

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОКА МАЛОГО ВОДОСБОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СТВОЛОВОГО СОКОДВИЖЕНИЯ (ВЕРХОВЬЯ РЕКИ УССУРИ)

С.Ю. Лупаков¹, Т.С. Губарева^{1,2}, В.В. Шамов¹, А.В. Рубцов³, Б.И. Гарцман^{1,2}, А.Н. Бугаец¹, А.М. Омелько⁴, Н.К. Кожевникова⁴

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, ²Институт водных проблем РАН, Москва, ³Сибирский федеральный университет, Красноярск, ⁴ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток

Аннотация. Представлены результаты использования данных полевых наблюдений для моделирования речного стока малого водосбора в верховьях р.Уссури. В качестве входного потока данных в гидрологическую модель HBV об эвапотранспирации применены оригинальные данные о стволовом сокодвижении, пересчитанные в объем влаги, транспирируемого древостоем. Показано, что расчетные методы определения эвапотранспирации (Пенмана-Монтейса и Л.Одина) завышают оценки испарения: разница с данными стволового сокодвижения достигает 100 мм слоя за теплый период. Надежной связи между расчетными значениями суточного испарения и измерениями не обнаружено. Выявлено повышение качества расчетов стока при использовании данных стволового сокодвижения в качестве входного потока в гидрологическую модель.

Ключевые слова: транспирация, стволовое сокодвижение, малый речной водосбор, HBV, речной сток.

CATCHMENT RUNOFF MODELING APPLYING SAP FLOW DATA (CASE OF THE UPPER USSURI RIVER)

S.Yu. Lupakov¹, T.S. Gubareva^{1,2}, V.V. Shamov¹, A.V. Rubtsov³, B.I. Gartsman^{1,2}, A.N. Bugaets¹, A.M. Omelko⁴, N.K. Kozhevnikova⁴

¹Pacific Institute of Geography FEB RAS, Vladivostok, ²Water Problems Institute RAS, Moscow, ³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, ⁴FSC of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, Vladivostok

Abstract. The results of applying the field observation data for hydrological modeling in the Upper Ussuri river are presented. The original data of sap flow measurements (recalculated to the evapotranspiration volume of forest stand) was used as input to the HBV model. It is shown that the calculation methods for determining evapotranspiration (Penman-Monteith and L.Oudin) overestimate the daily evaporation volume. In comparison with sap flow data difference reach 100 mm during the warm period. No reliable relationship was found between the calculated values of daily evaporation and measurements. An increase in the quality of runoff calculations is reported while using data from stem sap flow as an input to a hydrological model.

Keywords: transpiration, sap flow, catchment, HBV model, river flow.

Введение.

Испарение является важным компонентом водного баланса зоны умеренного климата. При этом инструментальные наблюдения за составляющими эвапотранспирации на территории России практически не ведутся. Следствием этого является широкое применение расчетных методов определения испарения для гидрологического моделирования, не всегда адекватных локальным условиям. Зачастую этот факт составляет существенное препятствие на пути к получению высоких оценок качества моделирования речного стока.

Суммарное испарение с участка суши обычно рассматривается как сумма физиологического испарения (транспирации растительностью), испарения с поверхностей почвы, воды, ледяного покрова [1]. Известно, что суточные объемы транспирации речного водосбора, покрытого лесом, могут являться основным расходным элементом водного баланса, существенно превышая все остальные потери на испарение.

Целью настоящего исследования является использование данных стволового сокодвижения в качестве оценки испарения с малого лесного экспериментально водосбора, и в качестве альтернативы двум известным расчетным методам определения эвапотранспирации (Пенмана-Монтейса и Л.Одина).

Материалы и методы.

Использовались данные полевых наблюдений в теплый период года на водосборе ручья Березового (площадь 3.5 км²), входящего в систему верховьев р.Уссури на территории Верхнеуссурийского биогеоценологического стационара (ВУС) ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН [2]. В список инструментальных наблюдений входили: измерение расхода воды в устье ручья и регистрация уровня воды, измерение метеорологических характеристик (температура и влажность воздуха, ветровой режим, солнечная радиация, количество атмосферных осадков), а также мониторинг скорости движения влаги в деревьях. Временной интервал измерений составил 10-15 минут.

Так как в составе древостоя широко (20% по запасу) представлена берёза желтая (*Betula castata*), ее пять особей были отобраны для установки измерительных систем. Выбранные деревья входят в верхний ярус, имеют высоты в диапазоне 18-23 м и диаметр на уровне груди – 14.6-25.5 см. Для регистрации стволового сокодвижения применялась измерительная система EMS81, производства Environmental Measuring Systems (Брно, Чешская Республика), реализованная на основе энергобалансового метода Trunk Heat Balance (ТНВ) [6, 9]. Принцип работы заключается в измерении температуры ткани древесины, где происходит восходящий ток влаги, при ее внутреннем нагреве. Часть энергии при нагреве уносится потоком влаги в стволе, другая часть рассеивается теплопроводностью ткани в окружающую среду. Расчет скорости движения воды в стволе основывается на количестве энергии, затрачиваемого на поддержание определенной разности температур между нагреваемой и не нагреваемой (контрольной) частью древесины. Выведенная из теплового баланса участка дерева [6], формула расчета сокодвижения:

$$Q = \frac{P}{c_w * d * dT} - \frac{z}{c_w} \text{ [кг с}^{-1} \text{ см}^{-1}] \quad (1),$$

где Q – скорость сокодвижения, кг с⁻¹ см⁻¹; P – мощность нагрева электродов, Вт; d – ширина измеряемого участка (5.5 см); dT – разница температур в месте измерения (обычно, 1,2 или 3 °К); c_w – удельная теплоемкость воды (Дж кг⁻¹ К⁻¹); z – коэффициент тепловых потерь в измеряемой части ствола [Вт К⁻¹]. Первая часть уравнения описывает количество тепла, уносимого потоком влаги в стволе пропорционально скорости сокодвижения, вторая – тепловые потери, которые исключаются в процессе обработки исходных данных по рекомендованной производителем методике. Так как измерения проводятся на ограниченной площади ствола, приведенная выше формула выражает объемное сокодвижение через 1 см окружности дерева. Умножение этого значения на длину окружности ствола измеряемого дерева позволяет оценить приблизительный суммарный объем влаги, прошедший по стволу дерева на высоте установки прибора (обычно ≈1.3 м от поверхности земли) с допущением, что скорость сокодвижения одинакова по всей окружности ствола. Дополнительная информация приведена в [3]. Для перехода от точечных измерений сокодвижения индивидуальных деревьев к объему влаги, затраченной на транспирацию с поверхности всего водосбора, использовались данные детальных геоботанических описаний с геодезической привязкой, полученные сотрудниками ФНЦ биоразнообразия.

Для моделирования водного баланса ручья Березового была использована гидрологическая модель HBV [5]. HBV представляет собой емкостную модель с сосредоточенными параметрами, в которой предусмотрено три основных модуля: расчёт снега, расчетов почвенной влажности и эвапотранспирации, блок стокоформирования и его трансформации. Входными данными являются атмосферные осадки, температура воздуха и потенциальная эвапотранспирация.

Результаты и обсуждение.

На Рис. 1 представлен ход транспирации в подвергнутых измерениям деревьях. Различия в интенсивности связаны с разным диаметром исследуемых древесных стволов. Суточные максимумы достигают 100 л, минимумы связаны с дождями. В отдельные дни транспирации практически не было. Это связано с погодными условиями. Дожди и, в целом, повышенная влажность воздуха угнетают процессы транспирации. Масштабирование данных точечных измерений показало, что за сутки с малого водосбора испаряется до 8500 м³ воды (~2 мм слоя за сутки), во время выпадения значительных дождей эта цифра стремится к 0, а в среднем за сутки суммарное бассейновое испарение нами оценено в районе 3500 м³. Полученные значения в единицах слоя близки к приведенным в [4].

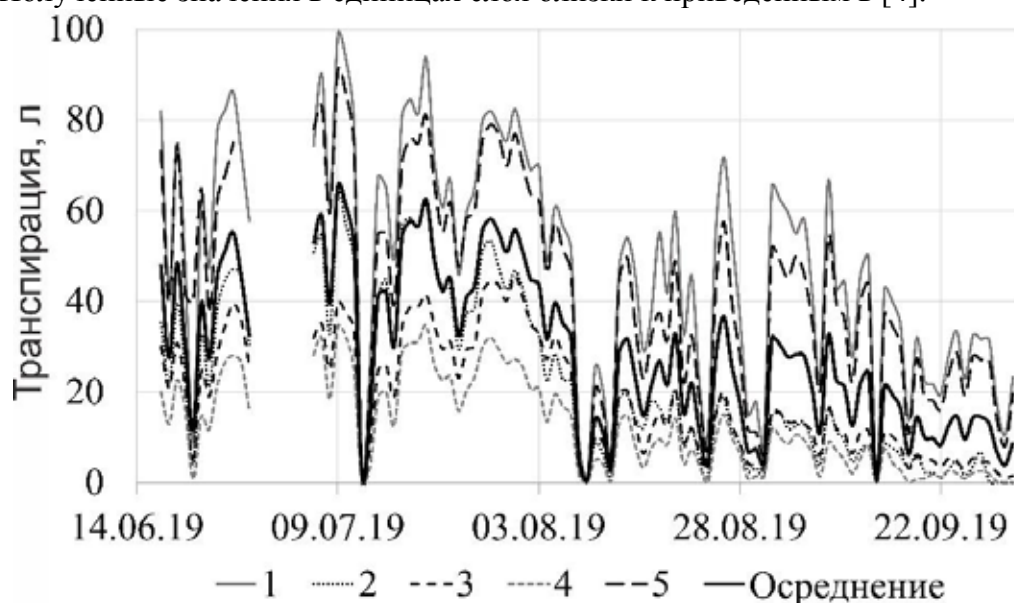


Рис. 1. Суммарный суточный объем транспирации измеренных деревьев (1-5) и средняя из всех экземпляров

Интересным выглядит сравнение оцененных величин транспирации древостоем и измеренного стока на 09.07.2019 с достаточно засушливыми условиями: за сутки с водосбора испарилось около 8500 м³, в то время как суточная сумма стока составила около 1500 м³. Таким образом, суточные объёмы испарения могут превышать сток до 5-6 раз. В целом, по имеющимся наблюдениям за исследуемый сезон сток составил 98 мм, испарение ~135 мм.

Калибровка параметров гидрологической модели выполнена вручную с суточным шагом расчетов по времени за 2019 год (на Рис. 2 приводятся гидрографы за период имеющихся фактических гидрометрических наблюдений). Потенциальное испарение, как часть входного потока данных в модель, рассчитано отдельно комплексным методом Пенмана-Монтейса [8] и достаточно простым, основанным только на температуре воздуха, методом Одина [7]. Оценки суммарной транспирации, полученные с помощью данных стволового сокодвигания, были также введены в модель HBV, причем параметры модели были назначены таким образом, чтобы этот поток данных являлся фактическим ("измеренным"), а не потенциальным испарением, которое затем трансформируется моделью в фактическое.

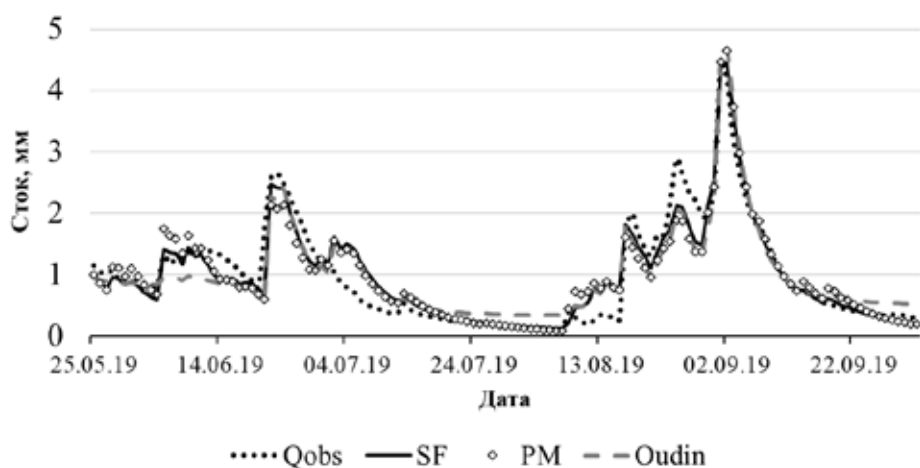


Рис. 2. Примеры измеренного (Qobs) и рассчитанных гидрографов с помощью различных источников испарения (SF – данные стволового сокодвижения, PM – формула Пенмана-Монтейса, Oudin – формула Одина)

Коэффициент Нэша-Сатклиффа, обычно использующийся в гидрологии для оценки эффективности моделирования, при использовании разных методов определения испарения составил: 0.82 (Пенман-Монтейс), 0.82 (Один) и 0.89 (данные стволового сокодвижения), что относится к категории оценивания "очень хорошо". Однако при рассмотрении некоторых деталей можно заметить, что речной сток, рассчитываемый с помощью испарения, полученного на основе данных стволового сокодвижения, по динамике ближе к измеренному во время устойчивой межени (начало июня) и во время предпаводочного повышения расходов (середина августа); пик основного паводка также рассчитан немного лучше.

Корреляция суточных значений эвапотранспирации, полученных на основе различных методик, и измерений стволового сокодвижения, оказалась достаточно слабой ($R^2 < 0.25$). Динамика и суммарные величины также существенно отличаются. Расчетные методы сильно завышают объемы испарения (до 3-4 раз) по сравнению с данными стволового сокодвижения, распространенными на всю площадь экспериментального водосбора. Предположительно, это связано с завышением значений потенциального испарения, как величины, отражающей возможное испарение при отсутствии лимитирующих факторов. Стоит также отметить, что комплексный метод расчета потенциального испарения по методу Пенмана-Монтейса не улучшил качества расчетов стока по сравнению с более простой альтернативной формулой.

Применение различных методов определения испарения сказалось на результатах расчета водного баланса (Таб. 1) за период наблюдений (июнь-сентябрь 2019 г.). Значения калибруемых параметров гидрологической модели также оказались отличными друг от друга.

Таблица 1

Сезонный водный баланс ручья Березового за теплый период 2019 г. при использовании модели HBV и различных методов определения испарения, все в мм

Компонент	Метод расчета*		
	SF	Oudin	PM
Осадки	348	348	348
Сток	99	103	97
Испарение	135	221	248
Разность в водном балансе	114	24	3

*SF – по данным стволового сокодвижения, Oudin – метод расчета Одина, PM – метод Пенмана-Монтейса.

Заметно, что "измеренное" на основе регистрации сокодвижения сезонное испарение (транспирация) почти на 100 мм меньше такового, оцененного расчетными методами. Разница остается в стокоформирующих емкостях модели и переходит на следующий расчетный год. При недоучете этого момента при долгосрочном моделировании это вызовет совершенно иную компоновку водного баланса в дальнейшем, поскольку условия на водосборе, например, при начале половодья следующего года, будут разными при использовании различных техник определения испарения.

Выводы.

Настоящая работа посвящена интеграции данных о стволовом сокодвижении в процедуру моделирования стока экспериментального малого речного бассейна с помощью гидрологической модели HBV. Несмотря на все ограничения, качество расчета стока с применением этих данных оказалось выше по сравнению с применением расчетных методов. Этот момент ценен не только в качестве улучшения качества моделирования. На текущий момент не существует методов инструментальной оценки потерь влаги на испарение в масштабе водосбора, поэтому гидрологическое моделирование может рассматриваться как доступный способ решения этой проблемы с учетом имеющихся данных.

Тем не менее полноценное применение данных стволового сокодвижения в качестве оценки испарения требует дополнительных исследований. В частности, это касается расширения видового состава древесных пород; подготовка и усовершенствование процедуры масштабирования точечных данных на масштаб водосбора; вовлечение в перечень измерений испарение с поверхности почвы, транспирации с травяного покрова и подлеска; применением более физически-обоснованных гидрологических моделей.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке РФФИ: проект № 19-05-00326.

Список литературы.

1. Булавко А.Г. Водный баланс речных водосборов. Л: Гидрометеиздат, 1971. 304 с.
2. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 589–599.
3. Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Рубцов А.В., Кожевникова Н.К. Возможности оценивания бассейновой транспирации на основе измерения стволового сокодвижения: постановка задачи // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1, № 4. С. 504-532
4. Arneeth A., Kelliher F.M., Bauer G., Hollinger D.Y., Byers J.N., Hunt J.E., McSeveny T.M., Ziegler W., Vygodskaya N.N., Milukova I., Sogachov A., Varlagin A., Schulze E.-D. Environmental regulation of xylem sap flow and total conductance of Larix gmelinii trees in eastern Siberia // Tree Physiology. 1996. V.16. pp.247–255
5. Bergstrom S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Rep. No. 7. Norrkoping, Sweden. 1976. 134 pp.
6. Cermak J., Kucera J., Nadezhdina N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands // Trees. 2004. V.8. pp. 529–546
7. Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagne C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2: Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling // J. Hydrol. 2005. V.303. pp.290–306
8. Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1948. V.193. pp.120-145
9. Tatarinov F.A., Kucera J., Cienciala E. The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. Meas. Sci. Technol. 2005. V.16. pp.1157–1169.