1987 годы, полученные в бассейнах рек Раковка и Комаровка с помощью различных испарительных установок: гидравлических испарителей ГР-17, почвенных весовых испарителей ГГИ-500-50 и водных испарителей ГГИ-3000.



Рисунок 4.5. Результаты обобщения месячных значений испарения, полученных по гидравлическим (а), почвенным весовым (б) и водным (в) испарителям, расположенным в бассейне реки Раковка (цветовые градации приведены по месяцам)





по месяцам)

Показания гидравлических испарителей в научной литературе принято считать эталонными, ошибки измерения испарения по почвенным весовым испарителям ГГИ-500-50 достигают 10-20% [Рекомендации..., 1976]. В весенние месяцы и в октябре испарение по почвенным весовым испарителям выше, чем по гидравлическим в среднем на 10-15 мм, с июня по сентябрь – ниже на 5-10 мм. Испарение по водным испарителям в весенние (май) и осенние (октябрь) месяцы также выше, чем по гидравлическим испарителям (в среднемесячных величинах –40 мм для мая и 20 мм для октября), а в летние месяцы – ниже (в среднем на 5-10 мм) (рисунок 4.5).

Если рассматривать данные наблюдений в многолетнем аспекте, то средние значения испарения, полученные с помощью почвенных весовых испарителей, отличаются от показаний гидравлического испарителя в сторону занижения (на 7-10%), что подтверждается исследованиями [Вершинин и др., 1980]. Анализ испарения, измеренного с помощью водных испарителей, показал, что его среднемноголетнее значение выше значения, полученного с помощью гидравлического испарителя в среднем на 23%.

88

В связи с тем, что при существующей густоте сети почвенных испарителей оценить испарение с поверхности речного водосбора целиком не представляется возможным, в настоящее время научным сообществом большое внимание уделяется гидрологическому моделированию и расчетным методам определения испарения.

Для моделирования гидрологического режима исследуемых водосборов, приведенных в таблице 2.1, для гидрологических постов Михайловский, Воздвиженский, Дубининский и Опытный были использованы данные наблюдений на метеостанции Тимирязевский (31961), для остальных постов использованы данные метеостанции Приморской (31962).

В ходе исследования были получены массивы суточных значений испарения, рассчитанные с помощью методов Пенмана-Монтейса (РМ), Пристли-Тейлора (РТ), Одина (ОD) и Харгривза (НG) а также массив среднемесячных значений испарения, полученный методом Будыко за период с 1973 по 1987 годы.

Источником данных для расчета испарения послужили метеорологические ежемесячники, гидрологические ежегодники и Материалы наблюдений Приморской воднобалансовой станции. Исходными данными для метода М.И. Будыко послужили среднемесячные значения температуры и влажности воздуха, среднемесячные суммы осадков и стока по всем месяцам за период 1973-1987 гг. Для расчетов методами Пенмана–Монтейса, Пристли– Тэйлора, Одина и Харгривза использовались максимальные, минимальные, среднесуточные значения температуры воздуха, влажности воздуха, скорости ветра на высоте 2 м, радиационном балансе и продолжительности солнечного сияния за тот же период.

Расчеты методом Будыко произведены в соответствии с Рекомендациями по расчету испарения с поверхности суши [Рекомендации..., 1976], методом Пенмана–Монтейса – в соответствии с Методическими рекомендациями продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН по расчету потребностей в воде для сельскохозяйственных культур ФАО-56 [Allen et all., 1998].

Оценка качества расчетов компонентов стока, эффективности моделирования стока и компонентов водного баланса выполнена с помощью традиционно применяемых в гидрологии критериев: коэффициента Нэша-Сатклифа (NSE), относительного смещения BIAS (%), коэффициента детерминации \mathbb{R}^2 и среднеквадратического отклонения σ .

Коэффициент эффективности модели Нэша – Сатклифа (*NSE*) с [Nash, Sutcliffe, 1970], используется для оценки для оценки качества расчетов стока и определяется по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{\text{M3M},i} - X_{\text{MOD},i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (X_{\text{M3M},i} - \overline{X}_{\text{MOD},i})^{2}},$$
(4.1)

где $X_{изм.}$ – измеренная величина; $X_{мод.}$ – рассчитанная величина; \overline{X} – среднемноголетнее значение измеренной величины.

В соответствии с [Moriasi et all., 2007], результаты моделирования по критерию NSE являются:

«неудовлетворительными»	при NSE \leq 0.5,
«удовлетворительными»	при $0.51 < NSE \le 0.65$,
«хорошими»	при $0.66 < NSE \le 0.75$,
«очень хорошими»	при NSE > 0.76.

Значения NSE, близкие к 1, указывают на то, что результат моделирования практически совпадает с измерениями.

Относительное смещение (BIAS) демонстрирует на сколько и в какую сторону прогноз отклоняется от факта.

$$BIAS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{\text{MOD},i} - X_{\text{H3M},i})^2}{\sum_{i=1}^{n} X_{\text{H3M},i}}.$$
(4.2)

Согласно критерию BIAS результаты моделирования считаются [Moriasi et all., 2007]:

«неудовлетворительными» при BIAS $\geq \pm 25\%$,

«удовлетворительными»	при $\pm 15\% \le BIAS < \pm 25\%$,
«хорошими»	при $\pm 10\% \le BIAS < \pm 15\%$,
«очень хорошими»	при BIAS < ±10%.

Отрицательное значение BIAS говорит о том, что прогноз был завышен (факт оказалась ниже), и, наоборот, положительное значение о том, что прогноз был занижен.

Коэффициент детерминации (R²) описывает долю вариации зависимой переменной, которую можно объяснить независимыми переменными в регрессионной модели и рассчитывается по формуле:

$$R^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[(X_{\text{изм.}i} - \overline{X}_{\text{изм.}}) (X_{\text{мод.}i} - \overline{X}_{\text{мод.}}) \right]^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (X_{\text{изм.}i} - \overline{X}_{\text{изм.}})^{2} \sum_{i=1}^{n} (X_{\text{мод.}i} - \overline{X}_{\text{мод.}})^{2}},$$
(4.3)

Значение R^2 должно находиться в диапазоне от нуля до единицы: $0 \le R^2 \le 1$. Чем выше значение коэффициента детерминации, тем более качественной считается модель.

Среднеквадратическое отклонение *σ* представляет показатель рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания и определяется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2}{n-1}},\tag{4.4}$$

Небольшие величины среднеквадратического отклонения указывают на то, что данные плотно сгруппированы вокруг среднего значения, высокие – что данные рассеяны относительно средней величины множества.

В холодный период года с ноября по февраль максимальные значения суточного потенциального испарения (РЕТ) по всем методам составляют в основном ≤1.5 мм (рисунок 4.7). В весенние месяцы при устойчивом переходе температуры воздуха через 0°С величины потенциального испарения увеличиваются до 3–4 мм. В теплый период года со второй половины мая по середину сентября результаты расчетов суточных значений потенциального испарения 5–7

мм и практически повторяют ход друг друга. Максимумы потенциального испарения, полученные методами Одина и Харгривза, выше и достигают 7–8 мм, при этом относительно слабо коррелируют друг с другом.



Рисунок 4.7. Результаты обобщения суточных значений испарения, вычисленных с помощью различных методов за период моделирования по данным метеостанций Приморская (а) и Тимирязевский (б)

Ряды потенциального испарения, полученные с помощью всех четырех расчетных методов и агрегированные в месячные значения представлены на рисунках 4.8 (Тимирязевский) и 4.9 (Приморская).

Анализ годового хода потенциального испарения, полученного различными методами расчета по данным метеостанции Тимирязевский (рисунок 4.8) показал, что значения РЕТ, вычисленные методами Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора в 1,5-2 раза ниже, чем значения, полученные эмпирическими методами Одина и Харгривза. Наиболее низкие величины потенциального испарения демонстрирует метод Пристли-Тейлора, наиболее высокие – метод Харгривза. Согласно расчетам по методу Пенмана-Монтейсса максимальные значения испарения наблюдаются в мае, по всем остальным методам – в июле.

Амплитуда колебаний величин потенциального испарения, полученных с помощью физически-обоснованных методов расчета выше, чем полученных с помощью эмпирических методов расчета испарения. Максимальная амплитуда колебаний испарения наблюдается в июне и достигает 76 мм при расчете методом Пенмана-Монтейса и 60 мм при расчете методом Пристли-Тейлора. Наименьшие амплитуды колебания РЕТ наблюдаются при расчете методом Одина.



Рисунок 4.8. Годовой ход потенциального испарения, вычисленного с помощью различных методов по данным метеостанции Тимирязевский (цветовые градации приведены по месяцам): а) Пенмана–Монтейса, б) Пристли–Тэйлора, в) Одина, г) Харгривза

Распределение потенциального испарения, полученное с помощью методов Пристли-Тейлора, Одина и Харгривза по данным метеостанции Приморская (рисунок 4.9) практически повторяет распределение РЕТ полученное по данным метеостанции Тимирязевский. При расчете методом Пенмана-Монтейса по данным метеостанции Приморская получены величины потенциального испарения значительно ниже, чем при расчете по данным

метеостанции Тимирязевский. Если для указанных выше трех методов разница в годовой сумме потенциального испарения между метеостанциями составляет 17 – 18 мм (для методов Пристли-Тейлора и Одина) и 46 мм (для метода Харгривза), то для метода Пенмана-Монтейса разница составляет 236 мм (рисунок 4.10).



Рисунок 4.9. Годовой ход потенциального испарения, вычисленного с помощью различных методов по данным метеостанции Приморская (цветовые градации приведены по месяцам): а) Пенмана–Монтейса, б) Пристли–Тэйлора, в) Одина, г) Харгривза





Для сравнения и анализа полученных величин потенциального испарения был произведен расчет испарения по данным метеостанций Тимирязевский и Приморская комплексным методом Будыко (рисунок 4.11). Согласно Рекомендациям по расчету испарения с поверхности суши [Рекомендации..., 1976] ошибки вычисления месячных сумм испарения комплексным методом Будыко составляют 20-30 %, более точными считаются баланса с ошибкой метод теплового вычисления 15% лва метода: (использование данного метода ограничивается наличием данных теплобалансовых наблюдений) и метод испарителей с ошибкой 10-20%.



Рисунок 4.11. Годовой ход потенциального испарения, вычисленного с помощью метода Будыко по данным метеостанций Тимирязевский (а) и

Приморская (б) (цветовые градации приведены по месяцам)

95

Распределению величин испарения, рассчитанных комплексным методом Будыко наиболее близко соответствуют распределения, полученные с помощью методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора.

Агрегированные в месячные значения ряды потенциального испарения, рассчитанные с помощью методов Пенмана-Монтейса, Пристли-Тейлора, Одина и Хагривза, результаты расчетов по комплексному методу Будыко и данные измерений, полученные с помощью испарителей с водной поверхности представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

При сравнении пар R^2 и *NSE* (таблица 4.1) можно заключить, что наиболее близкими к методу Будыко являются результаты методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора; при этом метод Пенмана-Монтейса занижает, а Пристли-Тейлора завышает среднемноголетние значения потенциального испарения примерно на одну и туже величину – 20–30%. Методы Одина и Харгривза имеют более высокие по сравнению с двумя предыдущими методами значения R^2 , вероятно – за счет более точного воспроизведения максимумов теплого период года. Согласно критерию *BIAS* эмпирические методы завышают испарения относительно метода Будыко, при этом среднемноголетние значения по методу Харгривза имеют значительное положительное смещение (65 и 86%).

Таблица 4.1. Значения критериев соответствия расчетных величин потенциального испарения, полученных различными методами с результатами расчетов по методу Будыко

<u>№</u> п/п	Метод расчета РЕТ	Метод Будыко, данные по метеостанции	<i>R</i> ²	NSE	BIAS, %
1 Пенмана	Почилона Монтойоо	Тимирязевский	0.64	0.29	-22
	Пенмана-монтеиса	Приморская	0.64	0.54	28
2 Пристли–Тэйл	Приотни Тойноро	Тимирязевский	0.68	0.45	27
	пристли–тэйлора	Приморская	0.61	0.45	24
3 Одина	Олица	Тимирязевский	0.74	-0.62	-32
	Одина	Приморская	0.69	-0.48	-37
4	Vanenunga	Тимирязевский	0.76	-1.26	-65
	лартривза	Приморская	0.81	-1.57	-86

При сравнении значений РЕТ с данными наблюдений по водным испарителям более высокие значения R^2 получены для методов Пенмана-Монтейса, Пристли-Тейлора и Харгривза (таблица 4.2). По критерию *NSE* удовлетворительные результаты получены только для метода Пенмана-Монтейса при сравнении значений потенциального испарения с данными испарителя, расположенного в нижней, равнинной части водосбора р. Раковки (рисунок 2.1). В целом, при сравнении с данными испарителей значения потенциального испарения завышаются (*BIAS* < 0) эмпирическими методами Одина и Харгривза и занижаются (*BIAS* > 0) физически обоснованными методами Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора. Минимальные абсолютные значения *BIAS* получены для метода Пенмана-Монтейса, максимальные для метода Харгривза.

Таблица 4.2. Значения критериев соответствия расчетных величин потенциального испарения, полученных различными методами с данными водных испарители ПВБС

<u>№</u> п/п	Метод расчета РЕТ	Местоположение водного испарителя, водосбор	R^2	NSE	BIAS, %
1 Пенмана–Монтейса	Пенмана Монтейса	Комаровка	0.65	-1.11	28
	TICHMana—IVIONICICa	Раковка	0.75	0.66	7
2 Пристли-Тэйл	Приотни Тойноро	Комаровка	0.66	-1.34	29
	пристли–тэйлора	Раковка	0.49	-0.57	38
2		Комаровка	0.31	-7.16	-43
5	Одина	Раковка	0.36	-0.82	-22
4	Vanchunga	Комаровка	0.57	-13.60	-74
	Ларгривза	Раковка	0.61	-1.25	-37

Таким образом, удовлетворительное соответствие с результатами вычисления среднемесячных значений потенциального испарения методом Будыко демонстрируют только физически обоснованные методы Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора. При сравнении с данными наблюдений за испарением с водной поверхности только метод Пенмана-Монтейса дает близкие среднемесячные значения испарения и только для испарителя, расположенного в нижнем течении р. Ракова.

4.2 Оценки чувствительности результатов моделирования к использованию методов расчета потенциального испарения

Модель HBV использована для расчетов речного стока на 18 гидрологических постах в пределах водосборов рек Комаровки и Раковки за период 1964–1987 гг. Расчеты выполнены с суточным шагом. Калибровка параметров модели выполнена на основе данных плювиографов архива ПВБС, метеостанций Тимирязевский (31961) и Приморской (31962). Калибровка выполнена последовательно сначала для водосборов, расположенных возле главного водораздела, затем модельные гидрографы были использованы в качестве верхних граничных условий для нижележащих водосборов (рисунок 2.4):

- Комаровка-Центральный Каменский, Егерьский, Комаровский;
- Комаровка-Садовый Центральный, Лесничий, Нижний;
- Комаровка–Сахарный Завод Садовый, Мостовой;
- Раковка–Опытный Раковский, Дубининский, Михайловский, Воздвиженский.

В каждом численном эксперименте для каждого объекта потенциальное испарение задавалось на основе четырех расчетных методов, в то время как ряды данных по осадкам и температуре оставались фиксированными.

Параметры блока расчета испарения *FC*, *LP* и *Cet* при использовании физически обоснованных (Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора) и эмпирических (Одина и Харгривза) методов заметно отличаются (таблица 4.3).

При использовании эмпирических методов Одина и Харгривза значения максимальной влагоемкости *FC* для некоторых водосборов могут отличаться практически в два раза от значений, полученных с использованием методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора (рисунок 4.12, таблица 4.3). С увеличением площади водосбора (водосборы в нумерации расположены по

увеличению их площади) наблюдается увеличение разброса значений параметра максимального влагозапаса *FC*.

Таблица 4.3. Значения параметров блока расчета испарения модели HBV, полученных с применением различных методов расчета потенциального испарения: PM – Пенмана–Монтейса, PT – Пристли–Тэйлора, OD – Одина, HG – Харгривза

<u>№</u>		Параметры											
	Пост	PM			PT			OD			HG		
11/11		FC	LP	Cet	FC	LP	Cet	FC	LP	Cet	FC	LP	Cet
1	Пионерский	261	0.5	0.5	227	0.6	0.5	239	0.8	0.0	207	0.7	0.0
2	Доковский	220	0.6	0.2	241	0.7	0.2	158	1.0	0.0	142	1.0	0.0
3	Верхний	190	0.4	0.0	101	0.4	0.1	104	1.0	0.0	114	1.0	0.0
4	Егерский	140	0.3	0.1	188	0.1	0.1	125	1.0	0.0	126	1.0	0.0
5	Каменский	98	0.4	0.3	132	0.6	0.2	136	1.0	0.0	121	1.0	0.0
6	Мостовой	200	0.6	0.3	193	0.6	0.2	158	1.0	0.1	146	1.0	0.0
7	Дальний	162	1.0	0.5	83	0.5	0.1	108	1.0	0.1	124	1.0	0.0
8	Лесничий	167	0.8	0.5	137	0.7	0.5	129	0.9	0.1	132	0.9	0.0
9	Дубининский	206	0.5	0.0	250	0.5	0.1	187	0.9	0.1	175	0.8	0.0
10	Комаровский	260	0.7	0.1	192	0.6	0.1	141	1.0	0.0	138	1.0	0.0
11	Нижний	198	0.6	0.1	168	0.6	0.2	149	1.0	0.0	151	1.0	0.0
12	Михайловский	316	0.7	0.0	320	0.4	0.1	230	0.9	0.0	233	0.9	0.0
13	Воздвиженский	210	0.3	0.0	240	0.1	0.2	212	0.8	0.1	231	0.8	0.0
14	Центральный	220	0.4	0.3	180	0.1	0.2	105	0.9	0.0	60	0.9	0.2
15	Раковский	110	0.7	0.6	118	0.8	0.6	115	0.7	0.0	95	0.9	0.0
16	Садовый	330	0.6	0.3	245	0.6	0.5	190	0.8	0.1	125	0.9	0.1
17	Сахарный Завод	140	0.5	0.1	250	0.6	0.2	165	0.9	0.0	140	1.0	0.0
18	Опытный	290	0.5	0.1	330	0.3	0.3	230	0.9	0.0	225	0.9	0.0

При низких значениях максимальной влагоемкости FC и значениях LP равных или близких к нулю, характерных для конфигурации модели в сочетании с эмпирическими методами Одина и Харгривза, текущее значение влагоемкости SM намного чаще достигает максимального значения емкости FC и большее количество воды поступает в емкость стокоформирования S_1

(рисунок 3.2). Из этого следует вывод, что гидрологические модели типа HBV, в которых блоки динамики почвенной влаги реализованы в виде зависимости от влагоемкости почвы, при моделировании компонентов гидрографа стока могут быть достаточно чувствительны к вводу данных потенциального испарения. При использовании простых, обычно основанных только на значениях температуры воздуха, эмпирических моделей испарения завышение значений потенциального испарения необходимо компенсировать с помощью уменьшения влагоемкостных характеристик водосбора (*FC*).



Рисунок 4.12. Значения максимальной влагоемкости *FC* для различных водосборов (номера водосборов приведены в соответствии с табл. 4.3)

Так как методы Одина и Харгривза завышают значения потенциального испарения относительно Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора, то в модели необходимости использование эмпирических методов приводит к компенсации объема действительного испарения за счет снижения объема водосбора (FC)максимального влагосодержания И снижения роли потенциального испарения при извлечении влаги из почвы (с помощью параметров *Cet* и *LP*), а также стабилизации значений этих параметров вокруг границ интервалов области их определения (таблица 4.3). Использование эмпирических методов приводит к появлению достаточно сильной корреляции ($R^2 > 0.9$) между средними за теплый период года значениями

текущего влагозапаса *SM* и модельного действительного испарения AET (рисунок 4.13). Использование методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора, напротив, способствует более естественному распределению значений параметров блока испарения, при этом значения максимальной влагоемкости *FC* в большей мере соответствуют региональным данным о гидрофизических характеристиках почвогрунтов [Бугаец и др., 2015, 2018; Лупаков и др. 2022]. Корреляция между средними за теплый период года значениями текущего влагозапаса *SM* и модельного действительного испарения AET практически отсутствует за счет более детального учета текущих метеорологических условий на верхней границе водосбора.



Рисунок 4.13. Связь среднемноголетних значений текущего влагозапаса *SM* и модельного действительного испарения AET за летний период (июнь– сентябрь) при использовании различных методов расчета потенциального испарения, номера водосборов соответствуют нумерации в таблице 4.3

Для исследования реакции модели HBV при изменении конфигурации входных данных потенциального испарения на отличные от тех, для которых она была откалибрована, проведен ряд численных экспериментов, в которых значения параметров модели HBV, полученные при одном методе расчета PET, использовались для расчетов речного стока с применением остальных методов определения потенциального испарения.

Параметры модели HBV, полученные с помощью методов Одина и Харгривза, практически взаимозаменяемы: по критерию *NSE* снижение эффективности расчетов при перекрестной смене параметров находится в пределах 5–10%, оставаясь, в основном, в градациях "хорошо"; по критерию *BIAS* результаты при такой постановке численных экспериментов в большинстве случаев "удовлетворительны".

Параметры модели HBV, полученные с использованием метода Пенмана-Монтейса, достаточно эффективны при замене на параметры метода Пристли-Тейлора (оценки *NSE* и *BIAS* в этом случае попадают в градации эффективности "удовлетворительно" и лучше, за исключением водосборов р. Раковки, посты – Воздвиженский, Дубининский, Михайловский, Опытный) и не эффективны при замене параметрами методов Одина и Харгривза (практически во всех случаях оценки *NSE* и *BIAS* "неудовлетворительные").

Параметры модели, полученные при использовании метода Пристли-Тейлора, эффективны при расчете испарения методом Пенмана-Монтейса (за исключением поста Мостового); и наоборот, не эффективны, в соответствии с оценками *NSE* и *BIAS*, для остальных методов определения потенциального испарения практически для всех водосборов.

4.3 Результаты моделирования динамики компонентов водного баланса

Результаты моделирования стока с применением всех методов расчета потенциального испарения по критерию NSE (табл. 4.4) относятся к категории эффективности "удовлетворительно" и лучше. При этом большее количество случаев попадания в категорию "очень хорошо" относится к методам Одина (17 случаев) и Харгривза (16 случаев). По критерию *BIAS* расчеты с применением методов Одина и Харгривза относятся к категориям "хорошо" и "очень хорошо"; применение методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора приводит к двум и трем неудовлетворительным результатам соответственно.

N⁰	Пост		N	SE		BIAS, %				
п/п	11001	PM	PT	OD	HG	PM	PT	OD	HG	
1	Пионерский	0.67	0.74	0.79	0.76	-8	-25	-4	0	
2	Доковский	0.80	0.81	0.82	0.79	-18	-16	6	10	
3	Верхний	0.83	0.84	0.83	0.81	0	-5	12	6	
4	Егерский	0.79	0.82	0.82	0.80	-15	-8	10	5	
5	Каменский	0.78	0.80	0.81	0.80	-5	-12	8	3	
6	Мостовой	0.71	0.72	0.76	0.74	-38	-52	11	11	
7	Дальний	0.82	0.83	0.82	0.81	4	0	6	3	
8	Лесничий	0.81	0.84	0.87	0.86	-22	-22	2	0	
9	Дубининский	0.79	0.74	0.78	0.78	-53	-83	-1	9	
10	Комаровский	0.81	0.82	0.83	0.81	-12	-13	9	8	
11	Нижний	0.82	0.83	0.83	0.81	-9	-2	10	5	
12	Михайловский	0.80	0.75	0.78	0.78	6	16	2	3	
13	Воздвиженский	0.77	0.75	0.77	0.77	0	4	9	10	
14	Центральный	0.81	0.84	0.84	0.82	-13	-12	-5	-6	
15	Раковский	0.61	0.59	0.67	0.65	-16	-13	7	5	
16	Садовый	0.80	0.83	0.87	0.86	-20	-18	-4	-6	
17	Сахарный Завод	0.80	0.82	0.87	0.86	-18	-15	0	-2	
18	Опытный	0.81	0.77	0.84	0.82	-2	-8	2	1	

Значения критериев *NSE* и *BIAS*, полученные в результате калибровки для 18 водосборов, образуют облако точек в области *BIAS* ±20% и *NSE* >0.75 (рисунок 4.14). Все точки со значительными отклонениями средних значений оценок эффективности (10 точек, 14% от общего количества) – Раковский (РМ, РТ, OD, HG), Пионерский (РМ, РТ), Мостовой (РМ, РТ) и Дубининский (РМ, РТ) соответствуют водосборам, расположенным в бассейне р. Раковки. Это может быть связано с расположением метеостанций, данные которых использованы для расчета потенциального испарения. Водосборы, для которых получены высокие оценки качества моделирования, расположены в бассейне р. Комаровки; соответственно, метеостанция Приморская, данные которой использованы для расчета РЕТ, расположена практически в центре этого водосбора. Метеостанция Тимирязевский, по данным которой был сделан расчет потенциального испарения, находится достаточно далеко за пределами перечисленных выше водосборов с пониженными оценками эффективности моделирования.



Рисунок 4.14. Связь значений *NSE* и *BIAS*, полученных в результате калибровки для 18 водосборов; зеленым выделено облако точек в области *BIAS* < ±20% и *NSE* >0.75

Сравнение модельного актуального испарения АЕТ, полученного в численных экспериментах с различными методами оценки потенциального испарения и данных почвенных испарителей ПВБС, показало, что АЕТ, полученное при использовании концептуальных методов (Одина и Харгривза), в целом, на 20–40% лучше коррелирует с данными почвенных весовых испарителей, чем при использовании физически обоснованных методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора (рисунок 4.15). При этом абсолютные значения *BIAS* для всех рассмотренных случаев находятся в интервале –40%...–70%.



Рисунок 4.15. Корреляция модельных значений актуального испарения AET, рассчитанного с использованием различных методов PET для 18 водосборов (номера согласно таблице 4.4, каждому водосбору соответствует свой цвет), и данных почвенных весовых испарителей ПВБС за период май–октябрь (1973–1987 гг.): а – Пенмана-Монтейса; б – Пристли–Тэйлора; в – Одина; г –

Харгривза

Динамика потенциального и модельного актуального испарения, от которой зависят начальные условия развития паводков, незначительно сказывается на результатах моделирования максимальных расходов (рисунок 4.16). Использование методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора для прогноза стока приводит к завышению модельных величин максимальных расходов воды относительно измеренных величин на 10-15 %.

105



Рисунок 4.16. Коэффициент детерминации *R*² (а) и относительное смещение *BIAS* (б) смоделированных и измеренных максимальных расходов воды за теплый период года (июнь–сентябрь)

Сопоставление компонентов речного стока (поверхностного Q_0 , внутрипочвенного Q_1 и грунтового Q_2), полученных при моделировании с помощью разных методов определения потенциального испарения (6 пар – PM/PT, PM/HG, PM/OD, PT/HG, PT/OD и OD/HG), выполнено с помощью сравнения коэффициентов детерминации R^2 и среднеквадратического отклонения (рисунок 4.17). Полученные средние значения R^2 для компонентов стока в водосборах, расположенных в бассейне р. Комаровки, составляют 0.8– 0.9. Среднеквадратические отклонения для всех компонентов находятся в интервале 0.2–1.6 мм, для Q_1 и Q_2 можно отметить тенденцию к уменьшению значений с увеличением площади водосбора.

Значения R^2 в некоторых случаях падают практически до нуля. Это происходит для тех водосборов, для которых откалиброванные значения параметра максимальной влагоемкости *FC* значительно различаются в зависимости от используемого метода расчета потенциального испарения (таблица 4.3).

107



Рисунок 4.17. Коэффициент детерминации *R*² и среднеквадратическое отклонение (СКО), рассчитанные между парами различных методов определения потенциального испарения для различных компонентов речного стока *Q*₀ (a, б), *Q*₁ (в, г), *Q*₂ (д, е). Номера водосборов соответствуют нумерации (таблица 4.4)

Таким образом, анализ чувствительности к потенциальному испарению на основе сравнения измеренных и вычисленных расходов воды показывает, что разница влияния испарения на сток при применении методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора незначительна, из чего можно заключить, что для масштаба объектов исследования пространственная вариация аэродинамических членов уравнения Пенмана-Монтейса может быть эффективно описана с помощью постоянного коэффициента в уравнении Пристли-Тейлора.

В некотором смысле выбор одного или другого метода расчета РЕТ проблемой с общей определения оптимальной связан структуры гидрологической модели [Лупаков и др., 2021]. Физические методы более обоснованы, но требуют больших объемов данных и чувствительны к их качеству. Из двух используемых в данном исследовании физических методов оценки потенциального испарения метод Пристли–Тейлора представляется предпочтительным для регионального гидрологического (ре)анализа. Он требует меньше данных для оценки потенциального испарения, но результаты моделирования практически идентичны тем, для которых применялся метод Пенмана–Монтейса. Эмпирические методы гораздо менее требовательны к исходным данным (которые, по большей части, все равно оцениваются с эмпирических зависимостей), их применение помощью приводит К практически идентичным расчетным гидрографам. Более сложные методы не приводят к более высоким оценкам эффективности моделирования, из чего можно заключить, что в определенных случаях точностью метода расчета потенциального испарения можно, по сути, пренебречь, при этом параметры, компоненты стока и водного баланса могут быть искажены, но это не будет являться существенным недостатком. Окончательный вывод о предпочтении определенного метода расчета РЕТ должен делаться исходя из наличия данных, климатических особенностей региона и целей использования результатов моделирования.

4.4. Геоэкологическое обоснование выбора метода расчета испарения при оценке притока в лимитирующий период на примере Раковского водохранилища

Приморский край и территория ПВБС, в частности, по количеству осадков относится к области достаточного увлажнения, при этом из-за крайней неоднородности их выпадения во времени, маловодные периоды
наблюдаются довольно часто. В подобных условиях обеспечение бесперебойного и надежного водоснабжения такого крупного районного центра Приморского края, как Уссурийский городской округ, с ежегодно растущим количеством жителей, является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед администрацией муниципального образования.

Расположенное на территории бывшей Приморской воднобалансовой станции Раковское водохранилище (рисунок 4.18) на 83 % обеспечивает хозяйственно-питьевое водоснабжение Уссурийского городского округа, включающего г. Уссурийск и населенные пункты: пос. Тимирязевский, с. Утесное и с. Баневурово. Гидроузел Раковского водохранилища находится в 17 км к востоку от города Уссурийска. Площадь водосбора в створе гидроузла водохранилища составляет 198 км².



Рисунок 4.18. Карта-схема расположения Раковского водохранилища [Схема водоснабжения..., 2020]

Нормальный подпорный уровень (НПУ) на Раковском водохранилище составляет 100.00 м. При НПУ водохранилище имеет длину 4.55 км, среднюю ширину 1.02 км, среднюю глубину 9.24 м и площадь зеркала 4.63 км². Полный объем воды при НПУ составляет 42.12 млн. м³. Нормальный подпорный

уровень чаще всего характерен для периода с конца апреля по ноябрь. Полезный объем при НПУ, представляющий собой разницу между полным и мертвым объемами водохранилища, составляет 41.046 млн. м³. Форсированный подпорный уровень (ФПУ) находится на отметке 104.70 м, а полный форсированный объем водохранилища составляет 66.59 млн. м³. Форсированный подпорный уровень чаще всего характерен для периода июньсентябрь.

Минимальный допустимый уровень, или уровень мертвого объема (УМО) составляет 83.50 м. Площадь зеркала водохранилища при УМО сокращается до 0.60 км², а мертвый объем составляет 1.074 млн. м³. Данный уровень чаще всего характерен для конца зимней межени маловодного периода. Зона, расположенная ниже УМО, является зоной неиспользуемого объема водохранилища, санитарный попуск воды в нижний бьеф гидроузла составляет 0.033 м³/с. Гарантированный объем водопотребления при приближении уровня водохранилища к УМО составляет 19.0 млн. м³ (гарантированный расход воды 0.602 м³/с). При установленной норме потребления воды 215 л/сут на одного человека и численности населения Уссурийского городского округа, обеспечиваемого водоснабжением из Раковского водохранилища, на момент составления Правил использования водных ресурсов (2024 год [Правила использования..., 2024]) 178.8 тыс. человек, среднесуточный объем водопотребления ИЗ Раковского водохранилища составляет 38.4 тыс. м³.

За последние 15 лет (с 2009 по 2024 годы) численность населения Уссурийского городского округа выросла примерно на 24.5 тыс. человек. На основании прогноза администрации Уссурийского городского округа численность населения в округе в ближайшие несколько лет возрастет почти на 20 тысяч, и на 2030 год составит 225.3 тыс. человек [Схема водоснабжения..., 2020]. С учетом динамики численности населения, объем воды для нужд водопотребления из Раковского водохранилища достигнет 42.8 тыс. м³ в сутки (0.5 м³/с), что практически приближается к значению гарантированного расхода воды (0.6 м³/с). Таким образом, в условиях меженного стока управление режимом работы водохранилища требует высокой точности учета притока.

В настоящее время для Раковского водохранилища методики прогноза притока не разработаны. При создании методики прогнозирования притока должны быть учтены будущие объемы водопотребления с учетом роста населения и экономики Уссурийского городского округа. Таким образом, на объемом прогнозным водопотребления основе разницы между И гарантированным объемом водоотдачи можно сделать вывод, что точность методики прогнозирования суточного минимального притока должна составлять около 0.1 м³/с. Основными потерями стока в период наступления летне-осенних меженных периодов является испарение с водосбора Раковского водохранилища. В связи с этим выбор метода расчета испарения, обеспечивающего достаточную точность прогноза минимальных значений является актуальной задачей управления водными ресурсами стока, Уссурийского городского округа.

Водохозяйственный год для Раковского водохранилища начинается с текущего года заканчивается мартом апреля И следующего года. Маловодными принято считать годы с объемом стока, соответствующим обеспеченности *P* в промежутке $66.7\% < P \le 83.3\%$ и очень маловодными годы при *P* > 83.3% [СП 33-101-2003, 2004]. В течение рассматриваемого периода маловодными являлись 1973-1974, 1977-1978 водохозяйственные годы и очень маловодным 1978-1979 год. Помимо маловодных лет в 1976, 1982, 1985, 1986 годах отмечались такие периоды, когда в течение нескольких летних месяцев Раковское водохранилище приток В оказывался значительно ниже гарантированного водопотребления.

На рисунке 4.19 представлены графики фактических расходов воды на р. Раковка в маловодные 1973 (а) и 1977 (б) годы, с отчетливыми периодами маловодья, когда величина расходов снижалась до 0.02 м³/с, а также 1976 (в) и 1982 (г) годы, с фактическими расходами воды, снижающимися в июле-

августе до значений менее 0.04 м³/с (1976 г), и менее 0.06 м³/с (1982 г) (при гарантированном водопотреблении 0.602 м³/с). Статистические характеристики потенциального и актуального испарения, полученные разными методами расчета для ряда маловодных лет, приводятся в таблице 4.5.



Рисунок 4.19. Фактические расходы воды на р. Раковка в маловодные годы и периоды: 1973 (a), 1977(б), 1976 (в), 1982 (г)

Объемы стока в летнюю межень маловодных лет опускаются до величин менее 2 тыс. $m^3/сут$ (август 1973 г). Объемы стока выше 200 тыс. $m^3/сут$ в 1973 году наблюдались лишь в мае, а с 25 июня по 22 октября не превышали величину 30 тыс. $m^3/сут$. В 1977 году с 26 июля по 31 октября объем стока не превышал 40 тыс. $m^3/сут$ достигая минимума в середине сентября (3.96 тыс. $m^3/сут$). В 1979 году с 10 июня по 17 августа и с 18 сентября по 31 октября объемы стока не превышали 40 тыс. $m^3/сут$.

Характеристика	Q, мм/сут	РЕТ, мм/сут				АЕТ, мм/сут			
		PM	PT	OD	HG	PM	PT	OD	HG
1973 год									
Среднее	0.28	2.3	2.6	3.1	3.8	1.8	1.7	1.7	1.7
Минимальное	0.01	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.3	0.3
Максимальное	2.21	9.1	12.1	5.3	7.4	7.3	8.1	3.7	3.8
1977 год									
Среднее	0.33	2.6	2.6	3.0	3.9	2.1	2.0	1.9	1.9
Минимальное	0.02	0.0	0.0	0.5	0.8	0.0	0.0	0.4	0.4
Максимальное	1.66	9.4	12.1	5.3	6.8	8.3	9.2	3.4	4.1
1978 год									
Среднее	0.46	3.2	3.0	3.2	3.9	2.5	2.4	2.1	2.1
Минимальное	0.02	0.0	0.0	0.2	0.7	0.0	0.0	0.2	0.4
Максимальное	5.24	9.2	11.5	5.4	6.8	8.1	9.2	4.2	4.8
1979 год									
Среднее	0.95	2.3	2.3	3.0	3.8	2.0	1.9	1.9	1.8
Минимальное	0.04	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Максимальное	43.07	9.2	10.4	4.9	7.3	8.5	8.8	3.7	4.6

Таблица 4.5. Статистические характеристики измеренного стока – Q, PET и АЕТ за периоды межени.

Среднесуточные значения РЕТ, рассчитанные по методам Одина и Харгривза, как правило, на 1–2 мм выше, чем методами Пентана-Монтейса и Пристли-Тейлора. При этом максимальные величины действительного испарения АЕТ, рассчитанные физически обоснованными методами в 1.5-2 раза выше по сравнению с эмпирическими. На рисунке 4.20 представлены гистограммы суммарного месячного действительного испарения, рассчитанные для маловодных лет.

Анализ объемов стока, полученных в результате моделирования гидрологического режима водосбора Раковского водохранилища с помощью модели HBV и использованием четырех, описанных выше, методов расчета РЕТ показал, что для маловодных периодов согласно полученным оценкам NSE, использование физически обоснованных методов расчета испарения Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора приводит к более высоким оценкам при моделировании расходов воды (0.68 и 0.65 соответственно), чем использование эмпирических методов Одина и Харгривза (0.60 и 0.58 соответственно).



Рисунок 4.20. Месячные суммы АЕТ (мм), полученные с использованием четырех методов расчета испарения на р. Раковка в маловодные годы: 1973 (а), 1977(б), 1978 (в), 1979 (г)

На рисунке 4.21 в логарифмическом масштабе приводятся гидрографы расходов воды на р. Раковка в маловодные годы 1973 (а), 1978 (б), 1979 (в) с фактическими величинами и значениями, рассчитанными с помощью различных методов расчета испарения. Наиболее приближенными к фактическим значениям испарения в периоды маловодья являются величины, полученные с помощью методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора из чего можно заключить, что при разработке методик прогнозирования расходов воды и/или притока для оптимизации управления работой водохранилища в периоды летне-осенней межени, когда испарение является наиболее значимым компонентом водного баланса, предпочтительным является использование физически обоснованных методов расчета испарения.

На основе подученных результатов в качестве региональных рекомендаций по разработке методик расчета и прогноза притока, используемых в схемах управления работой водохранилищ хозяйственно-

114

питьевого водоснабжения, в условиях маловодья следует использовать физически обоснованных методов расчета потенциального испарения.



Рисунок 4.21. Фактические и смоделированные с помощью различных методов расчета испарения расходы воды на р. Раковка в маловодные годы 1973 (а), 1978 (б), 1979 (в), в логарифмическом масштабе

Заключение

Испарение наряду с атмосферными осадками и речным стоком являются основными переменными, определяющими водный баланс любой территории и Земли в целом. Несмотря на большое количество исследований, направленных на установление основных закономерностей, и разработку эффективных методов определения испарения с различных подстилающих поверхностей, существующие в настоящее время способы расчета испарения менее точны, чем способы определения других членов водного баланса.

Математическое моделирование гидрологических процессов является основой для решения большинства задач в области гидрологических исследований, в частности, процессов формирования стока и динамики баланса. Фактическое компонентов водного количество источников неопределенности при моделировании стока может быть значительно больше, чем количество калибруемых параметров гидрологических моделей. Например, источниками ошибок моделирования могут быть результаты агрегации ландшафтных характеристик подстилающей поверхности и методы подготовки входных данных, включающие различного рода процедуры определения вертикальных градиентов метеорологических характеристик.

В данном исследовании выполнена оценка влияния четырех наиболее часто применяемых в гидрологических моделях методов расчета потенциального испарения – Пенмана–Монтейса, Пристли–Тэйлора, Одина и Харгривза, которые отличаются по степени требовательности к составу исходных метеоданных, на эффективность и результаты моделирования процессов формирования стока и динамики компонентов водного баланса. Получены следующие основные результаты:

 Результаты физически обоснованных методов определения потенциального испарения в большей степени соответствуют широко используемой в гидрологической практике методике определения потенциального испарения Будыко и данным водных испарителей ПВБС.

- Используя разные оценки потенциального испарения, можно получить практически одинаковые модельные расходы воды, но совершенно разные компоненты стока и параметры модели.
- Разница в оценке влияния испарения на сток при применении методов Пенмана-Монтейса и его упрощения – метода Пристли-Тейлора незначительна, из чего можно заключить, что менее требовательный к исходным данным метод Пристли-Тейлора может быть предпочтительным в контексте региональных исследований водного баланса.
- При использовании эмпирических моделей испарения неопределенность результатов расчета потенциального испарения необходимо компенсировать за счет менее физически-обоснованных значений параметров, что в свою очередь может привести к искажению динамики компонентов водного баланса и генетических составляющих стока.
- Метод расчета потенциального испарения и оценки водных ресурсов должен выбираться исходя из имеющихся данных, особенностей исследования целей использования региона И результатов моделирования. В частности, при отсутствии необходимости учитывать динамику компонентов водного баланса (например, для прогнозирования речного стока) и/или отсутствии соответствующих данных мониторинга возможно использовать простые концептуальные физически-обоснованных, методы вместо И наоборот, при прогнозирования необходимости баланса компонентов водного физически-обоснованные методы необходимо применять расчета потенциального испарения.
- При обосновании выбора метода расчета потенциального испарения для оценки притока в лимитирующие периоды на примере Раковского

водохранилища показано, что физически обоснованные методы по сравнению с эмпирическими позволяют более точно учитывать условия образования стока на водосборе и, таким образом, обеспечить более эффективное управление работой водохранилища.

Полученные результаты позволяют делать обоснованные выводы о корректности результатов моделирования динамики компонентов водного баланса и геоэкологических оценок устойчивости развития территорий, в которых ключевую роль играют обеспеченность текущих и будущих базовых потребностей в воде населения и различных сфер деятельности, включая сельское хозяйство, промышленность и социальные нужды.

Список литературы

- Андреянов, В.Г. ВнутригодовоЫе распределение речного стока (Основные закономерности и их использование в гидрологических и водохозяйственных расчетах) / Под ред. Соколовского Д.Л. - Л.: Гидрометеоиздат, 1960. - 326 с.
- Атлас лесов Приморского края / Под ред. Краснопеева С.М., Розенберга
 В.А. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2005. 76 с.
- 3 Бабкин, В.И. Метод Х.Л. Пенмана и его использование для оценки испарения / В.И. Бабкин, А.П. Вершинин // Сборник работ по гидрологии, 1973. - №11. - С. 169-182.
- 4 Бабкин, В.И. Водный баланс речных бассейнов / В.И. Бабкин, В.С. Вуглинский // Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 190 с.
- 5 Березников, К.П. Метод расчета влажности почвы по слоям и суммарного испарения за короткие интервалы времени (от суток до декады) / К.П. Березников // Труды ДВНИГМИ. - 1977. - Вып. 59. - С. 98-116.
- 6 Березников, К.П. Расчет влажности почв и суммарного испарения за внутригодовые периоды на территории Амурско - Приморской области / К.П. Березников // Научные тр. Омского с.-х. ин-та. - 1972. - Т. 97. - С. 35.
- 7 Березников, К.П. Суммарное испарение за летние месяцы в Амурско -Приморской области / К.П. Березников // Труды ДВНИГМИ. - 1970. Вып. 31. - С. 46-51.
- 8 Березников, К.П. Уравнение теплоэнергетического баланса процесса суммарного испарения / К.П. Березников, В.С. Мезенцев, Г.В. Белоненко // Труды Омского с.-х. института. - 1966. - Т. 66. - С. 111-118.
- 9 Березников, К.П. Упрощенный способ определения максимально возможного суммарного испарения за короткие интервалы времени /

К.П. Березников, З.П. Пономарева // Труды ДВНИГМИ. - 1977. - Вып. 59. - С. 74-84.

- 10 Бефани, А.Н. Теоретическое обоснование методов исследования и расчета паводочного стока рек Дальнего Востока / А.Н. Бефани // Труды ДВНИГМИ, - 1966. - Вып. 22. - С. 124-215.
- 11 Борщ, С.В. Выбор методов прогнозирования речного стока / С.В. Борщ,
 Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 71-117.
- 12 Борщ, С.В. Прогнозирование стока рек России / С.В. Борщ, Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
- 13 Братсерт, У.Х. Испарение в атмосферу / У.Х. Братсерт Л: Гидрометеоиздат, 1985, - 352 с.
- 14 Брижатая, А.А. Экологический анализ лесной растительности бассейна реки Комаровка: юг Приморского края: дис. канд. биол. наук. 03.00.05 / Брижатая Альбина Александровна – Владивосток: Ботанический Сад-Институт ДВО РАН, – 2008. – 155 с.
- 15 Бугаец, А.Н. Опыт применения модели SWAT для изучения гидрологического режима малого речного бассейна (река Комаровка, Приморский край) / А.Н. Бугаец, Б.И. Гарцман, А.А. Терешкина, Л.В. Гончуков, Н.Д. Бугаец, Н.Ю. Сидоренко, Н.Ф. Пшеничникова, С.М. Краснопеев // Метеорология и гидрология. - 2018. - № 5. - С. 68–79.
- 16 Бугаец, А.Н. Анализ пространственной дифференциации почвенного покрова юга Приморья на примере бассейна р. Комаровка / А.Н. Бугаец, Н.Ф. Пшеничникова, А.А. Терешкина, С.М. Краснопеев, Б.И. Гарцман // Почвоведение. - 2015. - № 3. - С. 268-276.
- 17 Будыко, М.И. Испарение в естественных условиях / М.И. Будыко Л: Гидрометеоиздат, 1948. - 136 с.
- 18 Будыко, М.И. О методике определения испарения / М.И. Будыко // Метеорология и гидрология. - 1952. - № 9. - С. 3-9.

- 19 Будыко, М.И. Определение испарения по методу Пенмана / М.И. Будыко // Метеорология и гидрология. 1959. №7. С. 49-50.
- 20 Булавко, А.Г. Водный баланс речных водосборов / А.Г. Булавко Л.: Гидрометиздат, 1971. - 303 с.
- 21 Вериго, С.А. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве / С.А. Вериго, Л.А. Разумова Л.: Гидрометеоиздат, 1963.
 288 с.
- 22 Вершинин, А.П. О возможной причине систематических погрешностей определения испарения методом теплового баланса / А.П. Вершинин // Труды ГГИ. 1981. Вып. 269. С. 124-132.
- 23 Вершинин, А.П. Результаты опытов с теплоизолированными почвенными испарителями / А.П. Вершинин, В.В. Виноградов // Труды ГГИ. 1982. Вып. 284. С. 92-108.
- 24 Вершинин, А.П. Систематические погрешности основных методов определения суммарного испарения / А.П. Вершинин, В.В. Виноградов, М.И. Новикова // Труды ГГИ. - 1980. - Вып. 268. - С. 106-115.
- 25 Вершинин, А.П. Влияние теплообмена с грунтом на показания водных испарителей / А.П. Вершинин, И.Л. Калюжный // Сб. работ по гидрологии. 1979. №15. С. 87-108.
- 26 Виноградов, В.В. О расхождениях между величинами испарения с почвы, определенными разними методами / В.В. Виноградов // Труды ГГИ. 1978. Вып. 251. С.133-144.
- 27 Виноградов, Ю.Б. Математическое моделирование в гидрологии: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. Образования / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова – М.: Издательский центр «Академия», 2010. - 304 с.
- 28 Вуглинский, В.С. О методике оценки испарения с поверхности водоема по данным континентального испарителя ГГИ-3000 / В.С. Вуглинский, В.К. Старовойтова, Е.Н. Черская // Труды ГГИ. - 1981. - Вып. 274. - С. 53-72.

- 29 Гарцман, Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска / Б.И. Гарцман – Владивосток: Дальнаука, 2008. - 222 с.
- 30 Гарцман, Б.И. Эффект бассейнового контррегулирования при формировании экстремальных паводков / Б.И. Гарцман // География и природные ресурсы. - 2007. - №1. - С. 14-21.
- 31 Гарцман, Б.И. Речные системы дальнего востока России: четверть века исследований / Б.И. Гарцман, В.В. Шамов, Т.С. Губарева, А.Г. Болдескул, А.Н. Бугаец, А.А. Галанин, М.С. Карасев, Н.К. Кожевникова, С.М. Краснопеев, В.В. Кулаков, К.Т. Ли, М.А. Макагонова, Л.И. Мезенцева, Т.С. Меновщикова, Т. Ониши, Н.Ю. Сидоренко, О.В. Соколов, Л.А. Степаненко, М.В. Степанова, С.М. Тащи, Н.Д. Тегай, А.С. Третьяков, Н.К. Чен, Е.А. Шекман – Владивосток: Наука, 2015. - 489 с.
- 32 Гарцман, И.Н. Условия формирования дождевого паводочного стока на малых реках юга Дальнего Востока / И.И. Гарцман // Сб. «Международный симпозиум по паводкам и их расчетам» - Л: Гидрометиздат, 1969. - С. 376-383.
- 33 Гарцман, И.Н. Характеристика выдающегося паводка 1968 г. в бассейне р. Супутинки / И.Н. Гарцман // Труды ДВНИГМИ. – 1968. – № 28. – С. 40-46.
- 34 Гарцман, И.Н. Соотношение между составляющими водного баланса речных водосборов Приморья / И.Н. Гарцман, Н.К. Перевозная, Г.Я. Рябчиков, Т.Н. Рябчикова // Труды ДВНИГМИ. – 1968. – № 28. – С. 3-14.
- 35 Геологическая карта СССР, масштаба 1 : 200000. М., 1960. Государственное научнотехническое из дательство литературы по геологии и охране недр.
- 36 Глубоков, В.Н. Условия формирования тало-дождевого стока на горных реках юга Дальнего Востока / В.Н. Глубоков, Э.А. Попова // Сборник

работ по гидрологии «Горно-таежные зоны Сибири и Дальнего Востока», кн. 6 – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. - С.35-45.

- 37 Голубев, В.С. Перспективы усовершенствования методов испарения и расчета испарения с водной поверхности и суши / В.С. Голубев, А.П. Вершинин, В.В. Виноградов // Труды ГГИ. - 1981. - Вып. 277. - С. 3-21.
- 38 Голубев, В.С. Теплоизолированный испаритель ГГИ-3000 ТМ и результаты его испытаний / В.С. Голубев, И.Л. Калюжный, Т.Г. Федорова // Труды ГГИ. - 1980. - Вып. 266. - С. 74-85.
- 39 Голубев, В.С. К оценке суммарного испарения в бассейне Волги по данным режимных наблюдений на сети водно- и почвенноиспарительных станций / В.С. Голубев, Н.А. Сперанская, К.В. Цыценко // Метеорология и гидрология. – 2002. - № 4. - С. 74-84.
- 40 Голубев, В.С. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов / В.С. Голубев, А. П. Урываев // Труды ГГИ. - 1983. - Вып. 289. - С. 69-76.
- 41 Голубев, В.С. Русловые потери воды на испаренье в низовьях Амударьи и их динамика / В.С. Голубев, К.В. Цыценко // Метеорология и гидрология. 1992. № 2. С. 66-72.
- 42 Горчаков, А.М. Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье / А.М. Горчаков – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. -182 с.
- 43 Горчаков, А.М. О распределении годовых и сезонных осадков в Приморье / А.М. Горчаков // Труды ДВНИГМИ. 1974. Вып. 43. С. 117-122.
- 44 Горчаков, А.М. Особенности внутригодового распределения стока рек Приморья / А.М. Горчаков // Труды ДВНИГМИ. - 1972. - Вып. 39. - С. 50-63.
- 45 Горчаков, А.М. Условия и характер промерзания и оттаивания грунтов на территории Приморской воднобалансовой станции / А.М. Горчаков // Труды ДВНИГМИ. - 1975. - Вып. 47. - С. 118-128.

- 46 Губарева, Т.С. Возможности оценивания бассейновой транспирации на основе измерения стволового сокодвижения: постановка задачи / Т.С. Губарева, С.Ю. Лупаков, Б.И. Гарцман, В.В. Шамов, А.В. Рубцов, Н.К. Кожевникова // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1, № 4. С. 504–532.
- 47 Добровольский, Г.В. География почв / Г.В. Добровольский, Н.С. Урусевская – Издательство: Наука, 2006. - 460 с.
- 48 Иванов, Г.И. Классификация почв равнин Приморья и Приамурья / Г.И. Иванов Владивосток: Дальнев. кн. изд-во, 1966. 47 с.
- 49 Иванов, Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока / Г.И. Иванов
 М.: Наука, 1976. 200 с.
- 50 Иванов, Г.И. Почвы Приморского края / Г.И. Иванов Владивосток: Дальн. кн. изд-во, 1964. – 107 с.
- 51 Иванова, Э.А. Некоторые данные о характере испарения с водной поверхности в Приморье / Э.А. Иванова // Труды ДВНИГМИ. - 1976. -Вып. 58. - С. 91-94.
- 52 Качалова, Т.В. К расчету испарения с озер зоны многолетней мерзлоты Западно-Сибирской равнины / Т.В. Качалова // Труды ГГИ. - 1979. -Вып. 261. - С.50-60.
- 53 Клиге, Р. К. История гидросферы / Р. К. Клиге, И. Д. Данилов, В. Н. Конищев М.: Научный мир, 1998. 368 с.
- 54 Ковда, В.А. Очерки почв Приамурья / В.А. Ковда, Ю.А. Ливеровский, Сун Да Чен // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1957. № 1. С. 91–106.
- 55 Колесников, Б.П. Растительность. / Б.П. Колесников // Южная часть Дальнего Востока – М.: Наука, 1969. - С. 206-250.
- 56 Комаров, В.Л. Типы растительности Южно-Уссурийского края / В.Л. Комаров // Избр. соч., т. 9. М.-Л.: изд-во АН СССР, 1953. С. 545-745.
- 57 Константинов, А.Р. Испарение в природе / А.Р. Константинов Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 532 с.

- 58 Константинов, А.Р. Изменение суммарного испарения и транспирации сельскохозяйственных культур с помощью испарителей / А.Р. Константинов, Л.Р. Струзер // Труды ГГИ. - 1954. - Вып. 45 (99). - С. 66-94.
- 59 Константинов, А.Р. Влияние различных факторов на показания водных испарителей, установленных на суше / А.Р. Константинов, Т.Г. Федорова, В.С. Голубев // Труды ГГИ. - 1960. - Вып. 76. - С. 67-111.
- 60 Короткий, А.М. Климатические смены на территории юга Дальнего Востока в позднем плейстоцене–голоцене / А.М. Короткий, Т.А. Гребенникова, В.С. Пушкарь и др. // Вестн. ДВО РАН. 1997. № 3. С. 121–143.
- 61 Короткий, А.М. Четвертичные отложения Приморья. Стратиграфия и палеогеография / А.М. Короткий, Л.П. Караулова, Т.С. Троицкая – Новосибирск: СО Наука, 1980. - 234 с.
- 62 Космакова, В.Ф. Испарение с водной поверхности Красноярского водохранилища / В.Ф. Космакова, Т.А. Василенок, В.А. Жоров // Труды ЗапСибНИГМИ. - 1989. - Вып. 88. - С. 91-97.
- 63 Кочиашвилли, Б.М. Испарение с водной поверхности Самгорского водохранилища / Б.М. Кочиашвилли // Труды ЗакНИГМИ. - 1990. -Вып.87 (94). - С. 107-113.
- 64 Кудинов, А.И. Широколиственно-кедровые леса Южного Приморья и их динамика / А.И. Кудинов Владивосток: Дальнаука, 2004. 369 с.
- 65 Кузнецов, В.И. Исследование влияния тепловой изоляции на показания водных испарителей / В.И. Кузнецов //Труды ГГИ. 1954. Вып. 45 (99).
 С. 173-181.
- 66 Кузнецов, В.И. Методика расчета испарения с бассейнов площадью 20 м² по наблюдениям в испарителях ГГИ-3000 / В.И. Кузнецов // Труды ГГИ. 1970. Вып. 181. С. 3-32.

- 67 Кузнецов, В.И. О переходных коэффициентах наземных испарителей ГГИ-3000 / В.И. Кузнецов // Труды ГГИ. - 1954. - Вып. 45 (99). - С. 142-156.
- 68 Кузьмин, П.П. Внутригодовое распределение суммарного испарения с поверхности суши на территории СССР / П.П. Кузьмин, Л.И. Зубенок, А.Р. Константинов, Н.И. Астахова, В.В. Виноградов // Труды ГГИ. -1968. - Вып. 151. - С. 5–11.
- 69 Кузьмин, П.П. Определение сезонных и месячных норм испарения с сельскохозяйственных полей по данным наблюдений сетевых станций / П.П. Кузьмин, С.Ф. Федоров, Б.А. Помыткин // Труды ГГИ. - 1968. -Вып.151. - С. 12-29.
- 70 Лобанов, В.В. Испарение с поверхности Каспийского моря / В.В. Лобанов // Метеорология и гидрология. 1987. №10. С. 62-68.
- 71 Лупаков, С.Ю. Использование концептуальной модели речного стока HBV для анализа паводков на малых водосборах / С.Ю. Лупаков, А.Н. Бугаец // Метеорология и гидрология. - 2022. - № 1. - С. 84–94.
- 72 Лупаков, С.Ю. Сопоставление компонентов стока, водного баланса и параметров концептуальных моделей HBV и GR4J на примере рек бассейна верхней Уссури (юг Приморского края) / С.Ю. Лупаков, А.Н. Бугаец, Л.В. Гончуков, О.В. Соколов, Н.Д. Бугаец // Водные ресурсы. -2023. - Т. 50. - № 6. - С. 664-673.
- 73 Лупаков, С.Ю. Влияние временной агрегации данных наблюдений на результаты калибровки параметров и эффективность моделирования стока на примере малых водосборов (юг Приморского края, Россия) / С.Ю. Лупаков, А.Н. Бугаец, Л.В. Гончуков, В.В. Шамов, О.В. Соколов // Водные ресурсы. - 2024. - Т. 51. - № 3. - С. 262-271.
- 74 Лупаков, С.Ю. Оценка параметров гидрологической модели HBV по данным полевых наблюдений на экспериментальных водосборах (юг Приморского края) / С.Ю. Лупаков, А.Н. Бугаец, В.В. Шамов // География и природные ресурсы. - 2022. - Т. 43. - № 3. - С. 158-166.

- 75 Лупаков, С.Ю. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов / С.Ю. Лупаков, А.Н. Бугаец, В.В. Шамов // Водные ресурсы. - 2021. - Т. 48. - № 4. - С. 417-426.
- 76 Лупаков, С.Ю. Возможности использования данных о стволовом сокодвижении в гидрологическом моделировании / С.Ю. Лупаков, Т.С. Губарева, В.В. Шамов, А.В. Рубцов, Б.И. Гарцман, А.Н. Бугаец, А.М. Омелько //Тихоокеанская география. - 2021. - № 2. - С. 54-642.
- 77 Лыло, В.М. Прогноз хода стока половодья при снего-дождевом питании горных рек Дальнего Востока / В.М. Лыло, Э.А. Попова // Труды ДВНИГМИ. - 1971. - Вып. 35. - С. 32-46.
- 78 Львович, М.И. Вода и жизнь: Вод. ресурсы, их преобразование и охрана
 / М. И. Львович Москва: Мысль, 1986. 253 с.
- 79 Материалы наблюдений Приморской воднобалансовой станции М.: Гидрометиздат, 1973-1993.
- 80 Межонная, И.В. Опыт применения метода теплового баланса для расчета испарения с поверхности оз. Ханка / И.В. Межонная // Труды ДВНИГМИ. - 1988. - Вып.135. - С. 44-47.
- 81 Мезенцев, В.С. Еще раз о суммарном испарении / В.С. Мезенцев // Метеорология и гидрология. - 1955. - № 5. - С. 18-20.
- 82 Мезенцев, В.С. Метод гидролого-климатических расчетов и опыт его применения для районирования Западно-Сибирской равнины по признакам увлажнения и теплообеспеченности / В.С. Мезенцев // Труды Омск. с.-х. ин-та. - 1957. - Т. 27. - 121 с.
- 83 Мотовилов, Ю.Г. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов / Ю.Г. Мотовилов, А.Н. Гельфан – М.: Изд-во РАН, 2018. - 300 с.
- 84 Мотовилов, Ю.Г. Приближенная формула для расчета дефицита влажности воздуха при оценках испарения в моделях формирования

стока на реках России / Ю.Г. Мотовилов, В.М. Морейдо, Т.Д. Миллионщикова // Водные ресурсы. - 2022. - Т. 49. - № 6. - С. 753-765.

- 85 Назари, М. Оценка методов расчета месячных значений потенциального испарения в аридном климате / М. Назари, М.Р. Чаичи, Х. Камель, М. Грисмер, С.М.М. Садеги // Аридные экосистемы. - 2020. - Т. 26. - № 4. -С. 84–92.
- 86 Назаркина, А.В. Литологические особенности и гидрофизические свойства почв долин рек Сихотэ-Алиня / А.В Назаркина – Владивосток: Дальнаука, 2008. - 142 с.
- 87 Ознобихин, В.И. Характеристика основных свойств почв Приморья и пути их рационального использования / В.И. Ознобихин, Э.П. Синельников – Уссурийск: ПСХИ, 1985. - 72 с.
- 88 Пенман, Х.Л. Растение и влага [пер. с англ.] / Х.Л. Пенман Л.: Гидрометеоиздат, 1968. - 161 с.
- 89 Петропавловский, Б.С. Леса Приморского края: (экологогеографический анализ) / Б.С. Петропавловский – Владивосток: Дальнаука, 2004. - 317 с.
- 90 Плиткин, Г.А. Сравнительный анализ различных методов расчета испарения в естественных и измененных климатических условиях и их применение для оценки преобразований речного стока / Г.А. Плиткин // Труды ДВНИГМИ. - 1988. - Вып. - 135. - С. 129-147.
- 91 Попова, Н.Ю. Сравнительный анализ методов оценки испарения с речных бассейнов юга Дальнего Востока / Н.Ю. Попова, Б.И. Гарцман // Труды ДВНИГМИ. - 2012. - № 1. - С. 246–262.
- 92 Правила использования водных ресурсов Раковского водохранилища (утв. Приказом Федерального агентства водных ресурсов № 138, от 03.06.2024г) [Электронный ресурс]. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409231118/ (дата обращения 28.03.2025).

- 93 Пшеничников, Б.Ф. Подзолистые иллювиально-гумусовые почвы Приморья / Б.Ф. Пшеничников // Почвоведение. - 1976. - № 11. - С. 14 -23.
- 94 Пшеничникова, Н. Ф. Почвы усыхающих пихтово-еловых лесов среднего Сихотэ-Алиня / Н.Ф. Пшеничникова – Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. - 132 с.
- 95 Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши / Под ред. Кузьмина П.П., Алпатьева С.М. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. - 95 с.
- 96 Романов, В.В. Испарение с болот Европейской территории СССР / В.В. Романов – Л.: Гидрометиздат, 1962. - 228 с.
- 97 Руководство по производству наблюдений над испарением с почвы и снежного покрова. Часть 1 – Л.: Государственный гидрологический институт, 1963. - 155 с.
- 98 Рябчиков, Г.Я. Состояние воднобалансовых исследований в Приморье / Г.Я. Рябчиков // Труды ДВНИГМИ. 1976.- Вып. 58. С. 86-90.
- 99 Сидоренко, Н.Ю. Оценка влияния различных методов расчета потенциального испарения на результаты гидрологического моделирования / Н.Ю. Сидоренко, А.Н. Бугаец, С.Ю. Лупаков, Б.И. Гарцман, Л.В. Гончуков // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 4. С. 430-444.
- 100 Симонов, Ю.А. Прогнозирование стока рек России: научнометодические основы и практическая реализация: дисс. на соиск. ученой степ. докт. геогр. наук / Симонов Юрий Андреевич – М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", 2023. - 237 с.
- 101 Симонов Ю.А. Краткосрочное прогнозирование стока рек России с использованием модели HBV-96 и системы COSMO-RU / Ю.А. Симонов, С.В. Борщ, Н.К. Семенова, А.В. Христофоров // Метеорология и гидрология. - 2023. - № 12. -С. 37-46.

- 102 Симонов, Ю.А. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV / Ю.А. Симонов, Н.К. Семенова, А.В. Христофоров // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 55–65.
- 103 Синельников, Э.П. Агрогенезис почв Приморья / Э.П. Синельников, Ю.И. Слабко М.: ГНУ ВНИИА, 2005. 280 с.
- 104 Соколовский, Д. Л. Обзор исследований по вопросам речного стока и методики его расчетов / Д. Л. Соколовский // Труды НИУ ГУ ГМС. - 1946. - сер. IV. - Вып. 39. - С. 8-24.
- 105 Соколовский, Д. Л. Речной сток/ Д. Л. Соколовский Л.: Гидрометеоиздат, 1968. - 539 с.
- 106 СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Изд. официальное. – М.: Госстрой России, 2004.- 73 с.
- 107 Сперанская, Н.А. Многолетние изменения основных составляющих водного режима озера Ханка / Н.А. Сперанская, Т.В. Фуксова // Метеорология и гидрология. - 2018. - № 8. - С. 53–64.
- 108 Струзер, Л.Р. О применении почвенных испарителей на сельскохозяйственных полях в зоне недостаточного увлажнения / Л.Р. Струзер // Труды ГГИ. - 1955. - Вып. 48(102). -С. 87-112.
- 109 Струзер, Л.Р. Оценка погрешности существующих методов определения испарения с почвы / Л.Р. Струзер // В кн.: Труды III Всесоюз. гидрол. съезда. - 1958. - Т.3. - С.110-118.
- 110 Субботин, А.С. Обзор лизиметров и основные требования к их конструкциям / А.С. Субботин // Труды ГГИ. 1964. Вып. 92. С. 3-48.
- 111Схема водоснабжения и водоотведения Уссурийского городского
округа Приморского края на 2019-2030 годы. Санкт-Петербург. 2020.[Электронный pecypc].URL: https://adm-ussuriisk.ru/voprosy_zhizneobespecheniya/skhema_vodosnabzheniya_ussuri

- Урываев, А.П. Об измерениях и расчетах суммарного испарения в условиях Приморья / А.П. Урываев // Труды ДВНИГМИ. 1973. Вып. 42. -С. 77-89.
- Урываев, П.А. Испарение с почвы на юге Дальнего Востока / П.А.
 Урываев // Труды ДВНИГМИ. -1961. Вып. 12, С. 58-69.
- 114 Урываев, П.А. О склоновом стоке дождевых вод в Приморском крае/ П.А. Урываев // Труды ДВНИГМИ. -1959а. -Вып. 8. - С. 64-73.
- 115 Урываев, П.А. Распределение схода снега на водосборах рек южной части Приморского края / П.А. Урываев // Труды ДВНИГМИ. -19596. - Вып. 8. - С. 73-85.
- Урываев, П.А. Снегозапасы на водосборах некоторых горных рек Дальнего Востока / П.А. Урываев // Труды ДВНИГМИ. - 1964. - Вып. 18.
 - С. 3-29.
- 117 Федюшин, И.А. Анализ условий и факторов, определяющих величину испарения с поверхности оз. Балхаш / И.А. Федюшин // Труды КазНИИ. - 1985. - Вып. 91. - С. 94-98.
- 118 Химин, Н.М. Расчет тепловой изоляции водных испарителей /
 Н.М. Химин, И.Л. Калюжный // Метеорология и гидрология. 1977. №8. С. 101–104.
- 119 Чеботарев, А.И. Гидрологический словарь / А.И. Чеботарев –Л.: Гидрометиздат, 1978. - 308 с.
- 120 Чеботарев, А.И. Общая гидрология / А.И. Чеботарев Л.: Гидрометиздат., 1975. - 544 с.
- Шелест, Л.Г. Пойменные почвы юго-востока Приморского края / Л.Г. Шелест – Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2001. - 168 с.
- 122 Шерешевский, А.И. Испарение с водной поверхности каскада Днепровских водохранилищ / А.И. Шерешевский, И.Л. Ткаченко // Труды УкрНИИ. - 1987. - Вып. 220. - С. 80-87.
- 123 Allen, R. G. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration / R. G. Allen // Report

submitted to UN-FAO Water Resources Development and Management Service, Land and Water Dev. Div., Rome. - 1992. - 50 p.

- Allen R. G. Environmental requirements for lysimeters / R. G. Allen,
 W. O. Pruitt, M. E. Jensen // Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements. Proc. of the ASCE Int. Symp. on Lysimetry, Honolulu. - 1991. - pp. 170-181.
- Allen, R.G. Evaporation and Transpiration. Chapter 4 / R.G. Allen et al. N. Y.: ASCE Hand-book of Hydrology, 1996. pp. 125-252.
- 126 Allen, R.G. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements / R.G. Allen, L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith // FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome. - 1998. -328 p.
- 127 Allen, R.G. The ASCE standardized reference Evapotranspiration equation. / R.G. Allen et al. // ASCE-EWRI Task Committee Report, Reston, VA. - 2005.
- Andréassian, V. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models / V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel // Journal of Hydrology. - 2004. -Vol. 286.
 - P. 19-35.
- 129 Arheimer, B. Riverine Nitrogen analysis and modelling under Nordic conditions. Dissertation / B. Arheimer – Linköping: Tema, Linköpings universitet, 1999. - 64 p.
- Arheimer, B. Modelling the effects of wetlands on regional nitrogen transport / B. Arheimer, H. B. Wittgren // Ambio. 1994. Vol.23(6) P. 378-386.
- Assouline, S. On the variability of the Priestley-Taylor coefficient over water bodies / S. Assouline, D, Li, S, Tyler, J, Tanny, S, Cohen, E, Bou-Zeid, M. Parlange, G. G. Katul // Water Resour. Res. 2016. Vol.52. P. 150-163.
- Bae, D.-H. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4
 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea / D.-H. Bae, I.-W. Jung, D.P.
 Lettenmaier // Journal of Hydrology. 2011. Vol. 401. P. 90-105.

- Baumgartner, A. The world water balance: mean annual global, continental and maritime precipitation, evaporation and run-off / A. Baumgartner, E. Reichel, R. Lee Amsterdam: Elsevier, 1975. 179 p.
- 134 Bell, V.A. Estimating potential evaporation from vegetated surfaces for water management impact assessments using climate model output / V.A. Bell et al. // Journal of Hydrometeorology - 2011. - Vol. 12, - P. 1127-1136.
- 135 Bell, V.A. How might climate change affect river flows across the Thames Basin? An area-wide analysis using the UKCP09 regional climate model ensemble / V.A. Bell et al. // Journal of Hydrology. - 2012. - Vol. 442-443. - P. 89-104.
- Bergstrom, S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments / S. Bergstrom Sweden: Norrkoping, SMHI Rep. No. 7, 1976. 134 p.
- Bergström, B. River runoff to the Baltic Sea: 1950-1990 / B. Bergström, and B. Carlsson // Ambio. 1994. Vol. 23. P. 280-287.
- Brandt, M. Integration of field data into operational snowmelt-runoff models / M. Brandt, S. Bergström // Nordic Hydrol. 1994. -Vol. 25. P. 101-112.
- Bergström, S. The HBV model its structure and applications / S.
 Bergström // SMHI Reports RH, Norrköping. 1992. No. 4. 35 p.
- Bergström, S. Spillway design floods in Sweden. I: New guidelines / S.
 Bergström, J. Harlin, G. Lindström // Hydrological Sciences Journal. 1992.
 Vol. 37. No. 5. pp. 505-519.
- Betts, R.A. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide / R.A. Betts et al. // Nature. 2007. Vol. 448. P. 1037-1041.
- Beven, K. Rainfall-runoff modelling / K. Beven Chichester, United Kingdom: The Primer. Ltd. John Wiley & Sons, 2001. 356 p.

- 143 Bormann, H. Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations / H. Bormann // Climatic Change. - 2011. – Vol. 104. – P. 729–753.
- Bos, M.G. Water requirements for irrigation and the environment /
 M.G. Bos, R. A. L. Kselik, D. J. Molden Netherlands, Dordrecht: Springer, 2009. 174 p.
- Brandt, M. Integration of field data into operational snowmelt-runoff models / M. Brandt, S. Bergström // Nordic Hydrology. 1994. Vol. 25. Issue 1-2. P. 101-112.
- 146 Brutsaert, W. Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications / W. Brutsaert Dordrecht: Springer, 1982. 302 p.
- Bugaets, A. Comparing the runoff decompositions of small experimental catchments: end-member mixing analysis (EMMA) vs. hydrological modelling / A. Bugaets, B. Gartsman, T.Gubareva, S. Lupakov, A. Kalugin, V. Shamov, L. Gonchukov // Water. 2023. T. 15. № 4. C. 752.
- 148 Bugaets, A.N. Modeling the hydrological regime of small testbed catchments based on field observations: a case study of the Pravaya Sokolovka River, the Upper Ussuri River basin / A.N. Bugaets, B.I. Gartsman, L.V. Gonchukov, S.Y. Lupakov, V.V. Shamov, N.F. Pshenichnikova, A.A. Tereshkina // Water Res. - 2019. - V. 46 (S2). - P. S8–S16.
- Burnash, R.J.C. The NWS River forecast system catchment modeling.
 In: V.P. Singh, ed. Computer models of watershed hydrology / R.J.C. Burnash
 Highlands Ranch, CO: Water Resources Publications, 1995. P. 311–366.
- 150 Cermak, J. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands / J. Cermak, J. Kucera, N. Nadezhdina // Trees. - 2004. -Vol. 18. - P. 529–546.
- 151 Chiew, F. H. S. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia / F. H. S. Chiew, N. N.

Kamadalasa, H. M. Malano, T. A. McMahon // Agric. Water Management. -1995. - Vol. 28. - P. 9–21.

- 152 Chow V.T. Applied Hydrology. International Edition / V.T. Chow,
 D.R. Maidment, L.W. Mays N. Y., USA: McGraw-Hill Book Company,
 1988. 588 p.
- 153 Climate and hydrological cycle UK: IAHS Press. Special publication
 № 8, 2008. 344 p.
- 154 Crago, R. D. What is the Priestley–Taylor wet-surface evaporation parameter? Testing four hypotheses / R. D. Crago, J. Szilagyi, R. J. Qualls // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2023. Vol. 27. P. 3205–3220.
- 155 Davies J. A. Equilibrium, potential and actual evaporation rom cropped surfaces in southern Ontario / J. A. Davies, C. D. Allen // J. Appl. Meteorol. -1973. - Vol. 12. - P. 649-657.
- De Bruin, H. A. R. Priestley-taylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands / H. A. R. De Bruin, J. Q. Keijman // J. Appl. Meteorol. 1979. № 18. P. 898–903.
- Dong B. Decadal-scale changes in the seasonal surface water balance of the Central United States from 1984 to 2007 / B. Dong, J.D. Lenters, Q. Hu, C.J. Kucharik, T. Wang, M.E. Soylu, P.M. Mykleby // J. Hydrometeorol. 2020. V. 21. P. 1905-1927.
- 158 Donohue, R.J. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate / R.J. Donohue, T.R. McVicar, M.L. Roderick // Journal of Hydrology. - 2010. - Vol. 386. - P. 186-197.
- Doorenbos, J. Yield response to water / J. Doorenbos, A. H. Kassam. –
 Rome, Italy: Irrig. and Drain. Paper (FAO), N. 33, 1979. 193p.
- Droogers, P. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions / P. Droogers, R.G. Allen // Irrigation and Drainage Systems.
 2002. №16. P. 33-45.

- 161 Durre, I. Radiosonde-based trends in precipitable water over the Northern Hemisphere: an update / I. Durre et al. // Journal of Geophysical Research. - 2009. - V. 114 - P. 1-8.
- 162 Dyck, S. Overview on the present status of the concepts of water balance models / S. Dyck // IAHS Publ. 1985. V. 148. P. 3–19.
- Edijatno, L. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse / L. Edijatno - Université Louis Pasteur de Strasbourg, 1991. - 348 p.
- 164 Eichinger, W. E. On the concept of equilibrium evaporation and the value of the Priestley-Taylor coefficient / W. E. Eichinger, M. B. Parlange, H. Stricker // Water Resour. Res. - 1996. - V. 32. - P. 161-164.
- 165 Farmer, W. A Method for Calculating Reference Evapotranspiration on Daily Time Scales / W. Farmer, K. Strzepek, C.A. Schlosser // MIT Join Program on the Science and Policy of Global Change. Report No 195. -February, 2011. - 27 p.
- 166 Fisher Daniel K. Evaluation of alternative methods for estimating reference evapotranspiration / Daniel K. Fisher, H. C. Pringle III // Agricultural Sciences. - 2013. - Vol.4. - No.8A. - P. 51-60.
- 167 Fisher, J.B. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada Forest ecosystem / J.B. Fisher et al. // Environmental Modelling & Software.
 - 2005. -V. 20. - P. 783-796.
- 168 Fowler, A. Assessment of the validity of using mean potential evaporation in computations of the long-term soil water balance / A. Fowler // Journal of Hydrology. - 2002. - Vol. 256. - P. 248-263.
- 169 GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.) – Genève, Suisse: GIEC, 2007. -114 p.

- Graham, P. Modelling runoff to the Baltic basin / P. Graham // Ambio.
 1999. Vol. 28. P. 328-334.
- Guo, X. On the application of the Priestley–Taylor relation on sub-daily time scales, Bound. -Lay / X. Guo, H. Liuand, K. Yang // Meteorol. 2015. Vol. 156. P. 489–499.
- Hargraves, G.H. Reference crop evapotranspiration from temperature / G.H. Hargraves, Z.A. Samani // Appl. Eng. Agric. 1985. V. 1. P. 96–99.
- Hargreaves, George H. History and Evaluation of Hargreaves
 Evapotranspiration Equation / George H. Hargreaves, Richard G. Allen //
 Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2003, January/February. P. 53-63.
- Hersbach, H. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach, B. Bell, P. Berissford et al. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V.146 (730). P. 1999-2049.
- Jensen, M. E. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements /
 M. E. Jensen // Edited by R. G. Allen N.Y.: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices, No. 70, 1990. - 360 p.
- Jensen, M. Estimating evapotranspiration from solar radiation / M. Jensen, H.R. Haise // Journal of the Irrigation and Drainage Division.
 Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1963. V. 89. P. 16-41.
- Jensen, M.E. Evapotranspiration and irrigation water requirements /
 M.E. Jensen, R.D. Burman, R.G. Allen Reston, VA: American Society of
 Civil Engineers, 1990. 332 p.
- Jury, W. Advection Modification of the Priestley and Taylor Evapotranspiration Formula 1 / W. Jury, C. Tanner // Agron. J.- 1975. V. 67.
 P. 840-842.
- Jutman, T. Production of a new runoff map for Sweden / T. Jutman // Nordic Hydr. Conf. in Alta, 4-6 Aug. 1992. NHP report. - 1992. - No. 30. - P. 643-651.

- 180 Kannan, N. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000 / N. Kannan, S.M. White, F. Worrall, M.J. Whelan // Journal of Hydrology. - 2007. - Vol. 332. - Issues 3-4. - P. 456-466.
- Kay, A. L. A hydrological perspective on evaporation: historical trends and future projections in Britain / A. L. Kay, V. A. Bell, E. M. Blyth, S. M. Crooks, H. N. Davies, N. S. Reynard // Journal of Water and Climate Change.
 2013. № 04 (3). P. 193-208.
- 182 Kay, A.L. Calculating potential evaporation from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts / A.L. Kay, H.N. Davies // Journal of Hydrology. - 2008. - V. 358. - P. 221-239.
- 183 Kingston, D.G. Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change / D.G. Kingston et al. // Geophysical Research Letters. - 2009. - V. 36/ - L20403.
- 184 Kirchner, J.W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology / J.W. Kirchner // Water Resour. Res. 2006. Vol. 42. W03S04.
- 185 Kobayashi, S. The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics / S. Kobayashi, Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, K. Takahashi // J. Meteor. Soc. Japan. 2015. V.93. P. 5-48.
- 186 Lhomme, J.P. Towards a rational definition of potential evaporation /
 J.P. Lhomme // Hydrology and Earth System Sciences. 1997. № 1. P.
 257-264.
- 187 Lhomme, J.P. A theoretical basis for the Priestley-Taylor coefficient,
 Bound. -Lay / J.P. Lhomme // Meteorol. 1997b. V. 82. P. 179-191.
- 188 Lindström, G. Transit times of water in soil lysimeters from modelling of oxygen-18 / G. Lindström, A. Rodhe // Water, air and soil pollution. 1992.
 V.65. P. 83-100.

- 189 Lindström, G. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model / G. Lindström, B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, S. Bergström // Journal of Hydrology. -1997. V. 201. P. 272-288.
- 190 Lu, J. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States / J. Lu, G. Sun, S.G. McNulty, D.M. Amatya // J. Am. Water Resour. Assoc. - 2005. - V. 41. - P. 621-633.
- Maes, W. H. Potential evaporation at eddy-covariance sites across the globe / W. H. Maes, P. Gentine, N. E. C. Verhoest, D. G. Miralles // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2019. Vol. 23. P. 925-948.
- 192 McGuinness, J.L. A comparison of lysimeterderived potential evapotranspiration with computed values. Technical Bulletin 1452. / J.L. McGuinness, E.F. Bordne – Washington, DC: Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1972. - 77 p.
- 193 McKenney, M.S. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change / M.S. McKenney, N.J. Rosenberg // Agricultural and Forest Meteorology. - 1993. - V. 64. - P. 81-110.
- McNaughton, K. A Mixed-Layer Model for Regional Evaporation,
 Bound. -Lay / K. McNaughton, T. Spriggs // Meteorol. 1986. V. 34. P. 243-262.
- McVicar, T.R. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output / T.R. McVicar et al. // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. P. 1-6.
- Meissner, R. Measuring water and solute balance with new Lysimeter techniques. In: B. Singh (Ed.) Proceedings of the 3rd Australian and New Zealand Soils Conference, Sydney, Australia, 5–9 December 2004 / R. Meissner, M/ Seyfarth Australia: The Regional Institute Ltd, Gosford, 2004.
 P. 151-158.

- 197 Meshkat, M. Lysimeter design, construction, and instrumentation for assessing evaporation from a large undisturbed soil monolith / M. Meshkat, R.C. Warner, L.R. Walton // Appl. Eng. Agric. - 1999. - № 14. - P. 303-308.
- 198 Mintz, Y. Global fields of soil moisture and land surface evapotranspiration derived from observed precipitation and surface air temperature / Y. Mintz, G. Walker // J. Applied Meteorol. - 1993. - V. 32. - P. 1305-1334.
- 199 Monteith, J. L. Evaporation and Environment / J. L. Monteith // 19th Symposia of the Society for Experimental Biology – Cambridge: University Press, 1965. - Vol.19. - P.205-234.
- 200 Moriasi, D.N. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations / D.N. Moriasi, J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel, T.L. Veith // Trans. ASABE. - 2007. - V. 50. - № 3. - P. 885-900.
- 201 Morton, F.I. Evaporation research a critical review and its lessons for the environmental sciences / F.I. Morton // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. - 1994. -V. 24. - P. 237-280.
- 202 Nash, J.E. River flow forecasting through conceptual models: Pt I. A discussion of principles / J.E. Nash, J.V. Sutcliffe // J. Hydrol. 1970. V. 10.
 P. 282–295.
- 203 Oudin, L. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Pt 2. Towards a simple and efficient potential evapotranspiration sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for rainfall-runoff modeling / L. Oudin, F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andreassian, F. Anctil, C. Loumagne // J. Hydrol. - 2005b. - V. 303. - P. 290-306.
- 204 Oudin, L. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1-can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? / L.Oudin, C. Michel, F. Anctil // Journal of Hydrology. - 2005a. - V. 303. - P. 275-289.

- 205 Parmele, L.H. Errors in output of hydrologic models due to errors in input potential evapotranspiration / L.H. Parmele // Water Resources Research. - 1972. - V. 8. - P. 348-359.
- 206 Paturel, J.E., Servat, E., and Vassiliadis, A., 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data case of the GR2M model / J.E. Paturel, E. Servat, A. Vassiliadis // Journal of Hydrology.
 1995. V. 168. P. 111-125.
- 207 Payero, J. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters / J. Payero, S. Irmak // Irrigation. Science. 2008. №
 26. P. 191-202.
- Penman, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass
 / H.L. Penman // Proc. Soc., London (A). 1948. Vol. 193. P.120-145.
- 209 Penman, H.L. Vegetation and Hydrology / H.L. Penman Published by Commonwealth Agriculural Bureaux, 1963. - 161 p.
- 210 Priestley, C.H.B. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters / C.H.B. Priestley, R.J. Taylor // Monthly Weather Review. - 1972. - V. 100. - P. 81-92.
- Prudhomme, C. Derivation of RCM-driven potential evapotranspiration for hydrological climate change impact analysis in Great Britain: a comparison of methods and associated uncertainty in future projections / C. Prudhomme, J. Williamson // Hydrology and Earth System Sciences. 2013.
 V. 17. P. 1365-1377.
- 212 Pruitt, W. O. Experiences in lysimetry for ET and surface drag measurements / W. O. Pruitt, F. J. Lourence // Advances in Evapotranspiration, ASAE, St. Joseph, MI. - 1985. - P. 51-69.
- 213 Pruitt, W.O. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. In: Evaporation / W.O. Pruitt, D.E. Angus – UK: IAHS Press, 2007. - P. 16-19.

- 214 Rienecker, M.M. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications / M.M. Rienecker, M.J. Suarez, R. Gelaro et al. // J. Clim. - 2011. - V.24. - P. 3624-3648.
- Saha, S. The NCEP climate forecast system version 2 / S. Saha, S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y.-T. Hou, H.-Y. Chuang, M. Iredell // J. Clim. 2014. V.27. P. 2185-2208.
- 216 Seibert, J. Teaching hydrological modelling with a user-friendly catchment-runoff-model software package / J. Seibert, M. Vis // Hydrol. Earth Syst. Sci. - 2012. - Vol. 16. - P. 3315-3325.
- 217 Seiller, G. How do potential evapotranspiration formulas influence hydrological projections/ G. Seiller, F. Anctil // Hydrological Sciences Journal. - 2016. - V. 61:12. - P. 2249-2266.
- Sheffield, J. Little change in global drought over the past 60 years / J.
 Sheffield, E.F. Wood, M.L. Roderick // Nature. 2012. V. 491. P. 435-438.
- 219 Singh, V.P. Evaluation and generalization of 13 mass transfer equations for determining free water evaporation / V.P. Singh, C.-Y. Xu // Hydrological Processes. - 1997a. - V.11. - P. 311-323.
- 220 Singh, V.P. Sensitivity of mass transfer-based evaporation equations to errors in daily and monthly input data / V.P. Singh, C.-Y. Xu // Hydrological Processes. - 1997b. - V. 11. - P. 1465–1473/
- Singh, V.P. Hydrologic systems: watershed modeling volume 2 / V.P.
 Singh Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989. 344 p.
- 222 Sperna Weiland, F.C. Selecting the optimal method to calculate daily global reference potential evaporation from CFSR reanalysis data for application in a hydrological model study / F.C. Sperna Weiland et al. // Hydrology and Earth System Sciences. - 2012 - V. 16, - P. 983-1000.
- 223 Stewart, R. B. A simple method for determining the evaporation from shallow lakes and ponds / R. B. Stewart, W. R. Rouse // Water Resour. Res. -1976, - V. 12. - P. 623-628.

- Stewart, R. B. Substantiation of the Priesley and Taylor parameter a1,26 for potential evaporation in high latitudes / R. B. Stewart, W. R. Rouse
 // J. Appl. Meteorol. 1977. V. 6. P. 649-650.
- 225 Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate / C. W. Thornthwaite // Geograph. Rev. 1948. № 38. 55 p.
- Thorntwaite, C.W. The water balances / C.W. Thorntwaite, J. R. Mather
 // Drexel Institute of Technology. 1955. Vol. 8. № 1. 104 p.
- 227 Trenberth, K.E. Global warming and changes in drought / K.E. Trenberth et al. // Nature Climate Change. 2014. -V. 4. P. 17-22.
- 228 Turc, L. Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula / L. Turc // Annales Agronomiques. - 1961. - № 12. - P. 13-49.
- 229 Van Heerwaarden, C. C. Interactions between dry-air entrainment, surface evaporation and convective boundary-layer development / C. C. Van Heerwaarden, J. V. G. de Arellano, A. F. Moene, A. A. M. Holtslag // Q. J. Roy. Meteor. Soc. - 2009. - V. 135. - P. 1277-1291.
- Van Verseveld, W. J. Wflow_sbm v0.7.3, a spatially distributed hydrological model: from global data to local applications / W. J. Van Verseveld, A. H. Weerts, M. Visser, J. Buitink, R. O. Imhoff, H. Boisgontier, L. Bouaziz, D. Eilander, M. Hegnauer, C. ten Velden, B. Russell // Geosci. Model Dev. 2024. V. 17. P. 3199–3234.
- Veihmeyer, F. J. Soil Moisture in Relation to Plant Growth / F. J.
 Veihmeyer, H. Hendrickson // Annual Review of Plant Phy- siology. -1950. Vol. 1. 285.
- 232 Verstraeten, W.W. Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation. / W.W. Verstraeten, F. Veroustraete, J. Feyen // Sensors. 2008. - V. 8. - P. 70-117.
- Wild, M. Global dimming and brightening: A review / M. Wild //
 Journal of Geophysical Research. -2009. V. 114. P. 1-31.

- Xu, C.-Y. Evaluation and generalization of radiation- based methods for calculating evaporation / C.-Y. Xu, V.P. Singh // Hydrological Processes.
 2000. -V. 14. -P. 339-349.
- Xu, C.-Y. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation / C.-Y. Xu, V.P. Singh // Hydrological Processes.
 2001. V. 15. P. 305-319.
- 236 Xu, C.-Y. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland / C.-Y. Xu, V.P. Singh // Water Resources Management. - 2002. - V. 16. - P. 197-219.
- Xu, Z.X. Estimating basin evapotranspiration using distributed hydrologic model / Z.X. Xu, J.Y. Li // J. Hydrol. Engineering. 2003. V. 8.
 P. 74-80.
- Yang, Y. Radiation, surface temperature and evaporation over wet surfaces / Y. Yang, M. L. Roderick // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 2019. V. 145.
 P. 1118-1129.
- 239 Zhao, L. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models / L. Zhao, J. Xia, C. Xu, Z. Wang, L. Sobkowiak, C. Long // J. Geogr. Sci. - 2013. - V. 23. - P. 359-369.