

На правах рукописи

СИДОРЕНКО Нина Юрьевна

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

Специальность 1.6.21 - Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Владивосток – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт» («ДВНИГМИ»).

Научный руководитель:

Бугаец Андрей Николаевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования динамики геосистем Тихоокеанского института географии ДВО РАН (г. Владивосток)

Официальные оппоненты:

Ольчев Александр Валентинович

доктор биологических наук, профессор кафедры метеорологии и климатологии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (г. Москва)

Василевская Любовь Николаевна

кандидат географических наук, доцент Института Мирового океана Дальневосточного федерального университета (г. Владивосток)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (г. Иркутск)

Защита диссертации состоится 24 октября 2025 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 005.016.XX (24.1.500.01), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио 7, зал заседаний, 2-ой этаж; e-mail: geogr@tigdvo.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе Центральной научной библиотеки при Тихоокеанском институте географии ДВО РАН и на сайте <http://www.tigdvo.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,
кандидат биологических наук



Родникова Илона Мироновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 измерений с размерами практически интересующих объектов 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 PET 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 PET, 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 геосферных оболочек в глобальных циклах переноса воды»; 1.7. «Геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов»; 1.16. «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 классу физически-обоснованных методов определения потенциального 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 значимость проведенных исследований. Снижение 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 в ходе четырех научных конференций: 1) «Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке», Владивосток, 04-05.12.2008; 2) «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов», Барнаул, 24-28.08.2010; 3) «Третьи 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 периода 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 руководителю, всем соавторам, принявшим 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 коллективу Приморского УГМС, предоставившему данные гидрометеорологического мониторинга.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, приводится цель, перечислены задачи работы, положения, выносимые на защиту, и их научная новизна.

ГЛАВА 1. Современное состояние вопросов оценки суммарного испарения в задачах гидрологического моделирования

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 [Chow et al., 1988]. Первые два фактора зависят от климатических и ландшафтных условий, последний – от текущего гидрологического состояния водосбора.

В большинстве случаев испарение рассчитывается с однородной подстилающей поверхности – воды, обнаженной почвы или определенного типа растительности, текущее гидрологическое состояние водосбора обычно не учитывается. Более репрезентативные результаты о водном и энергетическом балансе водосбора для различных пространственно-временных масштабов могут быть получены с помощью данных гидрологических моделей [Xu, Li, 2023]. По сравнению с результатами обобщений на основе только 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.

Кроме этого, существующие несоответствия между неопределенностью во входных данных, параметрах и структуре гидрологических моделей могут быть не совместимы с уровнем детализации процесса испарения и не позволяют использовать все преимущества рекомендованного для расчета испарения [Allien et al., 1998] 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 меньшего количества входных данных. Однако применение альтернативных методов или уравнений для оценки РЕТ в районе исследования должно быть соответствующим образом обосновано [Мотовилов и др., 2018, 2022; Lu et al., 2005].

Для оценки эффективности методов определения испарения могут быть использованы данные бывших воднобалансовых станций (ВБС), которые располагались в репрезентативных по гидрологическим условиям районах и, следовательно, наилучшим образом подходят для адаптации моделей к условиям этих регионов. Материалы наблюдений ВБС содержат детальные данные метеорологических и гидрологических измерений, в том числе испарения. Наблюдения на таких станциях проводятся на малых экспериментальных водосборах, имеющих различные условия формирования стока. Эти водосборы соответствуют масштабу расчетных элементов полураспределенных гидрологических моделей и могут быть использованы в качестве базовых ландшафтных единиц для обобщения закономерностей пространственно-временной динамики компонентов водного баланса [Бугаец и др., 2018].

ГЛАВА 2. Объекты исследования

Объектами исследования являются 18 водосборов, площадью от 2,4 до 755 км², расположенных в пределах бывшей Приморской воднобалансовой

станции, функционировавшей с начала 1950-х по конец 1980-х гг. Территория относится к водосборам рек Комаровки и ее главному притоку – Раковке (общая площадь водосбора около $\sim 1450 \text{ км}^2$, (рисунок 1, таблица 1), которые берут свое начало на склонах хребта Пржевальского на юге Приморского края.

Рельеф юго-восточной части Приморской воднобалансовой станции, к которой относятся верховья рек Комаровки и Раковки, представляет собой, в основном, среднегорье, уклоны склонов умеренно и очень крутые ($15\text{--}35^\circ$), абсолютные высоты в среднем составляют $300\text{--}500 \text{ м}$, на приводораздельных участках достигают 700 м . Верховья Комаровки и частично Раковки покрыты хвойно-широколиственным лесом, в долинах распространены пойменные широколиственные леса, в нижних частях – редкие дубовые леса. В почвенном покрове преобладают горные бурые лесные почвы. Северо-западная часть ПВБС, к которой относится правобережье р. Раковки, характеризуется холмисто-увалистым рельефом. Абсолютные отметки высот составляют порядка $100\text{--}250 \text{ м}$, уклоны $<10^\circ$.

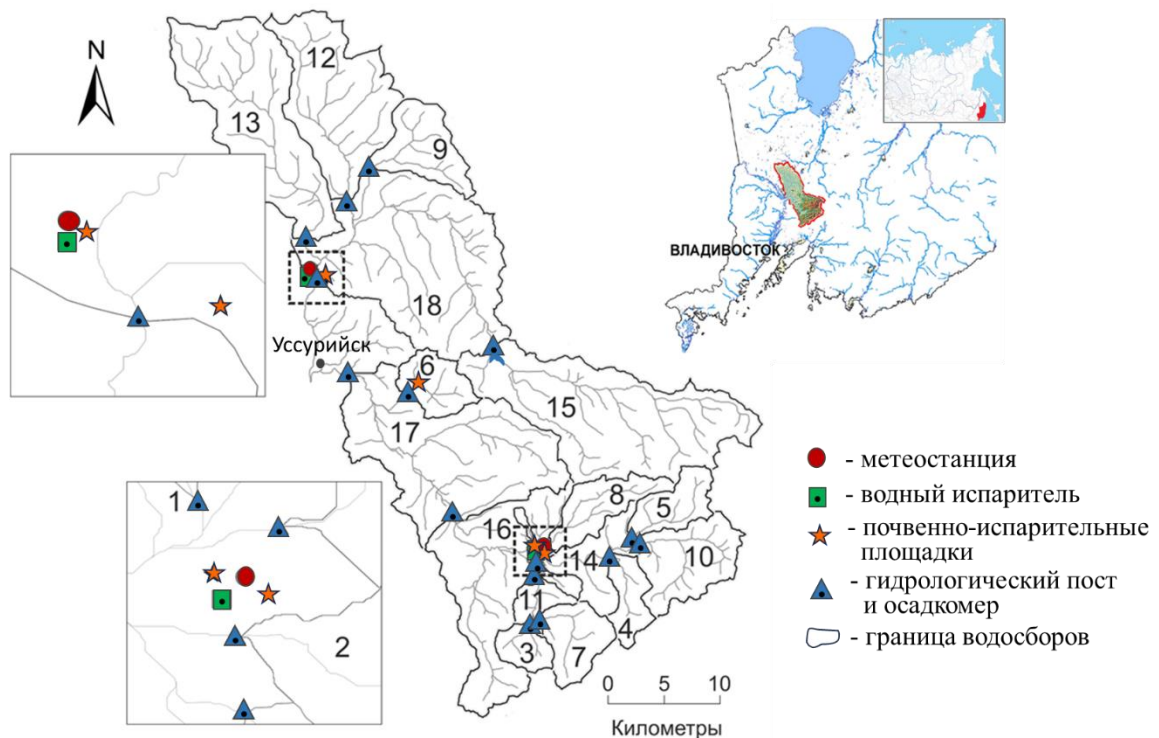


Рисунок 1. Картохема исследуемой территории; номера на карте соответствуют нумерации в таблице 1

Климат территории – муссонный, характеризующийся неустойчивой пространственно-временной динамикой увлажнения. Среднегодовая температура воздуха составляет $+3\text{...}+4^\circ\text{C}$, минимальные значения достигают -41°C (январь), максимальные – $+38^\circ\text{C}$ (июль-август). Сумма осадков за год, в среднем, составляет $650\text{--}800 \text{ мм}$. Зима обычно малоснежная. Половодье – невысокое. Большая часть осадков ($80\text{--}90\%$) выпадает в теплый период года. Вторая половина лета – начало осени характеризуются высокой вероятностью выхода к побережью юга Приморского края тайфунов, активность которых приводит к выпадению значительного объема дождей (до $100\text{--}200 \text{ мм}$ за

сутки). Слой суточного стока на реках исследуемой территории достигают 100 мм, модули стока - 1000 л/(с·км²).

Таблица 1. Основные сведения о водосборах

№ п/п	Река	Гидрологический 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

Наблюдения за испарением с водной поверхности на ПВБС проводились на метеостанциях Тимирязевский (31961) и Приморская (31962) в теплый (апрель–октябрь) период года в течение 1973–1993 гг. с помощью испарителей ГГИ-3000. 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. На почвенно-испарительных площадках ПВБС функционировали весовые испарители ГГИ-500-50, отдельный почвенный испарительный полигон был оборудован гидравлическими почвенными испарителями малой модели ГР-17. В бассейне р. Комаровка было расположено три почвенных испарительных площадки: в лесу на южном склоне долины Комаровки (для измерения испарения под пологом леса), на поляне правой пойменной террасы Комаровки, и в логе Луговой. В бассейне Раковки почвенный испарительный полигон был разбит на несколько участков, оборудованных гидравлическими почвенными испарителями ГР-17 и весовыми почвенными испарителями.

ГЛАВА 3. Методы исследования

В качестве методической основы гидрологического моделирования использована широко известная модель HBV [Bergstrom, 1976]. Основное уравнение водного баланса водосбора в модели HBV представлено в виде:

$$P - AET - Q = SP + SM + UZ + LZ, \quad (1)$$

где P – осадки, мм; AET – актуальное испарение, мм; Q – речной сток, мм; SP – влагозапас снежного покрова, мм; SM – влагозапас концептуальной

почвенной емкости, мм; UZ и LZ – влагозапасы верхней и нижней стокоформирующих емкостей соответственно, мм. Атмосферные осадки, температура воздуха и потенциальное испарение являются входными данными в модель.

На первом этапе расчетов (рисунок 2) 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 так называемого метода градусо-дней, для чего используется параметр стаивания $CFMAX$ (мм/(C°·сут)):

$$M = CFMAX(T(t) - TT). \quad (2)$$

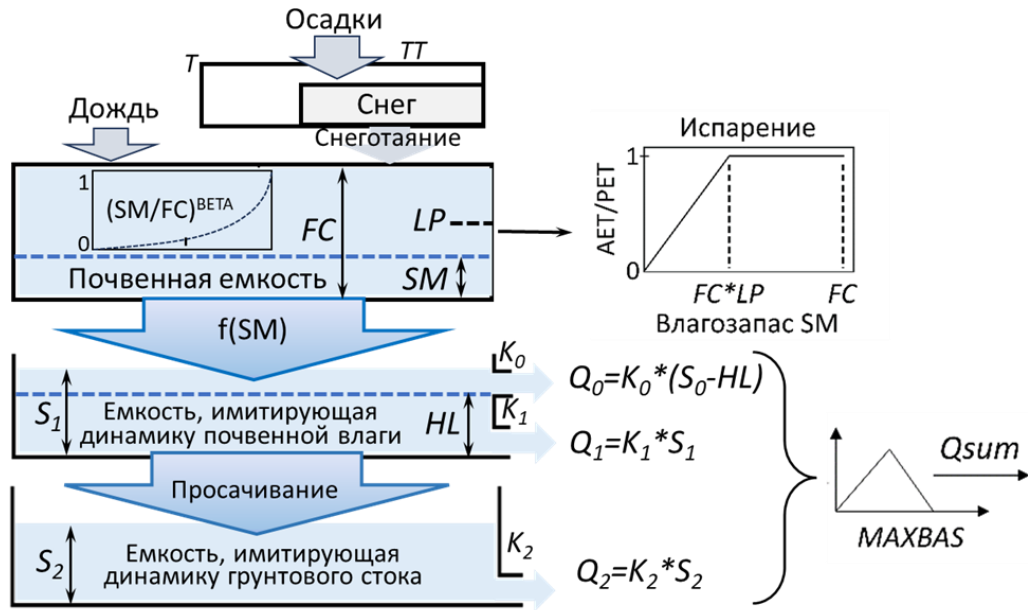


Рисунок 2. Блок-схема модели HBV

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

В работе использована версия модели HBV с двумя стокоформирующими емкостями $S1$ (верхняя, мм) и $S2$ (нижняя, мм), имитирующие динамику почвенной влаги и грунтового стока.

Стаявший снег и осадки в жидком виде пополняют емкость $S1$. 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 текущего влагозапаса SM , по достижении которого значение актуального модельного испарения AET приравнивается к потенциальному испарению PET :

$$AET = \begin{cases} PET \cdot \min \left\{ \left(\frac{SM(t)}{FC \cdot LP} \right), 1 \right\}, & \text{при } \frac{SM}{FC} < LP \\ PET, & \text{при } \frac{SM}{FC} \geq LP \end{cases}. \quad (3)$$

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

$$PET(t) = (1 + Cet(T - T_m)) \cdot PET_m, \quad (3)$$

где T_m – среднемесячное значение температуры воздуха, $^{\circ}C$; PET_m – среднемноголетнее значение потенциального испарения на конкретные сутки, мм. В модели заданы ограничения интервала значений корректировки PET : $0 \leq PET(t) \leq 2 \cdot PET_m$.

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

$$Qn(t) = Kn \cdot S(t), \quad (4)$$

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

Формирование Q_0 возможно только при достижении влагозапаса в верхней емкости $S1$ порогового значения HL (мм). Динамика пополнения стокоформирующей емкости S_1 (recharge, мм/сут) зависит от отношения ее текущего и максимального влагозапаса SM/FC , количества влаги на верхней границе водосбора (P , мм) и параметра $BETA$:

$$\frac{recharge}{P(t)} = \left[\frac{SM(t)}{FC} \right]^{BETA}. \quad (5)$$

Динамика нижней емкости S_2 определяется балансом между максимальной скоростью просачивания $PERC$ (мм/сут) из емкости S_1 и оттоком Q_2 . Сумма всех компонентов стока (Q_0 , Q_1 и Q_2) на каждый расчетный шаг трансформируется до замыкающего створа с помощью треугольной трансформационной функции с основанием $MAXBAS$ (сут) [Seibert, Vis, 2012].

В работе использованы четыре метода расчета PET : 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-Тейлора относят к классу физически-обоснованных методов определения PET , Одина и Харгривза.

Комплексная схема Пенмана-Монтейса (PM) описывается уравнением:

$$PET = \frac{\Delta \cdot (R_{net} - G) + p_{air} \cdot c_p \cdot [e_s - e_a] / r_a}{\lambda_p \left(\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \right)}, \quad (6)$$

где PET – потенциальное испарение, мм/сут; λ – скрытая теплота парообразования, (МДж/(м²·сут)); Δ – изменение кривой упругости насыщения

пара, кПа/°C; 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·°C); e_s – упругость насыщения водяного пара, кПа; e_a – фактическая упругость водяного пара, кПа; ρ – плотность воды кг/м³; γ – психрометрическая константа, кПа/°C; r_c – совокупное сопротивление поверхности, с/м, r_a – аэродинамическое сопротивление, с/м.

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

В гумидных климатических условиях в качестве альтернативы методу Пенмана-Монтейса может использоваться метод Пристли-Тэйлора, который, по сути, является упрощением формулы (6), из которой исключен компонент аэродинамического сопротивления:

$$PET = \frac{\alpha_{PET} \Delta (R_{net} - G)}{\lambda \rho (\Delta + \gamma)}, \quad (7)$$

где α_{PET} – эмпирический коэффициент.

Значения коэффициента α_{PET} могут принимать значения в интервале 1–2, в настоящем исследовании в соответствии с [Priestley, Taylor, 1972] принят $\alpha_{PET} = 1.26$.

Формула Харгривза имеет вид:

$$PET = 0.0023 \cdot \frac{R_0}{\lambda \rho} \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot (T_{avg} + 17.8), \quad (8)$$

где T_{max} , T_{min} и T_{avg} – максимальная, минимальная и средняя температура воздуха соответственно, °C; R_0 – величина солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы, являющаяся функцией широты и времени, МДж/(м²·сут).

В отличие от основной формулы метода Харгривза, формула Одина основана на использовании только среднесуточной температуры воздуха T_{avg} :

$$PET = \begin{cases} \frac{0.408 \cdot R_0 \cdot (T_{avg} + 5)}{100}, & \text{если } T_{avg} + 5 > 0 \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

В качестве дополнительного, для сравнения с данными измерений и полученными расчетными величинами потенциального испарения, использован комплексный метод Будыко, позволяющий определить среднее месячное испарение с естественно увлажненных территорий по средним месячным значениям количества осадков, стока, температуры и характеристики влажности воздуха. Расчеты испарения производятся по формулам [Рекомендации..., 1976]:

$$E = \begin{cases} E_0 \frac{W_1 + W_2}{2W_0}, & \text{при } \frac{W_1 + W_2}{2} < W_0 \\ E_0, & \text{при } \frac{W_1 + W_2}{2} \geq W_0 \end{cases} \quad (10)$$

где E и E_0 — месячные суммы испарения и испаряемости, мм; W_1 , W_2 — продуктивные запасы влаги в метровом слое почвы в начале и конце месяца, мм; W_0 — критические продуктивные запасы влаги в метровом слое почвы, выше которых испарение E равно испаряемости E_0 , мм.

Метод Будыко, является физически обоснованным методом - в нём учитываются основные определяющие испарение факторы: радиационный баланс, температура и влажность воздуха [Будыко, 1948, 1952].

ГЛАВА 4. Результаты моделирования динамики компонентов водного баланса

Для оценки фактического испарения на исследуемой территории были проведены сравнение и анализ месячных значений испарения за 1973 – 1987 годы, полученных с помощью гидравлических ГР-17, почвенных весовых ГГИ-500-50 и водных испарителей ГГИ-3000 (рисунок 3).

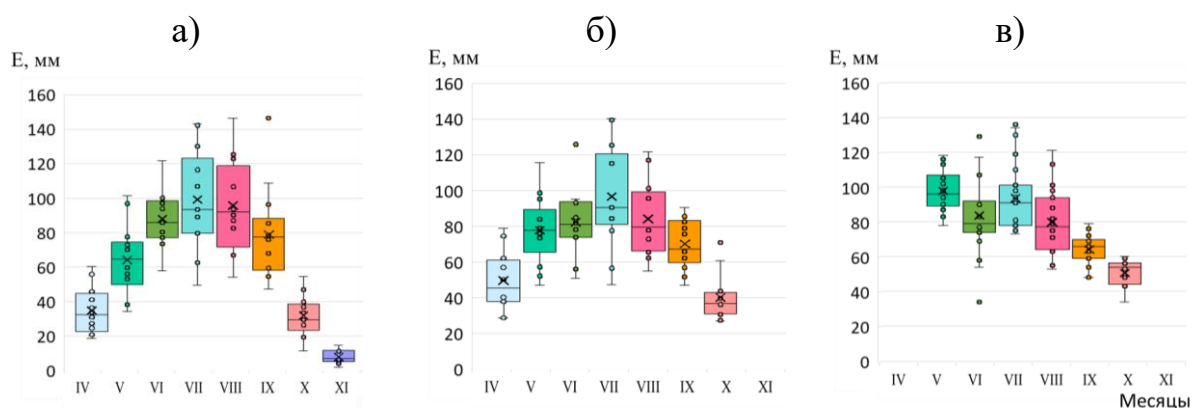


Рисунок 3. Результаты обобщения месячных значений испарения, полученных по гидравлическим (а), почвенным весовым (б) и водным (в) испарителям, расположенным в бассейне реки Раковка (цветовые градации приведены по месяцам)

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).

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 условиях даже незначительных по площади водосборов в настоящее время не представляется возможным. Это является основной причиной того, что применение испарителей нельзя считать универсальным методом для измерения испарения с поверхности суши в масштабе водосбора и

климатологических обобщений. В связи с этим в настоящее время научным сообществом большое внимание уделяется гидрологическому моделированию и расчетным методам определения испарения.

В ходе исследования были получены массивы суточных значений испарения, рассчитанные с помощью методов Пенмана-Монтейса (РМ), Пристли-Тейлора (РТ), Одина (ОД) и Харгривза (НГ) 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-Тейлора, 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.

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

В соответствии с [Moriasi et al., 2007], результаты моделирования стока являются «неудовлетворительными» при $NSE \leq 0.5$, «удовлетворительными» при $0.5 < NSE \leq 0.65$, «хорошими» при $0.65 < NSE \leq 0.75$, «очень хорошими» при $NSE > 0.75$; по критерию BIAS результаты «неудовлетворительны» при $BIAS \geq \pm 25\%$, «удовлетворительны» при $\pm 15\% \leq BIAS < \pm 25\%$, «хорошие» при $\pm 10\% \leq BIAS < \pm 15\%$, «очень хорошие» при $BIAS < \pm 10\%$. Отрицательное значение BIAS говорит о том, что прогноз или расчет был завышен, и, наоборот, положительное значение - о том, что прогноз или расчет был занижен. Значение коэффициента детерминации R^2 должно находиться в диапазоне от нуля до единицы: $0 \leq R^2 \leq 1$. Чем выше значение коэффициента детерминации, тем более качественной считается модель.

В холодный период года с ноября по февраль максимальные значения суточного потенциального испарения (PET) по всем методам составляют в основном ≤ 1.5 мм (рисунок 4). В весенние месяцы при устойчивом переходе температуры воздуха через 0°C величины испарения увеличиваются до 3–4 мм. В теплый период года со второй половины мая по середину сентября результаты расчетов суточных значений потенциального испарения по методам Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора достигают 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.

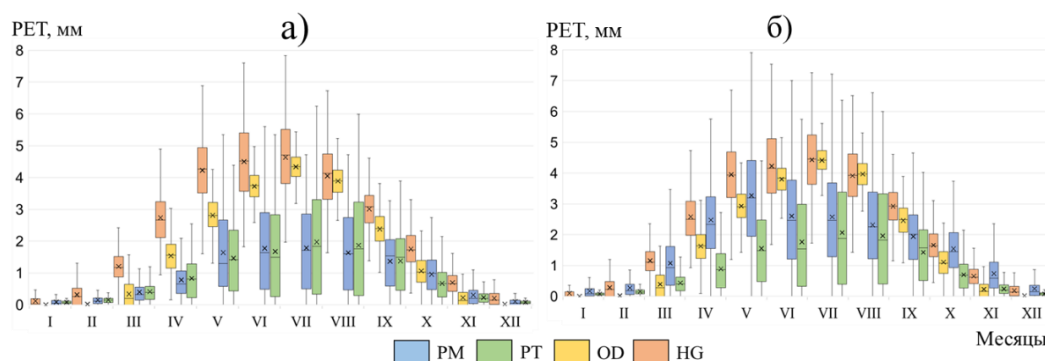


Рисунок 4. Результаты обобщения суточных значений испарения, вычисленных с помощью различных методов за период моделирования по данным метеостанций Приморская (а) и Тимирязевский (б)

Для сравнения и анализа полученных величин потенциального испарения был произведен расчет испарения по данным метеостанций Тимирязевский и Приморская комплексным методом Будыко (рисунок 5). Согласно Рекомендациям по расчету испарения с поверхности суши [Рекомендации..., 1976] ошибки вычисления месячных сумм испарения комплексным методом Будыко составляют 20-30 %, более точными считаются два метода: метод теплового баланса с ошибкой вычисления 15% (использование данного метода ограничивается наличием данных тепловых балансовых наблюдений) и метод испарителей с ошибкой 10-20%.

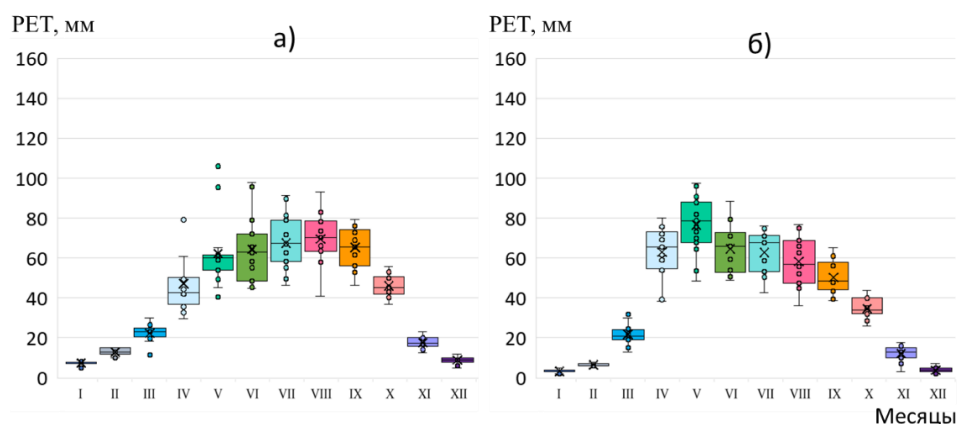


Рисунок 5. Годовой ход потенциального испарения, вычисленного с помощью метода Будыко по данным метеостанций Тимирязевский (а) и Приморская (б) (цветовые градации приведены по месяцам)

Ряды потенциального испарения (РЕТ), полученные с помощью всех четырех расчетных методов, были агрегированы в месячные значения и выполнено сравнение (таблица 2) с результатами расчетов по методу Будыко и с данными измерений, полученных с помощью испарителей с водной поверхности.

При сравнении пар R^2 и NSE (таблица 2) 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 ту же 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 периода года. Согласно критерию *BIAS* эмпирические методы завышают испарения относительно метода Будыко, при этом среднесуточные значения потенциального испарения по методу Харгривза имеют значительное положительное смещение (65 и 86%).

Таблица 2. Значения критериев соответствия расчетных величин потенциального испарения, полученных методами Пенмана-Монтейса (PM), Пристли-Тейлора (PT), Одина (OD) и Харгривза (HG) с результатами расчетов по методу Будыко и данными водных испарителей ПВБС

Метод расчета PET	Метод Будыко, данные по метеостанции	R^2	NSE	$BIAS$, %	Местоположение водного испарителя, водосбор	R^2	NSE	$BIAS$, %
PM	Тимирязевский	0.64	0.29	-22	Комаровка	0.65	-1.11	28
	Приморская	0.64	0.54	28	Раковка	0.75	0.66	7
PT	Тимирязевский	0.68	0.45	27	Комаровка	0.66	-1.34	29
	Приморская	0.61	0.45	24	Раковка	0.49	-0.57	38
OD	Тимирязевский	0.74	-0.62	-32	Комаровка	0.31	-7.16	-43
	Приморская	0.69	-0.48	-37	Раковка	0.36	-0.82	-22
HG	Тимирязевский	0.76	-1.26	-65	Комаровка	0.57	-13.60	-74
	Приморская	0.81	-1.57	-86	Раковка	0.61	-1.25	-37

При сравнении значений PET с данными наблюдений по водным испарителям более высокие значения R^2 получены для методов Пенмана-Монтейса, Пристли-Тейлора и Харгривза. По критерию NSE удовлетворительные результаты получены только для метода Пенмана-Монтейса при сравнении с данными испарителя, расположенного в нижней, равнинной части водосбора – р. Раковка. 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.

Модель HBV использована для расчетов речного стока на 18 гидрологических постах в пределах водосборов рек Комаровки и Раковки за период 1964–1987 гг. Гидрологические 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:

- Комаровка-Центральный – Каменский, Егерский, 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 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 (таблица 3, рисунок 6). С увеличением площади водосбора (водосборы в нумерации расположены по увеличению их площади) наблюдается увеличение разброса значений параметра максимального влагозапаса FC .

Таблица 3. Значения параметров блока расчета испарения модели HBV, полученных с применением различных методов расчета потенциального испарения: РМ – Пенмана–Монтейса, РТ – Пристли–Тэйлора, ОД – Одина, НГ – Харгривза

№ п/п	Пост	Параметры											
		РМ			РТ			ОД			НГ		
		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 FC и большее количество воды поступает в емкость стокоформирования S_1 . 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).

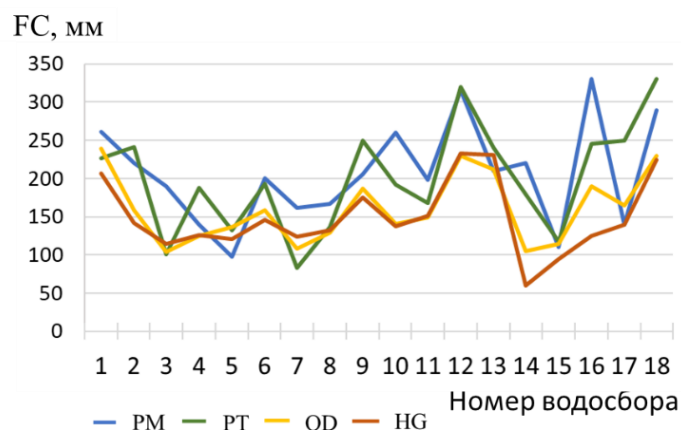


Рисунок 6. Значения максимальной влагоемкости FC для различных водосборов (номера водосборов приведены в соответствии с таблицей 3)

Так как методы Одина и Харгривза завышают значения потенциального испарения относительно Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора, то в модели использование эмпирических методов приводит к необходимости компенсации объема действительного испарения за счет снижения объема максимального влагосодержания водосбора (FC) и снижения с помощью параметров Cet и LP роли потенциального испарения при извлечении влаги из почвы, стабилизации значений этих параметров вокруг границ интервалов области их определения (таблица 3), а также появлению достаточно сильной корреляции ($R^2 > 0.9$) между средними за теплый период года значениями текущего влагозапаса SM и модельного испарения АЕТ (рисунок 7).

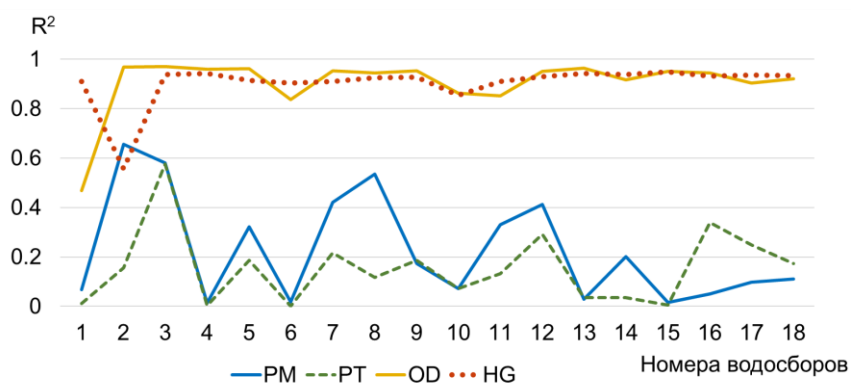


Рисунок 7. Связь среднееголетних значений текущего влагозапаса SM и модельного актуального испарения АЕТ за летний период (июнь–сентябрь) при использовании различных методов расчета потенциального испарения (номера водосборов соответствуют нумерации в таблице 3)

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 актуального испарения АЕТ практически отсутствует за счет более детального учета текущих метеорологических условий на верхней границе водосбора.

Результаты моделирования стока с применением всех методов расчета потенциального испарения по критерию NSE (таблица 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.

Таблица 4. Оценки эффективности гидрологического моделирования стока, полученные при использовании значений потенциального испарения, полученных с помощью методов Пенмана–Монтейса (PM), Пристли–Тэйлора (PT), Одина (OD) и Харгривза (HG)

№ п/п	Пост	NSE				$BIAS$, %			
		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 $BIAS \pm 20\%$ и $NSE > 0.75$ (рисунок 8). Все точки со значительными отклонениями средних значений оценок эффективности (10 точек, 14% от общего количества) – Раковский (PM, PT, OD, HG), Пионерский (PM, PT), Мостовой (PM, PT) и Дубининский (PM, PT) соответствуют водосборам, расположенным в бассейне р. Раковки. Данное обстоятельство 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.

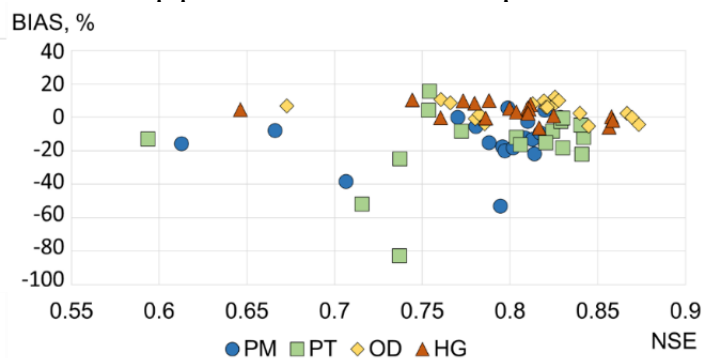


Рисунок 8. Связь значений NSE и $BIAS$, полученных в результате калибровки для 18 водосборов

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 9). При этом абсолютные значения $BIAS$ для всех рассмотренных случаев находятся в интервале –40%...–70%.

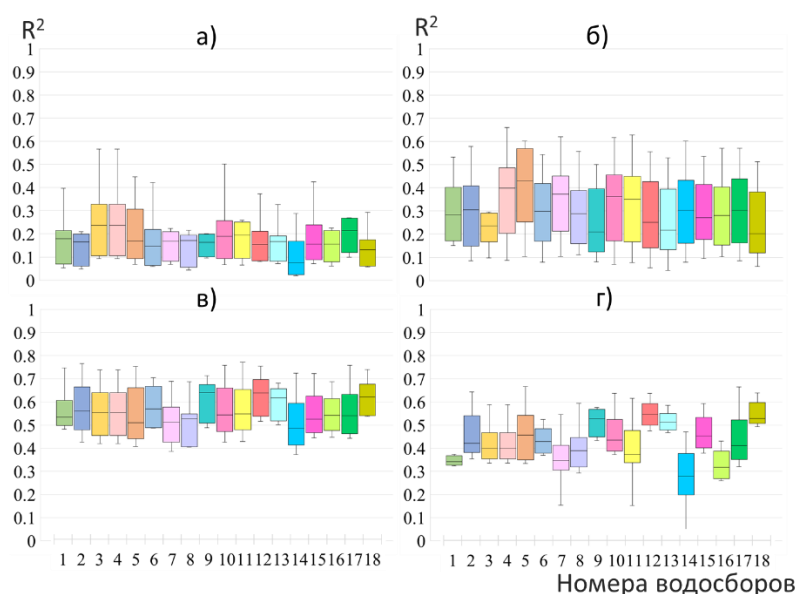


Рисунок 9. Корреляция модельных значений актуального испарения АЕТ, рассчитанных с использованием различных методов определения РЕТ для 18 водосборов (номера водосборов соответствуют нумерации в таблице 4, каждому водосбору соответствует свой цвет), и данных почвенных весовых испарителей ПВБС: а – РМ; б – РТ; в – ОД; г – НГ

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

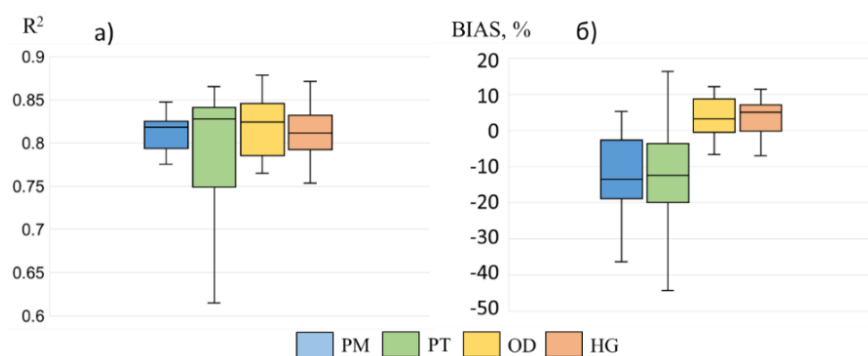


Рисунок 10. Коэффициент детерминации R^2 (а) и относительное смещение $BIAS$ (б) смоделированных и измеренных максимальных расходов воды за теплый период года (июнь–сентябрь)

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 потенциального испарения связан с общей проблемой определения оптимальной 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 помощью эмпирических зависимостей), их применение 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.

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 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.

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 основе разницы между прогнозным объемом водопотребления 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 стока, является актуальной задачей управления водными ресурсами Уссурийского городского округа.

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 приток в Раковское водохранилище оказывался значительно ниже гарантированного водопотребления (рисунок 11).

Анализ объемов стока, полученных в результате моделирования гидрологического режима водосбора Раковского водохранилища с помощью модели HBV и использованием четырех, описанных выше, методов расчета PET 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).

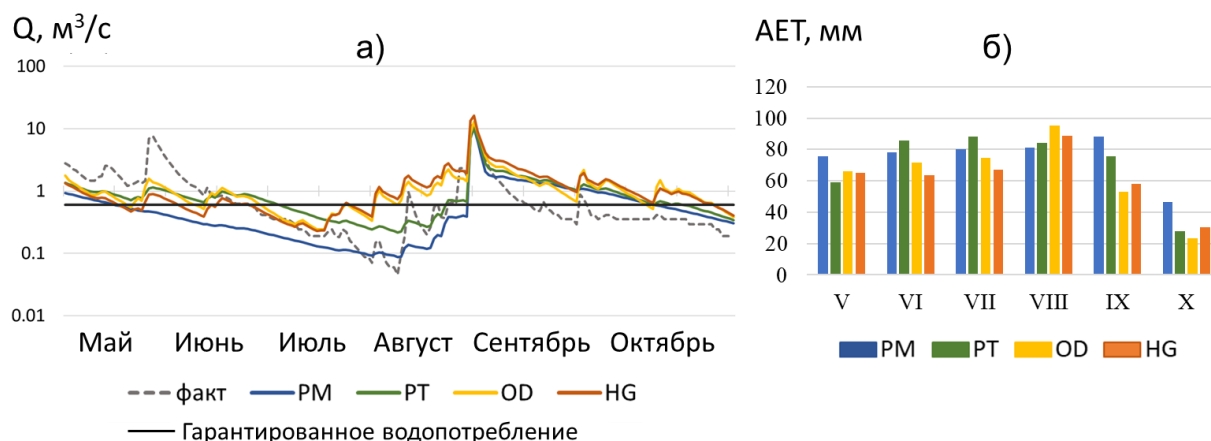


Рисунок 11. Фактический и смоделированные расходы воды (в логарифмическом масштабе) (а) и месячные суммы АЕТ (б), полученные с использованием четырех методов расчета испарения на р. Раковка в маловодный 1978 год

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании выполнена оценка влияния четырех наиболее часто применяемых в гидрологических моделях методов расчета потенциального испарения – Пенмана–Монтейса, Пристли–Тейлора, 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 региона исследования и целей использования 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 методы вместо физически-обоснованных, и наоборот, при необходимости прогнозирования компонентов водного баланса необходимо применять физически-обоснованные методы 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 работ, опубликованных по теме диссертации в рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. **Сидоренко Н.Ю.**, Бугаец А.Н., Лупаков С.Ю., Гарцман Б.И., Гончуков Л.В. Оценка влияния различных методов расчета потенциального испарения на результаты гидрологического моделирования // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 3. С. 185-193.
2. Бугаец А.Н., Лупаков С.Ю., Гончуков Л.В., Соколов О.В., **Сидоренко Н.Ю.** Эффективность моделирования стока рек бассейна верхней Уссури

с использованием данных наблюдений и реанализа ERA5 // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 82-95.

3. Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Терешкина А.А., Гончуков Л.В., Бугаец Н.Д., **Сидоренко Н.Ю.**, Пшеничникова Н.Ф., Краснопеев С.М. Опыт применения модели SWAT для изучения гидрологического режима малого речного бассейна (река Комаровка, Приморский край) // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 68-79.

Прочие публикации:

1. Терешкина А.А., Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Гончуков Л.В., Бугаец Н.Д., **Сидоренко Н.Ю.**, Пшеничникова Н.Ф., Краснопеев С.М. Применение модели SWAT для изучения гидрологического режима малого речного бассейна на примере реки Комаровка (юг Приморского края) // В сборнике: Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. Под редакцией О.М. Макарьевой. 2018. С. 228-233.
2. Гарцман Б.И., Шамов В.В., Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Бугаец А.Н., Галанин А.А., Карасев М.С., Кожевникова Н.К., Краснопеев С.М., Кулаков В.В., Ли К.Т., Макагонова М.А., Мезенцева Л.И., Меновщикова Т.С., Ониши Т., **Сидоренко Н.Ю.**, Соколов О.В., Степаненко Л.А., Степанова М.В., Тащи С.М. и др. Речные системы дальнего востока России: четверть века исследований. Владивосток, Дальнаука: 2015. 492 с.
3. **Попова Н.Ю.**, Гарцман Б.И. Сравнительный анализ методов оценки испарения с речных бассейнов юга Дальнего востока // Труды ФГБУ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт. 2012. № 1 (154). С. 246-262.
4. **Попова Н.Ю.** Определение бассейнового испарения на основе динамического моделирования стока на юге Дальнего востока. Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы Третьей всероссийской научной конференции с международным участием. Барнаул, 24-28 августа 2010г. – Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. - С.445-447.
5. **Попова Н.Ю.** Испарение с речных бассейнов: структура, методы измерений и расчётов/ Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке: сб. науч. статей молодых ученых. Вып.6. - Владивосток: Дальнаука, 2010. - С. 169-179.