

## **Возможности использования данных о стволовом сокодвижении в гидрологическом моделировании**

ЛУПАКОВ С.Ю.<sup>1,2</sup>, ГУБАРЕВА Т.С.<sup>2,1</sup>, ШАМОВ В.В.<sup>1</sup>, РУБЦОВ А.В.<sup>3</sup>,  
ГАРЦМАН Б.И.<sup>2,1</sup>, БУГАЕЦ А.Н.<sup>1,2</sup>, ОМЕЛЬКО А.М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем РАН, Москва

<sup>3</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», Красноярск

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» ДВО РАН, Владивосток  
Адрес для переписки: rbir@mail.ru

**Аннотация.** Статья содержит результаты моделирования стока малого речного бассейна в верховьях р. Усури с использованием оригинальных данных о стволовом сокодвижении, пересчитанных в объем воды, транспирируемый древостоем. В теплый период 2019 г. на территории Верхнеусурийского стационара ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН проведен комплекс наблюдений за компонентами влагооборота, позволивший накопить необходимый массив данных для гидрологического моделирования. В дополнение к традиционным водно-балансовым измерениям проводился мониторинг транспирации на основе системы датчиков регистрации водотока в стволах деревьев. Полученные данные точечных наблюдений распространены на масштаб водосбора (площадь около 3.1 км<sup>2</sup>). Показано, что в теплых и сухих условиях объем суточного суммарного испарения с малого речного бассейна может достигать 8.5 тыс. м<sup>3</sup>, что больше объема речного стока за тот же период в 5–6 раз, а во время выпадения дождей транспирация деревьев уменьшается практически до нуля. Для расчета водного баланса изучаемого объекта использована гидрологическая модель HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning). Ряды суточной потенциальной эвапотранспирации, рассчитанные на основе широко используемых методов Пенмана-Монтейса и Одина, применены в HBV как входные данные. Расчетные суточные значения испарения, по сравнению с полученными на основе данных стволового сокодвижения, оказались выше в 1.5–2 раза, разница сумм испарения за весь теплый период года достигает слоя 100 мм и более. При этом надежной связи между расчетными значениями суточного испарения и измерениями не было обнаружено. Сделан вывод, что использование приборных данных о стволовом сокодвижении в составе входных переменных в гидрологическую модель повышает качество расчетов стока.

**Ключевые слова:** стволовое сокодвижение, водный баланс, модель HBV, эвапотранспирация, малый речной бассейн, экспериментальные данные.

# Applicability of sap flow data in hydrological modeling

LUPAKOV S.Yu.<sup>1,2</sup>, GUBAREVA T.S.<sup>2,1</sup>, SHAMOV V.V.<sup>1</sup>, RUBTSOV A.V.<sup>3</sup>,  
GARTSMAN B.I.<sup>2,1</sup>, BUGAETS A.N.<sup>1,2</sup>, OMELKO A.M.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Pacific Institute of Geography FEB RAS, Vladivostok

<sup>2</sup>Water Problems Institute RAS, Moscow

<sup>3</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk

<sup>4</sup>FSC of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, Vladivostok

Correspondence paper: rbir@mail.ru

**Abstract.** The article deals with the experience of applying an alternative method for quantifying evapotranspiration volume as input to the hydrological model to simulate runoff of a small catchment located in the upper reaches of the Ussuri River. In the warm period of 2019 at the territory of the Verkhneussuriyskiy station of the Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity (FEB RAS), a set of field measurements was carried out. The measured data were used to calibrate the HBV hydrological model (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning). In addition to traditional water-balance measurements, there was assessed the evapotranspiration rate based on sap flow measurements eliminating other parts of water losses. The Tissue Heat Balance technique was applied to measure a sap flow in some individual trees. After that, the obtained data were scaled up to the catchment area (3.1 km<sup>2</sup>). It is shown that in warm and dry weather conditions, the volume of daily total evaporation from a small catchment can reach 8.5 ths.m<sup>3</sup> that is 5-6 times more than the river runoff volume over the same period. During the rainfall events, the transpiration rate in trees decreases to almost zero. To compare the obtained results with the modelled ones, the potential evapotranspiration was also calculated based on well-known Penman-Monteith's and L. Oudin's methods that forced HBV model as input. Based on hydrological simulations, these methods overestimated the actual daily evaporation volume up to 2 times in comparison with the sap flow data, and the difference for the warm season reaches 100 mm and more. No reliable relationship was found between the calculated values of daily evaporation rate and the conventionally "measured" ones. Basically, runoff simulations quality was improved while using evapotranspiration volume assessed with the sap flow data. We conclude that water balance via HBV simulations is quite different depending on applied evapotranspiration method. In this case, overestimated volume of evapotranspiration by Penman-Monteith and L. Oudin methods leads to excessive water extraction from the HBV soil moisture storage. If it's actually not correct, long-term runoff simulations would result in wrong water balance and error accumulation.

**Keywords:** sap flow, water balance, HBV model, evapotranspiration, catchment, field measurements.

## Введение

В настоящее время математическое моделирование является методической основой для решения большинства научных задач и широкого спектра прикладных вопросов в гидрологии речных бассейнов [1–3]. Успешное применение модельных комплексов зависит от множества факторов: соответствия заложенных в модель процессов и параметров характеру природных условий; информационного описания территории, для которой проводятся исследования; климатических особенностей и характера взаимодействия в системе «атмосфера–подстилающая поверхность»; ландшафтных особенностей и многих других.

Водный баланс участка суши в основном определяется тремя переменными: атмосферными осадками как приходной частью, испарением (состоящим из транспирации, испарения с почвенного покрова, водной поверхности и сублимации) и речным стоком как расходными частями [4]. Для территории России из этих трех характеристик, являющихся базовыми для гидрологического моделирования, в относительно свободном доступе имеются систематические данные наблюдений за осадками и стоком, наблюдения же за испарением проводятся на очень небольшом количестве объектов, а получаемые при этом данные не всегда надежны. Стоит отметить, что по самым общим оценкам на суммарное испарение с суши приходится 50–70 % потерь влаги [5]. Таким образом, становится очевидным факт несоответствия роли эвапотранспирации в формировании водного режима

суши и имеющейся практикой гидрометеорологического мониторинга, а следовательно, и возможностями гидрологического моделирования. В первую очередь, это связано с недостаточной разработанностью современной целевой приборной базы, ее технической сложностью и высокой стоимостью, а также высокой трудоемкостью проведения подобных наблюдений [6].

Одним из решений сформулированной выше проблемы является применение расчетных методик, основанных на использовании характеристик, которые измерять существенно проще. Большое распространение получили формулы, связывающие интенсивность испарения и различные метеорологические характеристики [7]. С одной стороны, применение таких формул существенно облегчает задачу наполнения гидрологических моделей необходимыми данными, с другой стороны, встает вопрос оценки адекватности расчетных величин суммарного испарения локальным природным условиям, поскольку сами формулы могут быть основаны на обобщении информации, полученной для специфических физико-географических условий. Этот вопрос зачастую неявно игнорируется.

Отметим, что одной из основных задач любой гидрологической модели является определение количества воды, расходуемой на различного рода «потери» (испарение, заполнение бессточных понижений, пополнение емкости грунтовых вод, разгружающихся за пределами водосбора и т.п.) и формирование стока. Неправильный входной набор данных об испарении может существенным образом исказить рассчитываемый водный баланс, что влияет на качество расчетов.

В настоящей статье изложен опыт применения измеренных скоростей ствольного сокодвижения, пересчитанных затем в объем транспирации, при моделировании водного режима малого речного бассейна на основе гидрологической модели HBV. Объектом исследования является типичный среднегорный водосбор в пределах бассейна р. Уссури на территории Приморского края, в котором выполнен детальный комплекс измерений, необходимый для водобалансовых исследований и гидрологического моделирования. В статье приводится описание объекта, методики измерений и их обработки, самой модели, а также результаты расчета речного стока с учетом и без учета полученных новых данных, обсуждается их ценность и возможность продолжения и расширения подобных работ. Новизной исследования можно считать эксперимент по включению нового типа информации, а именно суммарного объема транспирируемой древостоями влаги, в качестве входных данных в гидрологическую модель HBV. Такая попытка для территории юга Дальнего Востока выполнена впервые.

## Материалы и методы

Основным объектом исследования является водосбор руч. Березовый (площадь 3.1 км<sup>2</sup>) – притока II порядка р. Правая Соколовка, входящей в систему верховьев р. Уссури. Данная территория относится к Верхнеуссурийскому научному стационару ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, где с 1970-х гг. XX в. велись биоценологические, гидрометеорологические и биогеохимические исследования. В настоящее время они продолжены на современном уровне инициативной группой исследователей при активном участии авторов.

Климат региона муссонный, что определяет особенности увлажнения и гидрологического режима. Среднегодовая температура воздуха 0.7 °С, максимальная 37–38 °С (июль–август), минимальная –43–45 °С (январь–февраль). Среднегодовое количество атмосферных осадков составляет 780 мм, из них большая часть выпадает в виде дождей в теплый период года (апрель–октябрь). Суточные максимумы осадков достигают 200 мм, что связано с активностью тропических тайфунов. Реки рассматриваемой территории по характеру питания относятся к дальневосточному типу с летними паводками. Суточные максимумы стока достигают 30 мм в сутки и более. Дождевые паводки летне-осеннего

периода вносят основной вклад в суммарный годовой объем стока. Высота снежного покрова 52–102 см, максимальная глубина промерзания почвы 53–125 см.

Бассейн руч. Березовый вытянут с юго-востока на северо-запад. Долина ручья узкая, глубокая с крутыми (до 35°) выпуклыми склонами. Средняя высота водосбора около 800 м, минимальные отметки в приустьевой зоне 560 м, наивысшие отметки приводо-раздельных участков около 1100 м. В нижней части водосбор покрыт хвойно-широколиственными лесами, в верхней – преимущественно темнохвойными [8].

С конца мая по начало октября 2019 г. на водосборе руч. Березовый был проведен цикл комплексных воднобалансовых наблюдений. Гидрологические наблюдения включали организацию сезонного гидрологического поста с установкой цифрового уровнемера Levellogger Junior Solinst (Канада) для мониторинга уровня воды с 15-минутным разрешением и измерениями расходов воды с помощью электромагнитного измерителя скорости потока FlowSens SEBA (Германия). По полученным данным строилась кривая связи «уровень–расход», позволившая получить ряд среднесуточных расходов воды на каждый день периода наблюдений. Метеорологические характеристики (температура и влажность воздуха, ветровой режим и освещенность, атмосферные осадки) измерялись двумя автоматическими метеостанциями WS-G1 Delta-T (Великобритания), одна из которых была установлена под пологом на склоне, вторая – на открытом месте с 10- и 15-минутным разрешением измерений соответственно.

Известно, что суммарное испарение участка суши в теплый период года [4] можно записать как

$$E = T + E_{soil} + E_{water}, \quad (1)$$

где  $E$  – суммарное испарение;  $T$  – транспирация (физиологическое испарение);  $E_{soil}$  – испарение с поверхности почвы;  $E_{water}$  – испарение с водной поверхности.

Далее оценки объемов транспирации принимаются в качестве «измеренного» суммарного испарения с водосбора, поскольку плотность покрытия исследуемого водосбора растениями близка к 100 %, открытые участки почвы практически отсутствуют, а площадь зеркала ручья на несколько порядков меньше площади самого водосбора (ширина русла в засушливые периоды может не превышать нескольких десятков сантиметров).

В настоящей работе для оценки суммарного объема транспирации была использована система мониторинга стволового сокодвижения производства EMS (г. Брно, Чешская Республика). Данная система реализована на основе энергобалансового метода ТНВ (Trunk Heat Balance) [9, 10]. Основой измерения является регистрация энергии, необходимой для поддержания разницы температур в ксилеме (водопроводящей части древесины) ствола дерева при ее внутреннем нагреве посредством подачи электрического тока по трем электродам из нержавеющей стали. При нагреве ксилемного пространства вокруг электродов часть энергии нагрева уносится потоком древесного сока (пасоки), остальная (малая) часть рассеивается в окружающую среду и относится к теплотерям. Расчет скорости потока влаги в стволе дерева основан на количестве энергии, необходимой для поддержания заданной разности температур между нагретой и контрольной (без нагрева) частями древесины. Выведенная из теплового баланса участка дерева формула расчета сокодвижения [9] имеет следующий вид:

$$V = \frac{P}{c_w * d * dT} - \frac{z}{c_w} [\text{кг/с} * \text{см}], \quad (2)$$

где  $V$  – скорость сокодвижения, кг/(с\*см);  $P$  – мощность нагрева электродов, Вт;  $d$  – ширина измеряемого участка (5.5 см);  $dT$  – разность температур в месте измерения (1, 2 или 3 К);  $c_w$  – удельная теплоемкость воды (Дж/(кг\*К));  $z$  – коэффициент тепловых потерь в измеряемой части ствола [Вт/К]. 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 рекомендован-

ной методике [9]. 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  $\approx 1.3$  м от поверхности земли) с допущением, что скорость сокодвижения одинакова по всей окружности ствола.

Практически использованная система мониторинга стволового сокодвижения состоит из нескольких элементов: электронного блока EMS MicroSet 8X, который контролирует работу системы и записывает данные; четырех термопар, выполненных в форме игл, которые измеряют температуру; электродов, проводящих ток к водопроводящей ткани дерева; защитных приспособлений, кабелей и т.п. Детальное описание измерительной системы и первичный анализ полученных данных за 2019 г. приведены в [11].

Измерения выполнялись на участке вблизи постоянной пробной площади в средней части склона (уклоны в пределах  $15\text{--}22^\circ$ ) западной и северо-западной экспозиции, на высоте около 650 м над уровнем моря, в поздне-сукцессионных сообществах кедрово-широколиственных лесов. Представленные в пределах изучаемого водосбора горнолесные бурые почвы характеризуются высокой пористостью, каменистостью и выраженным промывным режимом. В составе древостоя широко (20 % по запасу) представлена береза желтая (*Betula castata*), пять экземпляров которой отобраны для установки измерительных систем. Выбранные деревья входили в верхний ярус, имели высоты в диапазоне 18–23 м и DBH (diameter at breast height – диаметр на уровне груди) 14.6–25.5 см.

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 ДВО РАН. С учетом доступной информации и цели исследования для выполнения подобного масштабирования было принято несколько допущений:

- объем воды, прошедшей по стволам измеряемых экземпляров берез, принимается равным для всех видов лиственных деревьев; согласно оценкам, приведенным в [12], для хвойных видов он на 20 % ниже;
- преимущественный объем транспируемой деревьями влаги сосредоточен во взрослых особях, таким образом, исключается необходимость учета кустарников и трав;
- показатели древесного покрова (видовой состав, плотность насаждений, высота деревьев, обхват ствола на DBH и некоторые другие) пробной площади, расположенной на правом борту долины руч. Березовый, репрезентативны для площади всего водосбора.

Специфика и детальный учет биотических аспектов водопотребления остаются за рамками данной статьи, поскольку задачей настоящей статьи является демонстрация возможности определения суммарного объема влаги на транспирацию или объем «потерь» воды из почвы с удовлетворительной точностью. Для моделирования водного режима руч. Березовый была применена гидрологическая модель HBV, широко используемая в научных исследованиях и практических приложениях [13]. HBV представляет собой воднобалансовую емкостную модель с сосредоточенными параметрами, в которой предусмотрено три основных модуля: расчет снега, расчет почвенной влажности и эвапотранспирации, блок стокоформирования и его трансформации. Входными данными являются атмосферные осадки, температура воздуха и потенциальная эвапотранспирация.

Модель разделяет подающиеся на вход измеренные осадки на твердые и жидкие, исходя из температуры воздуха. Для расчета снеготаяния используется метод «градусо-дней» [14]. Жидкая влага пополняет блок почвенной влажности в зависимости от текущего влагосодержания почвы (SM, мм), его максимального значения (FC, мм), а также параметра BETA:

$$\frac{recharge}{P(t)} = \left( \frac{SM(t)}{FC} \right)^{BETA}, \quad (3)$$

где  $P(t)$  – осадки;  $recharge$  – пополнение емкостей, мм/сут. Испарение из  $SM$  определяется базовым соотношением  $SM/FC$ : если оно выше параметра  $LP$ , то действительное испарение ( $E_{act}$ , мм/сут) равно потенциальному ( $E_{pot}$ , мм/сут.), в обратном случае расчет идет по следующей формуле:

$$E_{act} = E_{pot} \cdot \min\left(\frac{SM(t)}{FC \cdot LP}, 1\right). \quad (4)$$

В используемой версии HBV предусмотрено две емкости для формирования стока, расположенные одна над другой. Разделение приходящей влаги между емкостями определяет параметр Part, а параметр Delay – время добегания воды до нижней емкости. Отток из нижней описывается моделью единичной линейной емкости, из верхней в соответствии с

$$Q_1(t) = \min\left(K_1 * S_1(t)^{1+\alpha}\right), \quad (5)$$

где  $t$  – время, сут;  $Q_1$  – отток из емкости, мм/сут;  $K_1$  – коэффициент истощения;  $S(t)$  – текущая величина влагозапаса в емкости, мм;  $\alpha$  – калибруемый параметр. Отток из верхней емкости может быть рассмотрен как сумма почвенного и поверхностного стока, из нижней – как глубокий грунтовый сток. Сумма всех оттоков на каждом расчетном шаге трансформируется в сток замыкающего створа согласно

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i) * Q_{sum}(t-i+1), \quad (6)$$

$$c(i) = \int_{i-1}^i \frac{2}{MAXBAS} - \left| i - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS^2} di, \quad (7)$$

где  $Q_{sim}$  – расчетный сток в замыкающем створе;  $Q_{sum}$  – суммарный сток за время  $(t-i+1)$ ;  $i$  – расчетный шаг;  $c(i)$  – функция бассейновой трансформации [13]; MAXBAS – параметр добегания, сут.

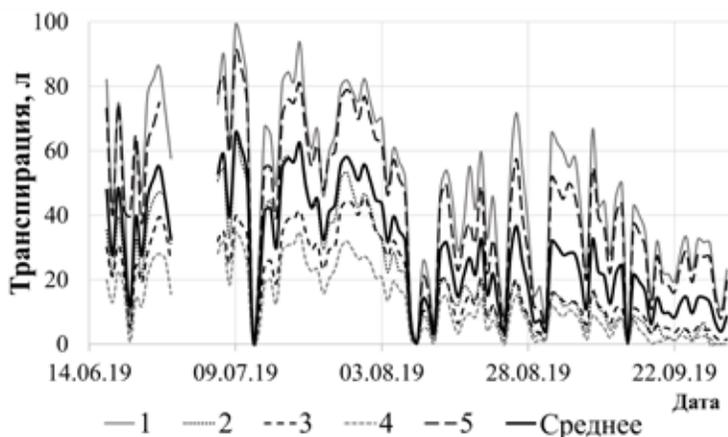
## Результаты и их обсуждение

Примеры полученных графиков стволового сокодвигания приведены на рис. 1. Видно, что объемы воды, прошедшей по водопроводящей ткани ствола, у рассматриваемых экземпляров деревьев разные. В первую очередь, это связано с особенностями строения деревьев, локальными условиями увлажнения и инсоляции. Высокая вариабельность транспирации относительно осредненной может снижать качество масштабирования данных на площадь водосбора. В то же время покрытие деревьев разного размера и условий произрастания измерениями является необходимым для учета влияния структуры лесного покрова на суммарную транспирацию.

Обращает внимание на себя факт, что 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 водосбора площадью около 3.1 км<sup>2</sup> испаряется до 8578 м<sup>3</sup> (это чуть более 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 около 3500 м<sup>3</sup>. Полученные значения в единицах слоя близки к приведенным в [15].

Интересным выглядит сравнение оцененных величин эвапотранспирации (на основе данных стволового сокодвигания) и измеренного в достаточно засушливый день (9 июля) стока: за сутки с водосбора испарилось 8578 м<sup>3</sup> воды, в то время как суточная сумма сто-

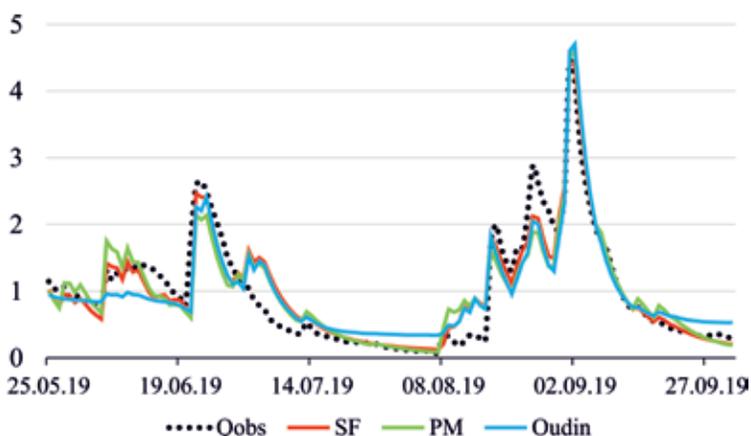


**Рис. 1.** Суммарные суточные объемы транспирации измеренных деревьев (1–5) и их среднее за 2019 г.

**Fig. 1.** Total daily transpiration volume in sap flow equivalent of measured trees (1–5) and seasonal average, 2019 year

ка составила около  $1500 \text{ м}^3$ , т.е. суточные объемы испарения могут превышать сток до 5–6 раз. В целом по имеющимся наблюдениям за исследуемый сезон слой стока составил 98 мм, испарение около 135 мм.

Калибровка параметров гидрологической модели выполнена вручную, с суточным шагом, по данным за 2019 г. (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 [16] и достаточно простым, основанным только на температуре воздуха, методом Одина [17]. Суммарное испарение, полученное с помощью оценки объемов стволового сокодвигения, было также введено в модель, 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 с помощью различных источников испарения (SF – данные стволового сокодвигения, PM – формула Пенмана-Монтейса, Oudin – формула Одина) гидрографов, 2019 г., мм/сут

**Fig. 2.** The measured (Qobs) and simulated hydrographs using different evapotranspiration calculation methods (SF – sap flow data, PM – Penman-Monteith method, Oudin – Oudin method), 2019 year, mm/day

Коэффициент Нэша-Сатклиффа, традиционно использующийся в гидрологии для оценки эффективности моделирования, при использовании разных методов определения испарения составил: 0.83 (Пенман-Монтейс), 0.84 (Один) и 0.90 (данные ствольного сокодвижения). Согласно классификации [18], все результаты относятся к категории «очень хорошо». Однако при рассмотрении некоторых деталей можно заметить, что речной сток, рассчитываемый с помощью испарения, полученного на основе данных ствольного 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.

Анализ связи суточных значений эвапотранспирации, полученных на основе различных методик, показал, что, во-первых, их корреляция слаба ( $R^2 < 0.3$ ), а, во-вторых, динамика и суммарные значения сильно различаются. Расчетные методы в целом завышают объемы эвапотранспирации (до 2 раз и более) по сравнению с данными ствольного сокодвижения, распространенными на всю площадь экспериментального водосбора. В первую очередь, это связано с завышением значений потенциального испарения как величины, отражающей максимально 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 (см. табл.) за период наблюдений (июнь–сентябрь 2019 г.). Значения калибруемых параметров гидрологической модели также оказались отличными друг от друга.

Заметно, что «измеренное» на основе регистрации сокодвижения сезонное испарение (транспирация) более чем на 100 мм меньше 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.

## Заключение

В настоящей работе выполнена интеграция данных ствольного сокодвижения в процедуру моделирования стока экспериментального малого речного бассейна с помощью гидрологической модели HBV. Несмотря на все ограничения, по сравнению с двумя расчетными методами определения испарения – методами Пенмана-Монтейса и Одина – качество моделирования стока оказалось выше. При этом модель HBV использовалась в том числе и как способ перехода от потенциального испарения, которое рассчитывается по подобным формулам, к фактическому. Подчеркнем, что на данный момент не существует методов инструментальной оценки потерь влаги на испарение в масштабе водосбора, поэтому гидрологическое моделирование может рассматриваться как доступный способ решения этой проблемы.

**Таблица**

Сезонный водный баланс руч. Березового при использовании модели HBV и различных методов определения испарения, мм

Table. Water balance components obtained by HBV model and different evapotranspiration calculation methods (mm)

Компонент	Метод расчета		
	SF	Oudin	PM
Осадки	348	348	348
Сток	98	102	100
Испарение	135	245	253
Разность	115	1	-5

Примечание. SF – по данным ствольного сокодвижения, Oudin – метод расчета Одина, PM – метод Пенмана-Монтейса, Разность – остаточный член водного баланса.

Несмотря на в целом успешный опыт проведенного исследования, остается ряд вопросов, которые необходимо решить для полноценного ввода обсуждаемых данных в практику моделирования.

Во-первых, существенным источником неопределенности при расчете суммарного бассейнового испарения является процедура масштабирования точечных данных – данных измерений, полученных для отдельных деревьев. В текущей работе распространение точечных данных на площадь всего малого водосбора выполнено в наиболее простой форме. Это связано как с наличием ограниченного количества датчиков регистрации стволового сокодвижения и, как следствие, практической невозможностью охватить наблюдениями все репрезентативные участки водосбора и их микроклиматические особенности, так и с недостаточной разработанностью самой процедуры масштабирования. Решение данной проблемы включает в себя расширение видового состава измеряемых деревьев, а также поиск функциональных связей между метеорологическими параметрами и интенсивностью транспирации, что позволит построить стохастическую модель транспирации на основе данных метеофорсинга.

Во-вторых, транспирация на облесенных водосборах является ведущим звеном приземного влагооборота, но не единственным. Поэтому для повышения точности определения объемов эвапотранспирации целесообразно определение испарения с поверхности почвы, транспирации с травяного покрова и подлеска.

В-третьих, применение концептуальной модели HBV с сосредоточенными параметрами может быть недостаточным для изучения тонких механизмов стокоформирования и взаимодействия различных элементов приземного влагооборота. Однако учитывая информационное обеспечение территории и высокую пространственно-временную динамику элементов водного баланса изучаемого региона, на первом этапе исследований подобного рода разумным будет тестирование наиболее простых модельных комплексов для отработки методики и общей оценки водного баланса речных водосборов. Основными ограничениями модели HBV в рамках решаемой задачи являются простота определения фактического испарения, основанная на доступности влаги и двух константах, а также базовое предположение о замыкании водного баланса в пределах водосбора, которое для малых речных бассейнов может и не выполняться. Последнее означает невозможность при использовании модели «сбросить» часть приходящей воды в подземные водоносные горизонты, разгрузка которых происходит в основном за пределами данного бассейна. Это может быть решено с помощью данных о стволовом сокодвижении (т.е. определением потерь «вверх»), а сведение баланса позволит определить потери «вниз» при дальнейшей работе в обсуждаемом направлении.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-05-00326, 18-04-00120 и 18-04-00278, а также согласно плану НИР (ГЗ) АААА-А19-119102290002-3 (ТИГ ДВО РАН) и АААА-А18-118022090056-0 (ИВП РАН).*

#### **Литература**

1. Kirchner J.W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology // Water Resour. Res. 2006. Vol. 42. W03S04.
2. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2018. 300 с.
3. Beven K. Rainfall-runoff modelling. The Primer. Ltd. John Wiley & Sons: Chichester, United Kingdom, 2001. 356 p.
4. Булавко А.Г. Водный баланс речных водосборов. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 304 с.
5. Клиге Р.К., Данилов И.Д., Конищев В.Н. История гидросферы. М.: Научный мир, 1998. 370 с.
6. Тихова Г.П., Придача В.Б., Сазонова Т.А., Павлов А.Г. Новый гибридный метод для измерения транспирационных потоков влаги у деревьев // Сибирский лесной журнал. 2017. № 4. С. 78–90.
7. Brutsaert W. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications. Springer: Dordrecht, Netherlands, 1982. 299 p.

8. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // *Известия РАН. Сер. геогр.* 2019. № 6. С. 126–140.
9. Cermak J., Kucera J., Nadezhkina N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands // *Trees*. 2004. Vol. 18. P. 529–546.
10. 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. Vol. 16. P. 1157–1169.
11. 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.
12. Oltchev A., Cermak J., Nadezhkina, N., Tatarinov, F., Tishenko, A., Ibrom, A., Gravenhorst G. Transpiration of a mixed forest stand: field measurements and simulation using SVAT models // *Boreal Environ. Res.* 2002. Vol. 7. P. 389–397.
13. Seibert J., Vis M. Teaching hydrological modelling with a user-friendly catchment-runoff-model software package // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. Vol. 16. P. 3315–3325.
14. Rango A., Martinec J. Revisiting the degree-day method for snowmelt computations // *Water Resour. Bull.* 1995. Vol. 31. P. 657–669.
15. Arneth 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. Vol. 16. P. 247–255.
16. 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. Vol. 193. P. 120–145.
17. 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. Vol. 303. P. 290–306.
18. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // *Trans. ASABE*. 2007. Vol. 50. P. 885–900

## References

1. Kirchner, J.W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resour. Res.* 2006, 42, W03S04.
2. Motovilov, Yu.G.; Gelfan, A.N. Runoff formation models in practice of river basins hydrology. Russian Academy of Sciences Publ.: Moscow, Russia, 2019; 300 p. (In Russian)
3. Beven, K. Rainfall-runoff modelling. The Primer. Ltd. John Wiley & Sons: Chichester, United Kingdom, 2001; 356 p.
4. Bulavko, A.G. Water balance of river basins. *Gidrometeoizdat: Leningrad, Russia*, 1971; 304 p. (In Russian)
5. Klige, R.K.; Danilov, I.D.; Konishev, V.N. History of hydrosphere. Scientific World Publishing House: Moscow, Russia, 1998; 370 p. (In Russian)
6. Tikhova, G.P.; Pavlov, A.G.; Pridacha, V.B.; Sazonova, T.A. The new hybrid method for measuring transpiration sap flows in trees. *Siberian Journal of Forest Science*. 2017, 4, 78–90. (in Russian with English abstract)
7. Brutsaert, W. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications. Springer: Dordrecht, Netherlands, 1982; 299 p.
8. Gubareva, T.S.; Gartsman, B.I.; Shamov, V.V.; Lutsenko, T.N.; Boldeskul, A.G.; Kozhevnikova, N.K.; Lupakov, S.Yu. Runoff components of small catchments in Sikhote-Alin: summarizing the results of field measurements and tracer modeling. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2019, 6, 126–140. (in Russian with English abstract)
9. Cermak, J.; Kucera, J.; Nadezhkina, N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*. 2004, 8, 529–546.
10. 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, 16, 1157–1169.
11. Gubareva, T.S.; Lupakov, S.Yu.; Gartsman, B.I.; Shamov, V.V.; Rubtsov, A.V.; Kozhevnikova, N.K. Possibilities of catchment's transpiration assessment based on sap flow measurements: the problem statement. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*. 2019. Т. 1, № 4. С. 504–532. (in Russian with English abstract)
12. Oltchev, A.; Cermak, J.; Nadezhkina, N.; Tatarinov, F.; Tishenko, A.; Ibrom, A.; Gravenhorst, G. Transpiration of a mixed forest stand: field measurements and simulation using SVAT models. *Boreal Environ. Res.* 2002, 7, 389–397.
13. Seibert, J.; Vis, M. Teaching hydrological modelling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012, 16, 3315–3325.
14. Rango, A.; Martinec, J. Revisiting the degree-day method for snowmelt computations. *Water Resour. Bull.* 1995, 31, 657–669.
15. Arneth, 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, 16, 247–255.

16. 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, 193, 120–145.
17. 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, 303, 290–306.
18. Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*. 2007, 50, 885–900.