



## Водопотребление деревьев *тополя белого* в системах защитных лесополос в Центральной Азии: тематическое исследование в Чуйской долине в юго-восточной части Казахстана

Ева Штрэнге<sup>1</sup>, Нильс Тевс<sup>2\*</sup>, Кумар Алиев<sup>2</sup>, Максат Ераалиев<sup>3</sup>, Петра Ланг<sup>3</sup>, Азим Байбагысов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Венский технический университет, Вена, Австрия

<sup>2</sup>Всемирный центр агролесоводства, Центральноазиатский офис, Бишкек, Кыргызстан

<sup>3</sup>Трирский университет, Трир, Германия

<sup>4</sup>Казахский национальный университет, Алматы, Казахстан

\* Ответственный автор

Электронная почта: [N.Thevs@cgiar.org](mailto:N.Thevs@cgiar.org)

IRSTI 37.27.29

doi: 10.29258/CAJWR/2018-RI.v4-1/54-70.rus

Данная версия является переводом статьи « Water consumption of Populus alba trees in tree shelterbelt systems in Central Asia – a case study in the Chui Valley, South Eastern Kazakhstan», опубликованной в журнале 22 ноября 2018 г.

### Аннотация

В Центральной Азии (ЦА) сельское хозяйство в значительной степени зависит от ирригации. Забор воды осуществляется из рек региона, которые преимущественно берут начало в снежниках и ледниках. Предполагается, что в результате глобального потепления эти водные ресурсы значительно сократятся, что лишь усугубит текущий дефицит воды. Согласно данным системы защитных лесополос – наиболее распространенный тип агролесоводства в ЦА – способствуют сокращению потребления воды в орошаемом земледелии. Тополь белый (*Populus alba*) является одной из главных пород деревьев, применяемых при организации защитных полос в Центральной Азии. Тем не менее, исследования по водопотреблению защитными полосами отсутствуют. Поэтому цели настоящего исследования заключались в (1) изучении водопотребления деревьями тополя белого в системе защитных полос в ЦА и (2) анализе влияния местных климатических условий на движение сока в защитной полосе. В июне-июле 2016 г. в Чуйской долине на юго-востоке Казахстана была проведена оценка водопотребления деревьями посредством измерения движения сока в трех деревьях в лесополосе для защиты сельскохозяйственных культур. Среднесуточное потребление воды деревьями составило 187,6 л/день, 44,8 л/день и 160 л/день соответственно. Данные результаты были экстраполированы на репрезентативный участок защитной полосы. Потребление воды на нем составило 7,8 мм/день, а среднее значение эвапотранспирации (ЕТо) – 5,3 мм/день. Наблюдалось значительное влияние на движение сока дефицита насыщенности воздуха водяным паром, температуры воздуха и относительной влажности. Определенную роль играло и солнечное излучение, в то время как влияние скорости ветра на потребление воды деревьями было незначительным или вовсе отсутствовало.

**Ключевые слова:** агролесоводство, защитная лесополоса, тополь белый, движение сока, потребление воды в растениеводстве, Центральная Азия.

**Тип статьи:** научная статья

## 1. Введение

В странах Центральной Азии (ЦА) сельское хозяйство является одним из основных компонентов ВВП (<https://data.worldbank.org/indicator/NV.AGR.TOTL.ZS?view=chart>) и работодателей (<https://data.worldbank.org/indicator/SL.AGR.EMPL.FE.ZS?view=chart>), равно как и играет значимую роль в обеспечения продовольственной безопасности (напр., [https://docs.wfp.org/api/documents/WFP0000072415/download/?\\_ga=2.113481472.661130014.1531883056-81150002.1502173922](https://docs.wfp.org/api/documents/WFP0000072415/download/?_ga=2.113481472.661130014.1531883056-81150002.1502173922)). Ввиду полузасушливых и засушливых климатических условий сельское хозяйство существенно зависит от ирригационной воды, забор которой осуществляется из рек региона (Кунце и др., 2010). Основным источником речной воды являются ледники и снежники окружающих гор (АБР, 2010; Унгер-Шаестех и др., 2013). Повышение температуры в условиях глобального потепления вызывает таяние ледников и снежников (Карте, 2017). В результате этого ожидается усугубление уже имеющегося дефицита воды и связанных с ним конфликтов среди водопользователей, а также между экономическими и природоохранными целями (АБР, 2010; Унгер-Шаестех и др., 2013; Чанкунь и др., 2015). Это особенно затронет зависимое от воды сельское хозяйство, как, например, было показано Унделандом [Undeland] для Кыргызстана (2015). Агроресурсоохранные системы, в частности, защитные лесополосы, могут способствовать сокращению водоемкости орошаемого земледелия и обеспечивать фермеров дополнительным доходом (Тевс и др., 2017). Водопотребление сельскохозяйственными культурами сокращается, поскольку защитные полосы снижают скорость ветра. Скорость ветра снижается на 30-40% рядом с защитной полосой и на 20% на больших расстояниях, в 8 раз превышающих ее высоту (Хана и др., 1997; Миллер и др., 1975). Было установлено, что сокращение эвапотранспирации сельскохозяйственных культур колебалось в пределах 15-30%, а урожайность повышалась (Васильев, 1980; Степанов, 1987). Соответствующие системы защитных полос имеют длительную историю использования в регионе ЦА и широко применялись во времена Советского Союза (Джанибеков и др., 2016).

Однако после распада Советского Союза и обретения независимости центральноазиатскими государствами большинство таких лесополос были вырублены – существовавшие ранее системы централизованного энергоснабжения прекратили свое существование, и население перешло к использованию древесного топлива в качестве основного источника энергии. Сегодня защитные полосы в качестве целевого инструмента борьбы с эрозией, улучшения микроклимата в сельскохозяйственных целях и содействия обеспечению лесоматериалами включены в национальные стратегии развития всеми странами ЦА (ЕЭК ООН, 2018 и дополнительная связанная с этим литература).

Исследования воздействий от использования защитных полос в ЦА, проведенные до настоящего времени, в основном игнорировали вопрос водопотребления деревьями в составе соответствующих систем. В таком засушливом регионе, как Центральная Азия,

знания о потреблении воды защитными полосами имеют важное значение для планирования водораспределения при их повторном создании. При организации лесополос для защиты орошаемых земель в регионе часто используется такая древесная порода как *тополь белый* (Булычев и Онищенко, 1979). Таким образом, цели настоящего исследования заключались в (1) исследовании характеристик движения сока в деревьях *тополя белого* в системах защитных полос в ЦА и (2) анализе влияния местных климатических условий на движение сока в защитной полосе.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Район исследования

Район исследования расположен недалеко от аула имени Карасай батыра в Кордайском районе в юго-восточной части Казахстана (географические координаты: 42,38°N и 75,66°E, высота н.у.м. 1095 м). Данный регион относится к верхней Чуйской долине, простирающейся от участка границы между Кыргызстаном и Казахстаном до Бишкека, столицы Кыргызстана (Попов и др., 2009; Акималиев и др., 2013). Природные условия в регионе определяются рекой Чу (Шу), сформировавшей низкогорный ландшафт долины в диапазоне высот от 700 до 1200 метров н.у.м. Ввиду относительно плоского рельефа и плодородности почв территория долины находится в активном сельскохозяйственном использовании (Шулер, 2007). Забор ирригационной воды осуществляется из реки Чу по ирригационным каналам в Казахстане и Кыргызстане. Местный климат резко континентальный от полусухого до засушливого (Акималиев и др., 2013). На это указывают данные с ближайшей к району исследования климатической станции Токмак (Табл. I). Во время исследования в ветровом режиме в течение ночи, утром и до полудня преобладали дневные циклы восточного направления, а с полудня до вечера – западного.

**Таблица I.** Климатические данные климатической станции Токмак за период с 2006 по 2016 гг. ([https://rp5.ru/Wetterarchiv in Tokmok](https://rp5.ru/Wetterarchiv_in_Tokmok)).

Средняя годовая т-ра [°C]	Средняя т-ра в январе [°C]	Средняя т-ра в июле [°C]	Годовое кол-во осадков [мм]	Средняя скорость ветра [м/с <sup>-1</sup> ]	Средняя влажность воздуха [%]
11,6	-2,7	24,8	522	1,2	63,72

В советское время была создана система защитных полос 250x250 м, которые состояли из таких древесных пород, как *тополь белый*, *тополь черный пирамидальный* (*P. nigra pyramidalis*) и *акация* (*Acacia*). В целевом селе наиболее широко использовался *тополь белый*. На расположенных между полосами полях высаживались плодовые деревья, пшеница, кукуруза и картофель. В настоящее время большинство полей используются в качестве пастбищ или для выращивания люцерны. Большинство защитных полос по-

вреждены, т.е. в результате вырубki между отдельными деревьями и группами деревьев существуют промежутки. Защитная полоса, выбранная для замера водопотребления деревьями в рамках настоящего исследования (Рис. 1), состояла из двух рядов деревьев – преимущественно *тополя белого*, нескольких деревьев *тополя черного пирамидального* и отдельных деревьев *акации*. Лесополоса протяженностью 200 м со средней высотой деревьев 16,5 м простиралась с севера на юг. Выбранный отрезок был выбран в качестве репрезентативного и «неповрежденного» ввиду относительно равномерной высоты деревьев, непрерывности и наличия постоянного водного питания благодаря расположенному рядом с ним ирригационному каналу.



**Рисунок 1.** Расположение целевой защитной полосы в ауле имени Карасай батыра (красная булавка). Изображение сохранено: 21 мая 2016 г. (Google Earth).

## 2.2. Измерения движения сока

Для измерения потребления воды деревьями в защитной полосе было выбрано три дерева *тополя белого*. Они представляют собой многообразие деревьев в данной защитной полосе. Соответствующие данные по деревьям представлены в Табл. II.

**Таблица II.** Характеристики выбранных деревьев *тополя белого*.

№ дерева	Высота (м)	Возраст (лет)	Площадь кроны (м <sup>2</sup> )	ДВН (см)	Площадь ксилемы (см <sup>2</sup> )
1	16	27	39,1	42,6	874,6
2	16,4	14	11,1	19,2	183,3
3	15,2	19	62,3	31,5	553,8

Потребление воды деревьями в защитной полосе оценивалось посредством измерения движения сока методом оценки термической диссипации Гранье (1987) с использованием системы PROSALOG немецкой компании UP GmbH. Таким образом, с северной стороны каждого дерева в заболонь на высоте 1,4 м и 1,5 м соответственно в радиальном направлении было вставлено по два датчика. Нижний датчик выдавал тепловой импульс продолжительностью 1 мин. Затем регистрировалась разница температур между двумя датчиками. Эта процедура повторялась каждые 10 мин. (Гиберт и др., 2006; Любчинский и др., 2012). Разницы температур были преобразованы в значения плотности потока сока путем определения максимальной разницы температур и тем самым минимального движения сока в течение двухнедельных периодов. Для определения моментов времени возникновения максимальных разниц температур был рассчитан дефицит упругости водяного пара (VPD) на основе скорректированных климатических данных, полученных со станции Токмак. Уравнение для расчета плотности потока сока имело следующий вид:

$$u = 0.714 \left( \left( \frac{dT_{\text{ночн.}}}{dT_{\text{факт.}}} \right) - 1 \right)^{1.231} \quad (1)$$

, где  $u$  = плотность потока сока (мл см<sup>-2</sup> мин<sup>-1</sup>) и  $dT$  = разницы измеренных температур (°C).

Впоследствии значения плотности потока сока были экстраполированы на всю площадь охвата на основе расчетов площади движения сока деревьев *тополя белого* на высоте нагретого сенсорного датчика. Ширина ксилем деревьев определялась визуально по двум перпендикулярным образцам ядра древесины, извлеченным с помощью 5 мм древесного пробоотборника Suunto. Значения ширины ксилем использовались для расчета площади движения сока.

Движение сока регистрировалось с 15 июня по 3 августа 2016 г. для отображения летних климатических условий с максимальным потреблением воды в течение данного периода роста. Листья появились в начале апреля. Первое пожелтение листьев наблюдалось в начале октября с ее полным опаданием до 24 октября. Недостающие данные бы-

ли заполнены исключительно в отношении суточных значений движения сока на основе уравнений регрессии между VPD и плотностью потока сока.

Для экстраполяции движения сока в контролируемых деревьях на всю защитную полосу был выбран 25-метровый отрезок защитной полосы. На нем был измерен диаметр на высоте груди (DBH) и ширина ксилемы у 25 случайно выбранных деревьев в защитной полосе. Последующее регрессивное уравнение между DBH и площадью заболони выявило следующую взаимосвязь:  $SA = 0,4301 \text{ DBH}^2 + 0,235 \text{ DBH}$ , где SA = площадь заболони и  $R^2 = 0,94$ . Кроме этого, значения DBH всех деревьев на данном 25-метровом отрезке были нанесены на карту для приблизительного расчета SA на основе регрессивного уравнения для всех деревьев. Движение сока в целевой 25-метровой защитной полосе было рассчитано на основе средней плотности потока сока трех контролируемых деревьев и приблизительно рассчитанной SA. Данные расчеты позволили определить потребление воды на целевом отрезке в литрах в течение заданного промежутка времени, например, за сутки. Для сравнения потребления воды в данной защитной полосе с потреблением воды в растениеводстве, которое обычно указывается в мм, т.е. в литрах/м<sup>2</sup>, потребление воды в защитной полосе также было конвертировано в мм. Таким образом, совокупная площадь кроны данного отрезка защитной полосы измерялась с помощью проекции кроны, а потребление воды в защитной полосе (в литрах) было разделено на площадь кроны (в м<sup>2</sup>) для пересчета потребления воды из литров в мм.

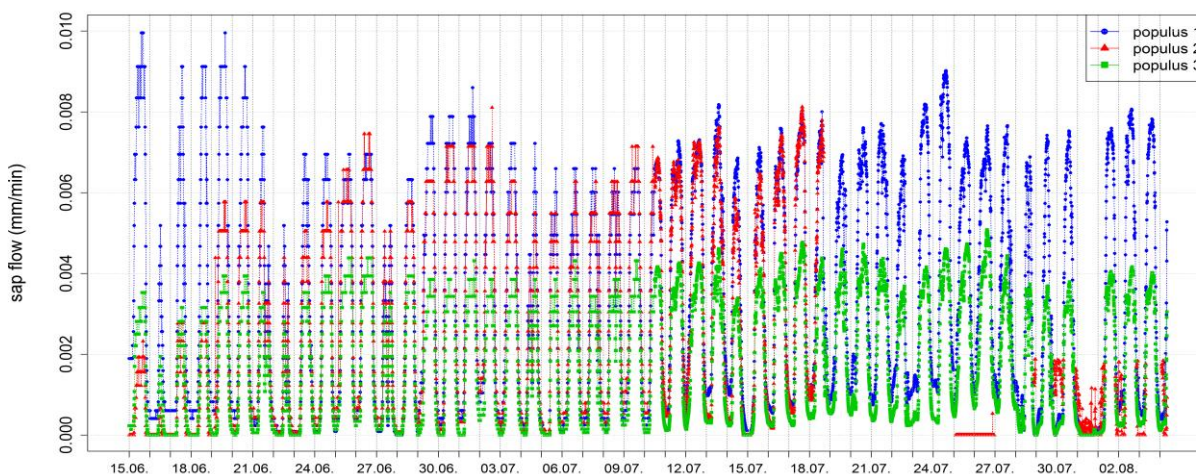
Местный климат оценивался в точке, расположенной на расстоянии 160 м к востоку от защитной полосы. Она была самой стойкой к воздействию и доступной для климатической станции в данном конкретном месте. Для восточного ветра, который преобладал в течение ночи и до полудня, эта климатическая станция демонстрировала неподверженную воздействию скорость ветра, в то время как для западного ветра предполагалось, что измеренная скорость будет немного меньше в сравнении со скоростью ветра, на которую не влияет защитная полоса. Тем не менее, измеренная скорость ветра отображает скорость, влияющую на деревья в защитной полосе, ввиду наличия насаждения плодовых деревьев (средняя высота деревьев 5 м), снижающего скорость западного ветра (Рис. 1). Все следующие климатические характеристики были измерены с помощью датчиков METEOR, США: относительная влажность воздуха и температура воздуха (VP-4), солнечное излучение (модель PYR), скорость и направление ветра (акустический анемометр DS2). Данные фиксировались с помощью устройства регистрации данных EM50 с точностью до одной минуты. Затем эти данные были сгруппированы до значений за 10 минут для сопоставления с данными по движению сока. Климатические данные измерялись с 28 мая по 14 июня, с 28 июня по 10 июля, с 26 июля по 4 августа и с 21 августа по 25 сентября, чтобы не мешать выполнению сельскохозяйственных работ. Эти климатические данные использовались для согласования связей с соответствующими климатическими данными, полученными со станции Токмак, и заполнения недостающих повседневных климатических данных (Тевс и др., 2017). Заполненные данные использовались для расчета эталонной эвапотранспирации (ETo) согласно Аллену и др., (1998) как описано для данного конкретного объекта Тевсом и др., (2017). ETo

была рассчитана для применения в качестве широко используемого эталона, с которым можно было бы сопоставить потребление воды тополиными деревьями и защитными полосами.

### 3. Результаты

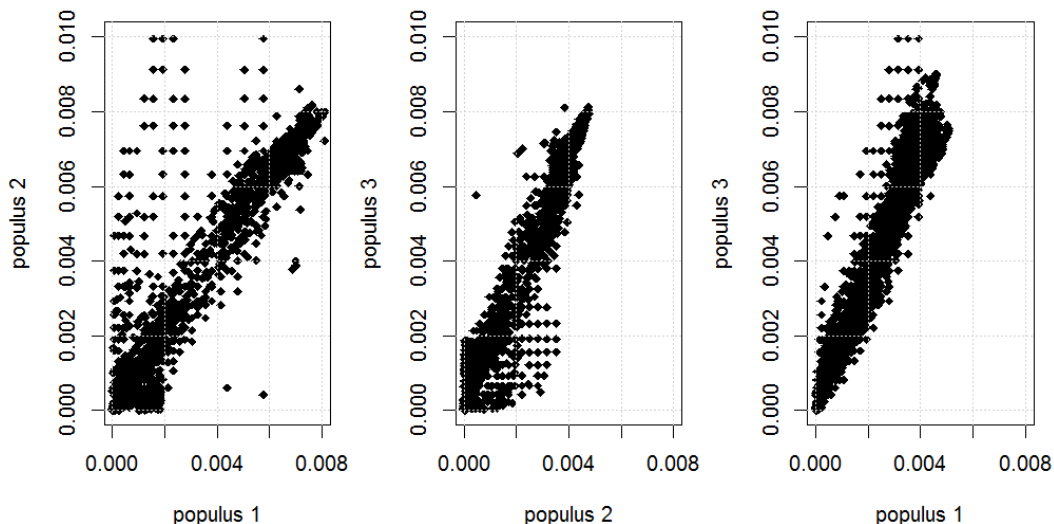
#### 3.1. Движение сока в тополе белом

Значения движения сока (SF) были рассчитаны в литрах в день и мм в день для общей оценки потребления воды выбранными деревьями *тополя белого* и для сравнения среди отдельных деревьев в системе защитных полос. На Рис. 2 представлены значения движения сока в течение всего периода измерений. Значения движения сока всех деревьев *тополя белого* варьируются в диапазоне от 0 до 0,01 мм/мин. с типичными суточными колебаниями максимальных значений около полудня, за которыми следуют относительно постоянные высокие значения до 19:00 с последующим снижением до 23:30. Диапазон значений SF составлял от 3,5 л/день до 310,4 л/день, от 0,8 л/день до 69,6 л/день и от 3,0 л/день до 262,8 л/день для деревьев №1, 2 и 3 соответственно. Средние значения SF составили 187,6 л/день, 44,8 л/день и 160,0 л/день соответственно. Эти значения, выраженные в мм в день, варьировались от 0,09 мм до 7,9 мм, 0,07 мм до 6,3 мм и от 0,05 мм до 4,2 мм для деревьев №1, 2 и 3 соответственно, со средними значениями 4,8 мм, 4,0 мм и 2,6 мм.



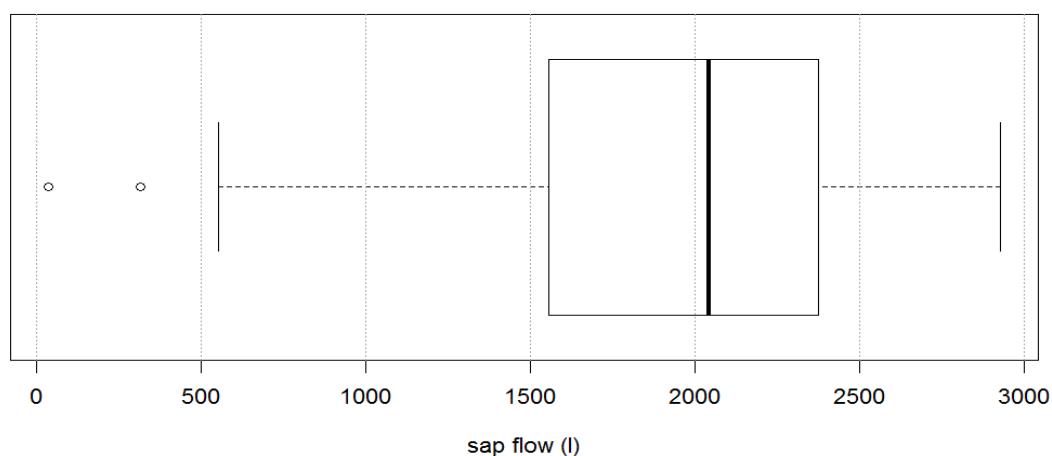
**Рисунок 2.** Значения движения сока в мм/мин. трех деревьев *тополя белого* (2016).

Было установлено, что 75% суточных значений SF деревьев №1, 2 и 3 варьировались в диапазоне от 4,0 до 5,9 мм/день, от 3,0 до 5,4 мм/д и от 2,1 до 3,2 мм/день соответственно. Самые высокие значения SF были зафиксированы в конце июля для деревьев №1 и 3 и в середине июля для дерева №2. Значения SF трех выбранных *тополей белых* вели себя аналогичным образом и между деревьями наблюдалась тесные взаимосвязи,  $R^2 = 0,91$  и  $R^2 = 0,87$  дерева №3 с деревьями №1 и 2 соответственно (Рис. 3). Взаимосвязь дерева №1 в сравнении с деревом №2 составила  $R^2 = 0,73$ .



**Рисунок 3.** Разбросы значений движения сока в мм в минуту выбранных деревьев *тополя белого*. Деревья №1 и 2 (слева), деревья №2 и 3 (в центре), деревья №1 и 3 (справа).

Движение сока, экстраполированное на 25-метровый отрезок защитной полосы, составило в среднем 1921 л/день и варьировалось между 36 л/день и 2927 л/день (Рис. 4).

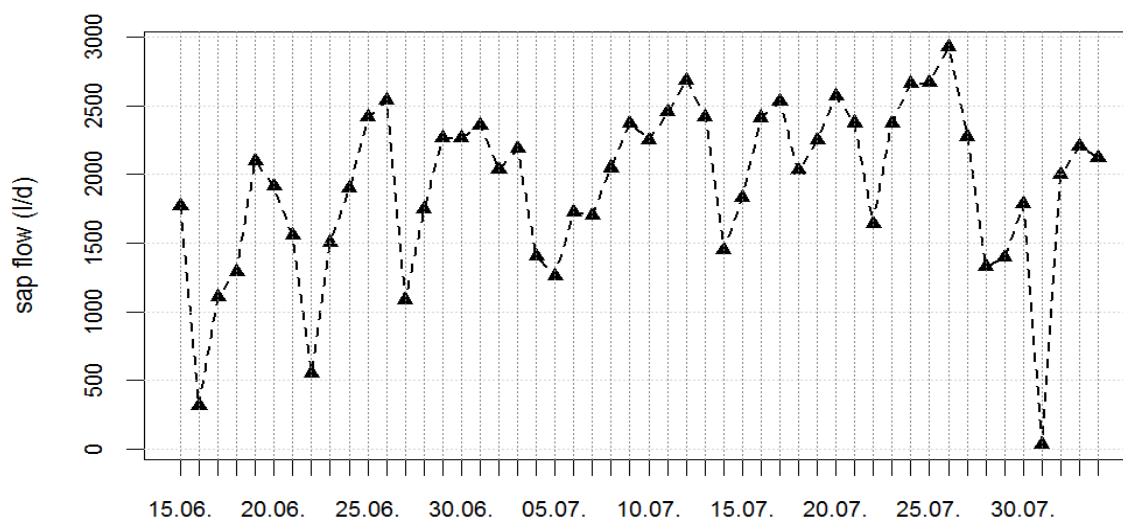


**Рисунок 4.** Блочная диаграмма экстраполированного движения сока в системе защитной полосы длиной 25 м, выраженная в литрах в день, исходя из предположения о наличии только деревьев *тополя белого*. Расчеты основаны на средней плотности потока сока трех выбранных деревьев *тополя белого* и регрессивном уравнении между DBH и SA 25 произвольно выбранных деревьев в защитной полосе, представляющих весь 25-метровый отрезок.

Значения SF защитной полосы демонстрируют тенденцию к росту с начала периода измерения в середине июня и до 26 июля (Рис. 5). Резкое снижение 31 июля совпадает с



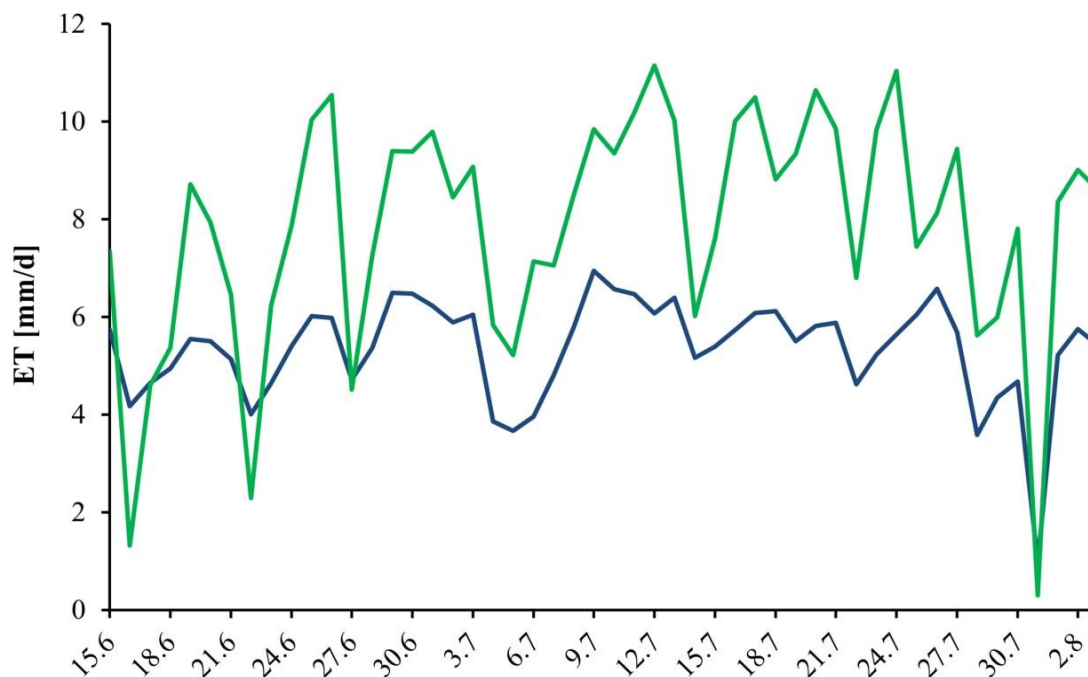
днем полной облачности и непрерывного выпадения осадков согласно данным климатической станции Токмак.



**Рисунок 5.** Экстраполированные значения движения сока на 25-метровом отрезке защитной полосы (л/день) в 2016 г.

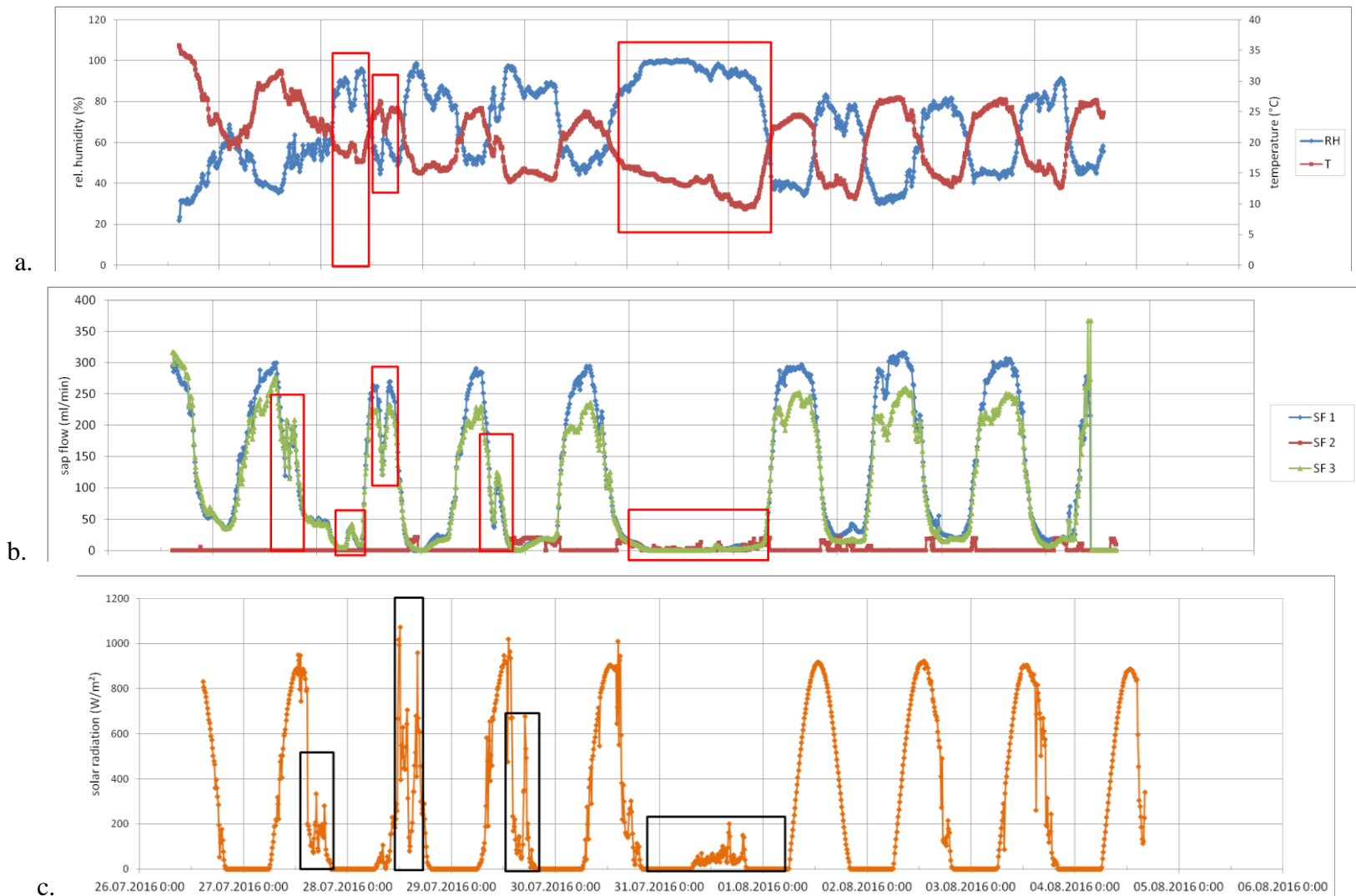
### 3.2. Влияние местного климата на движение сока

Потребление воды на 25-метровом отрезке защитной полосы соответствовало тенденции  $E_{To}$ , как показано на Рис. 6. При этом, разницы между максимальными и минимальными значениями потребления воды защитной полосой значительно превышали соответствующие разницы  $E_{To}$ . В течение большинства дней потребление воды превышало  $E_{To}$ . В среднем потребление воды составляло 7,8 мм/день, тогда как  $E_{To}$  – 5,3 мм/день. В течение четырех дней потребление воды в защитной полосе было ниже  $E_{To}$ . Согласно данным станции Токмак в течение всех этих дней сохранялась дождливая и пасмурная погода со 100% облачностью в течение всего дня. Максимальная температура была ниже, а минимальная влажность воздуха выше, чем в течение соседних дней, т.е. 31 июля максимальная температура составляла 17°C в сравнении с более чем 25°C в соседние дни.



**Рисунок 6.** ЕТо (Тевс и др., 2017) синим и потребление воды в защитной полосе зеленым в мм/день в течение прошлого периода роста в 2016 г.

На Рис. 7 представлено визуальное сравнение двух периодов измерений движения сока и климатических характеристик, таких как относительная влажность (RH), температура воздуха (T), солнечное излучение (Rs) и скорость ветра (ws) с 26 июля по 4 августа. В течение выбранного периода измерений выпал второй датчик для измерения движения сока. В целом не наблюдалось никакой связи между скоростью ветра и SF, в то время как между RH и T с SF наблюдалась заметная взаимосвязь 28 июля, 31 июля и 1 августа (Рис. 7, а и б). Краткосрочные изменения RH и T вызывали обратную реакцию SF. Временной шаг между изменениями RH и SF составлял примерно 30 минут. Связи между Rs и SF, снижение Rs с последующим сокращением SF, наблюдались 27, 28, 29 и 31 июля и продемонстрировали аналогичное временное запаздывание (Рис. 6, b и c).



**Рисунок 7.** Измерения RH и T (a), SF трех деревьев тополя белого (SF1, SF2, SF3; b) и Rs (c) с 26 июля до 4 августа 2016 г. Ячейки обозначают временные периоды визуального сравнения SF и климатических характеристик.

Как правило, климатические факторы VPD, T, Rs и ws коррелировали положительно, в то время как RH с SF – отрицательно. Самые высокие корреляции были выявлены между VPD и SF с  $R^2 = 0,92$  и  $R^2 = 0,88$  для деревьев №1 и 3 соответственно. Второй по значимости была корреляция между SF и T для дерева №2 с  $R^2 = 0,79$ . Между SF и климатическими характеристиками деревьев №1 и 3 наблюдался следующий порядок корреляции в порядке убывания: VPD > T > RH > Rs >> ws. 2-е дерево продемонстрировало следующий порядок корреляции: T > VPD > Rs > RH >> ws. При соотношении скорости ветра с движением сока всех трех контролируемых деревьев наблюдались весьма низкие коэффициенты детерминации между  $R^2 = 0,16$  и  $R^2 = 0,18$ .

#### 4. Обсуждение и заключение

Результаты анализа SF выбранных деревьев *тополя белого* продемонстрировали типичные суточные колебания с относительно постоянным высоким значением SF в дневное время, что свидетельствует об общем высоком потреблении воды деревьями. Диапазон SF от 0,05 мм до 7,9 мм в день для всех трех контролируемых деревьев со средними значениями 4,8 мм, 4,0 мм и 2,6 мм для деревьев №1, 2 и 3 соответственно хорошо согласуется с другими исследованиями движения сока в тополиных деревьях (Мейрезонне и др., 1999). Максимальное значение SF всех трех контролируемых деревьев в июле также совпадает с результатами согласно Сюю и др. (2010) и демонстрирует сезонную тенденцию к увеличению водопотребления до пикового значения в середине-конце июля. Невзирая на разные диапазоны SF деревьев *тополя белого*, которые связаны с разными площадями ксилем и крон деревьев, четко просматривалась аналогичная схема SF всех контролируемых деревьев. Поскольку значение SF выбранных деревьев поддавалось сравнению, предполагалось, что оно характерно для выбранной защитной полосы. Таким образом, стало возможным экстраполировать SF трех контролируемых деревьев на весь исследуемый участок.

Связи между климатом и SF были выявлены преимущественно для VPD, T, RH и в меньшей степени для Rs. При этом, VPD представляет собой сочетание RH и T. Другие исследователи подчеркивали наличие аналогичных тесных связей между этими климатическими факторами и SF (Чжоу и др., 2014; Ма и др., 2011; Чжан и др., 2011). Кроме того, Чжоу и др. (2014) также сообщали о 10-минутной временной задержке между изменениями климатических данных и реакцией SF у тополиных деревьев в Китае. Эта временная задержка указывает на запоздалую реакцию тополиных деревьев на изменения окружающей среды. Связи между скоростью ветра и SF были слабыми. Это контрастирует со значительным влиянием скорости ветра на эвапотранспирацию сельскохозяйственных культур, отраженную в расчетах ETo и ETc Аллана и др. (1998). Ветер снижает сопротивление граничной поверхности между листом и окружающим его воздухом, что приводит к более высоким потерям воды растением (Грейс, 1988; Дрейк и др., 1970). Однако выводы о наличии связей между водопотреблением деревьями и климатическими характеристиками совпадают с выводами Джарвиса (1985), который с

точки зрения их транспирации дифференцировал парные (зависимые) и непарные (независимые) растения. К первой группе относятся растения, транспирация которых в значительной степени обусловлена VPD, в то время как транспирация во второй группе преимущественно вызвана поступающим излучением. Из-за их высоты, транспирация деревьев, как правило, сильно зависит от VPD. С другой стороны, Лундблад и Линдрот (2002) обнаружили множество вариантов зависимости и независимости в границах одного и того же леса с аналогичными породами деревьев. Это соответствует выводу о том, что  $R_s$  также демонстрирует наличие связи с движением сока, что указывает на частичную зависимость деревьев *тополя белого* от VPD. Более высокие скорости ветра приводят к усилению связи транспирации с дефицитом насыщенности воздуха водяным паром. При этом, связь значительно меняется при скоростях ветра от 1 м/с до 5 м/с (Джарвис, 1985). Поскольку скорости ветра в этом исследовании были ниже 2,5 м/с, возможно, они были слишком низкими для того, чтобы приводить к значительным изменениям транспирации и движения сока.

Защитные полосы из деревьев *тополя белого* являются существенными водопотребителями. Это необходимо учитывать при создании систем защитных полос, несмотря на частое указание на их преимущества. При скоростях ветра, аналогичным зарегистрированным в рамках настоящего исследования, т.е. до 2,5 м/с, защитная полоса из деревьев *тополя белого* помогает снизить скорость ветра и, таким образом, водопотребление сельскохозяйственными культурами, в то время как ее собственное водопотребление не увеличивается в зависимости от скорости ветра. Открытым остается вопрос о поведении *тополя белого* при более высокой скорости ветра. При принятии решений о создании защитных полос в условиях более быстрого ветра необходимо также учитывать потенциальную защиту от ветровой эрозии.

## 5. Благодарность

Настоящее исследование было проведено при поддержке Федерального министерства экономического сотрудничества и развития Германии через Консультативную службу по сельскохозяйственным исследованиям в целях развития (BEAF) при Германском обществе международного сотрудничества (GIZ). GIZ/BEAF профинансировали 6-месячную стажировку Евы Штрэнге для сбора данных по движению сока. GIZ/BEAF финансировали деятельность Нильса Тевса в качестве эксперта-координатора во Всемирном центре агролесоводства. GIZ/BEAF также частично оплатили расходы на оборудование для измерения движения сока и климатических станций.

## 6. Вклад авторов

Ева Штрэнге выполнила большую часть работ по сбору и анализу данных и написала большую часть рукописи.

Нильс Тевс внес вклад в анализ данных, в частности, масштабирование значений движения сока до водопотребления защитной полосой, а также отредактировал значительную часть рукописи.

Кумар Алиев внес вклад в редактирование текста статьи на английском и русском языках.

Максат Ераалиев внес вклад в анализ данных посредством расчетов и анализа ЕТо.

Петра Ланг внесла вклад в концептуализацию измерений движения сока.

Азим Байбагисов предоставил информацию о районе исследования и сопоставил местные условия с результатами исследования.

**7. Конфликт интересов:** авторы не заявляют о наличии конфликта интересов.

## 8. Список литературы

1. АБР (2010). Атлас Центральной Азии [*Central Asia Atlas*], Манила, Филиппины, АБР [Эл. ресурс]. Доступен: [www.adb.org/projects/CACILM](http://www.adb.org/projects/CACILM);
2. Акималиев, Д.А., Зауров, Д.Е. и Айзенман, С.В. (2013). География, климат и растительность Кыргызстана, [*The Geography, Climate and vegetation of Kyrgyzstan*] в: Акималиев, Д.А. (ред.), Лекарственные растения Центральной Азии: Узбекистан и Кыргызстан [*Medical Plants of Central Asia: Uzbekistan and Kyrgyzstan*], Springer, Хайдельберг, с. 10-32;
3. Аллен, Р.Дж., Перейра, Л.С., Раес, Д. и Смит, М. (1998). Эвапотранспирация сельскохозяйственных культур: руководство по расчету норм полива для сельскохозяйственных культур [*Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*], Документ ФАО по вопросам ирригации и осушения земель 56, ФАО, Рим;
4. Булычев, А.С. и Онищенко, Л.П. (1979). Ветроломы для защиты полей в Чуйской долине и их эффективность [*Field protection wind-breaks in Chuy valley and their efficiency*], Фрунзе;
5. Чанкунь, М., Лин, С., Шиинь, Л., Мин-Ан, С. и И, Л. (2015). Влияние изменения климата на русловый сток в ледниковом бассейне реки Чу, Центральная Азия [*Impact of climate change on the streamflow in the glacierized Chu River Basin, Central Asia*], *Journal of Arid Land*, том 7, с. 501-513;
6. Джанибеков, У., Вильямор, Г.Б., Джакыпбекова, К., Чемберлен, Дж. и Сюй, Ц. (2016). Принятие концепции устойчивого землепользования в постсоветской Центральной Азии: доводы в пользу агролесоводства [*Adoption of Sustainable Land Uses in Post-Soviet Central Asia: The Case for Agroforestry*], *Sustainability*, Том 8, с. 1030 [Эл. ресурс]. Доступен: <http://dx.doi.org/10.3390/su8101030>;
7. Дрейк, Б.Дж., Рашке, К. и Солсбери, Ф.Б. (1970). Температура и сопротивление транспирации листьев дурнишника под воздействием температуры воздуха, влажности и скорости ветра [*Temperatures and Transpiration Resistances of Xanthium Leaves as Affected by Air Temperature, Humidity, and Wind Speed*], *Plant Physiology*, том 46, с. 324-330;
8. Гиберт, Д., Ле Муэль, Ж., Лэмс, Л., Никллин, Ф. и Перье, Ф. (2006). Движение сока и суточное изменение электрического потенциала ствола дерева [*Sap flow*

- and daily electric potential variations in a tree trunk*], *Plant Science*, том 171, с. 572-584;
9. Грейс, Дж. (1988). Реакция растений на ветер [*Plant response to wind*], *Agriculture, Ecosystems and Environment*, том 22/23, с. 71-88;
  10. Гранье, А. (1987). Оценка транспирации древостоя лжетсуги посредством измерений движения сока [*Evaluation of transpiration Douglas Fir stand by means of sap flow measurements*], *Tree Physiology*, том 3, с. 309-320;
  11. Хана, К.О., Махджуб, Р.Х. и Хуссейн, С.Г. (1997). Влияние защитной полосы на температуру почвы, влажность почвы и урожайность овощей в полупустынной среде вдоль штата реки Нил, Судан [*Effects of Shelterbelt on Soil Temperature, Soil Moisture and Vegetable Yield in a Semi-desert Environment along the River Nile State, Sudan*], Институт по изучению проблем опустынивания и окультуривания пустынь, Хартумский университет, Шамбат, Судан;
  12. Джарвис, П.Г. (1985). Транспирация и ассимиляция деревьев и сельскохозяйственных культур: «Омега-фактор» [*Transpiration and Assimilation of Tree and Agricultural Crops: The 'Omega Factor'*], в Кеннелл М.Г.Р. и Джексон Дж.И. (Ред.), Характеристики деревьев как сельскохозяйственных культур [*Attributes of Trees as Crop Plants*], Институт экологии суши, Хантингдон, с. 460-480;
  13. Карте, Д. (2017). Экологические изменения в засушливых районах Центральной и Восточной Азии и их воздействие на крупные озера Центральной и Восточной Азии и на основные речно-озерные системы [*Environmental Changes in Central and East Asian Drylands and their Effects on Large Central and East Asian Lakes and their Effects on Major River-Lake Systems*], *Quaternary International* [Эл. ресурс]. Доступен: <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2017.01.041>;
  14. Кунце, Т., Гронау, Л. и Халаш, М. (2010). Дефицит воды и изменение климата в Центральной Азии [*Wasserknappheit und Klimawandel in Zentralasien*], *Länderbericht, Konrad-Adenauer-Stiftung e.V.*;
  15. Любчинский, М.В., Чаварро-Ринкон, Д., Рой, Дж. (2012). Новейший метод циклического рассеивания тепла для коррекции естественных температурных градиентов при измерении движения сока. Часть 1. Теория и применение [*Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients in sap flow measurements. Part 1. Theory and application*], *Tree Physiology*, том 32, с. 894-912;
  16. Лундبلاد, М. и Линдрот, А. (2002). Транспирация древостоя и плотность потока сока в зависимости от погоды, влажности почвы и характеристик древостоя [*Stand transpiration and sapflow density in relation to weather, soil moisture and stand characteristics*], *Basic and Applied Ecology*, том 3, с. 229-243;
  17. Ма, Ц., Чэнь, Ю., Ли, В., Хуан, С., Чжу, Ц. и Ма, С. (2011). Характеристики движения сока четырех типичных пород в пустынных лесах и их реакция на экологические факторы [*Sap flow characteristics of four typical species in desert shelter forest and their responses to environmental factors*], *Environmental Earth Science*, том 67, с. 151-160;

18. Мейрезонне, Л., Надеждин, Н., Чермак, Дж., Ван Сликен, Дж. и Кулеманс, Р. (1999). Измеренное движение сока и имитация транспирации с тополиного древостоя во Фландрии (Бельгия) [*Measured sap flow and simulated transpiration from a poplar stand in Flanders (Belgium)*], *Agricultural and Forest Meteorology*, том 96, с. 165-179;
19. Миллер, Д. Р., Розенберг, Н.Й. и Багли, У. Т. (1975). Снижение скорости ветра с помощью высокопроницаемой древесной защитной полосы [*Wind reduction by a highly permeable tree shelterbelt*], *Agriculture Meteorology*, том 14, с. 321-333;
20. Попов, Л.Е., Бассетт, М.Дж., Жемчужников, В.Г., Хольмер, Л.Е. и Клишевич, И. А. (2009). Тектонические предпосылки и данные по сигнатурам гондванской фауны из раннего палеозойского ландшафта Казахстана и Центральной Азии [*Gondwanan faunal signatures from Early Palaeozoic terranes of Kazakhstan and Central Asia evidence and tectonic implications*], *Geological Society London Special Publications*, том 325, с. 23-64;
21. Шулер, С. (2007). Схемы миграции населения в Кыргызстане [*Migration Patterns of the Population in Kyrgyzstan*], *Espace, Populations, Societies*, том 1, с. 73-89;
22. Степанов, А.М. (1987). Агролесомелиорация орошаемых земель, [*Agroforestry Melioration in Irrigated Lands*], Агропромиздат, Москва, 1987;
23. Тевс, Н., Штрэнге, Е., Алиев, К., Ераалиев, М., Ланг, П., Байбагысов, А. и Сюй, Ц. (2017). Защитные лесные полосы как элемент совершенствования управления водными ресурсами в Центральной Азии [*Tree shelterbelts as an element to improve water resource management in Central Asia*], *Water*, том 9, с. 842-852 [Эл. ресурс]. Доступен: <http://dx.doi.org/10.3390/w9110842>;
24. Ундэланд, А. (2015). Кыргызская Республика. Общественные леса и пастбища [*Kyrgyz Republic. Communities Forests and Pastures*]. Доклад №: ACS 13613, Всемирный банк;
25. ЕЭК ООН (2018). Восстановление лесных ландшафтов на Кавказе и в Центральной Азии – проблемы и возможности. Справка для Министерского круглого стола по восстановлению лесных ландшафтов на Кавказе и в Центральной Азии (21-22 июня 2018 г., Астана, Казахстан [Эл. ресурс]. Доступен: [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/Forest\\_Policy/Capacity\\_building/FLR\\_CCA\\_challenges\\_opportunities\\_081018-ENG-edited.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/Forest_Policy/Capacity_building/FLR_CCA_challenges_opportunities_081018-ENG-edited.pdf);
26. Унгер-Шаестех, К., Ворогушин, С., Фаринотти, Д., Гафуров, А., Дютманн, Д., Мандычев, А., Мерц, Б. (2013). Что нам известно о прошлых изменениях водного цикла верховий рек в Центральной Азии? Обзор [*What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review*], *Global Planetary Change*, том 110, с. 4-25;
27. Васильев, М.Е. (1980). Лесная мелиорация и урожай, Кайнар, Алматы;
28. Сюй, С., Тон, Л., Ли, Ф., Кан, С. и Цюй, Ю. (2010). Движение сока в орошаемом тополе белом или пирамидальном и его связь с экологическими факторами и индексом листовой поверхности в засушливом регионе в северно-западной части



- 
- Китая [*Sap flow of irrigated Populus alba var. pyramidalis and its relationship with environmental factors and leaf area index in an arid region of Northwest China*], *Journal for Forest Research*, том 16, с. 144-152;
29. Чжан, Ю., Кан, С., Уорд, И. Дж., Дин, Р., Чжан, С. и Чжэн, Р. (2011). Компоненты эвапотранспирации, определяемые методом измерения движения сока и микролизисометрии виноградника в северо-западной части Китая: динамика и определяющие факторы [*Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in northwest China: Dynamics and influential factors*], *Agricultural Water Management*, том 98, с. 1207-1214;
30. Чжоу, Ц., Ван, Ю. и Сунь, С. (2014). Характеристики движения сока в тополе и реакция на метеорологические факторы в прибрежной зоне [*Characteristic of sap flow of Poplar and response to meteorological factors in Coastal region*], *Advanced Materials Research*, том 1010-1012, с. 1055-1058.