

Серёгин И.А., Шабанова Н.П., Оспищев Р.Н., Горбов С.Н., Александров Н.А., Ярославцев А.М.
Функционально-экологическая оценка и моделирование транспирации древостоя лесной экосистемы
в условиях Москвы по данным IoT-систем мониторинга

.....
**Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»**
=====

УДК 581.5

**Функционально-экологическая оценка и моделирование транспирации
древостоя лесной экосистемы в условиях Москвы по данным IoT-систем
мониторинга**

*Серёгин И.А.^{1,5}, Шабанова Н.П.², Оспищев Р.Н.³, Горбов С.Н.^{3,4}, Александров Н.А.¹,
Ярославцев А.М.^{1,5}*

¹*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева*

²*Института лесоведения Российской академии наук*

³*Южный федеральный университет*

⁴*Чеченский государственный университет им А.А. Кадырова*

⁵*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы*

Аннотация

К приоритетным задачам экологии относится развитие современных систем экологического мониторинга и моделирования лесных экосистем, одним из основных интегральных показателей функционирования которых является сезонная динамика транспирации древостоя.

Большинство современных моделей транспирации построены на данных ДЗЗ и работают в очень крупном масштабе. Существуют единичные модели по данным прямого измерения сокодвигения, которые сложно поддаются экологически обоснованной геоинформационной экстраполяции на территории лесных биогеоценозов площадью в несколько гектар, что особенно актуально для городских лесопарков. Планируемая нами модель должна преодолеть эти недостатки.

В статье приведен подход к оценке и моделированию транспирации древостоя лесной экосистемы по данным IoT-систем мониторинга в комплексном заказнике «Петровско-Разумовское».

Ключевые слова: ТРАНСПИРАЦИЯ, ИОТ, EDDY COVARIANCE, ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Введение

Леса, как самая сложная наземная экосистема в мире, содержат множество биологических ресурсов, где обмен массой и энергией может непосредственно вызывать изменения температуры подстилающей поверхности, эвапотранспирации и продуктивности, тем самым играя решающую роль в изменении климата. Перенос энергии и массы между подстилающей поверхностью и атмосферой осуществляется в основном за счет турбулентного обмена и диффузии в приповерхностном слое. На фоне глобального изменения окружающей среды важно понять какую роль играет гидротермальный обмен в лесах, а анализ этого процесса позволит углубить понимание глобальной климатической системы [1].

Эвапотранспирация (ЕТ), состоящая из испарения влаги с поверхности почвы (Е), перехвата влаги пологом и кронами деревьев (I) и транспирации растениями (Т), имеет решающее значение для глобального водного и энергетического балансов. Транспирация связана с ассимиляцией углерода, и существенную роль играет обмен водой и углеродом между атмосферой и наземными экосистемами в гидрологических и углеродных циклах. Разделение эвапотранспирации на Е, I и Т и исследование факторов, контролирующих разделение ЕТ, улучшит моделирование взаимодействия атмосферы и поверхности земли и поможет понять задействованные биофизические процессы [2].

Глобальная доля транспирации была оценена в $61 \pm 15\%$ на основе данных, полученных MODIS-ЕТ, а в большинстве наземных экосистем преобладает транспирация, которая варьируется от самого высокого значения в тропических лесах ($70 \pm 14\%$) до самого низкого в степях и пустынях ($51 \pm 15\%$) по результатам метаанализа исследований разделения эвапотранспирации [3].

Однако долю транспирации трудно измерить в полевых условиях и постоянная оценка в наземных экосистемах остается сложной задачей. Поэтому важно провести комплексный анализ изменений потоков водяного пара и изучить контролирующее влияние растительности на транспирацию в различных экосистемах [4].

Транспирация представляет собой поток водяного пара и энергии, возвращаемый растениями в экосистему в результате процесса фотосинтеза в основном через устьичные поры листьев.

Таким образом, транспирация является связующим звеном круговорота воды, углерода и энергии в наземных экосистемах, что делает его ключевым процессом в биосфере Земли. В условиях водных ограничений более точное понимание процесса транспирации и потребление растениями воды поможет более качественно управлять водными ресурсами и минимизировать экономические риски.

Однако оценка транспирации в масштабах экосистемы является сложной задачей, поэтому она широко изучается в лабораториях и теплицах по выращиванию растений. Трудность оценки заключается в неоднородности физических и физиологических свойств и процессов, лежащих в основе водопотребления растениями и экосистемой в целом.

Эти проблемы влияют на доступность и неоднозначность в оценках экосистемы, что в свою очередь приводит к неопределенностям, влияющим на прогнозирование климатических изменений [5].

Метод турбулентных пульсаций (Eddy Covariance, EC) — стандартный метод, используемый для измерения газовых потоков на уровне экосистем. Данный метод позволяет проводить измерения потоков газов, не нарушая экосистему, и ключевым преимуществом метода является то, что это единственный прямой метод непрерывного измерения потоков газовых примесей между биосферой и атмосферой.

Было доказано, что метод турбулентной пульсации (МТП) является эффективным инструментом для измерений потоков воды, углерода и энергии на уровне экосистемы [6].

В последние годы появилась новая тенденция в производственных технологиях, обычно называемая Индустрия 4.0, позволяющая достичь более высокого уровня операционной эффективности и производительности за счет автоматизированных и взаимосвязанных систем. Это произошло из-за сочетания технологических концепций киберфизических систем и Интернета вещей (IoT), новой парадигмы, согласно которой объекты, а также живые существа могут передавать однозначно идентифицируемые данные в Интернет.

В настоящее время существует множество определений IoT. Согласно часто цитируемому определению международного союза электросвязи (ITU), IoT — это «глобальная инфраструктура для информационного общества, позволяющая предоставлять расширенные услуги путем соединения (физических и виртуальных) вещей на основе

существующих и развивающихся функционально совместимых информационных и коммуникационных технологий» [7].

На данный момент технологии Интернета вещей (IoT) используются в различных областях, включая безопасность, сельское хозяйство, экологию, интеллектуальные измерения, умный город и умный дом.

Для проведения сезонных наблюдений, нами применялась модификация ТТ+. Это устройство основано на микроконтроллере ATmega 328, принимающего сигналы от ряда датчиков, предназначенных для измерения переменных, в том числе: транспорта воды в ксилеме ствола (сокодвижение), температуры и влажности древесины, мультиспектральной характеристики света, прошедшего через полог, радиального роста ствола дерева, ускорения вдоль трехмерной системы координат, используемой для обнаружения дерева, температуры воздуха и относительной влажности, которые могут быть дополнительно оснащены датчиком температур и объемной влажности ствола [8].

Материалы и методы

Выбор места проведения исследований обуславливался тем, что Лесная опытная дача является крупнейшим опытным участком, расположенным на северо-западе г. Москвы. Около половины деревьев имеет естественное происхождение. Основными видами являются: дуб черешчатый (*Quercus robur*), липа мелколистная (*Tilia cordata*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), береза повислая (*Betula pendula*) [9-11].

Выбор ключевого участка и пород определялись по историческим данным. На территории квартала №11 (ключевой участок) проводился опыт по восстановлению леса под руководством А.Р. Варгаса де Бедемара. Осуществлялась посадка и посев хвойных пород. В дальнейшем на данном участке фиксировался подрост липы мелколистной (*Tilia cordata*) [9-11].

Участок имеет неправильную форму общей площадью 5,8 га. Древесная растительность представлена сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) возрастом 50-100 лет, липой мелколистной (*Tilia cordata*). Единично встречаются береза повислая (*Betula pendula*) и дуб черешчатый (*Quercus robur*). Средняя высота деревьев варьирует от 12 до 25 метров [9-11].

На территории объекта исследований была установлена сеть датчиков TreeTalker, расположенных в радиусе 300 м от станции турбулентных пульсаций и предназначена для измерения скорости сокодвижения по методу теплового рассеивания (TDP) Гранье в модификации До и Роршто [12]. Датчики сокодвижения ТТ+ устанавливаются на расстоянии 10 см друг от друга по вертикали и 3 см по горизонтали на северной стороне ствола, дабы избежать теплового воздействия значений в результате нагрева прямыми солнечными лучами. Один из датчиков за счет нагрева создает тепловой поток, который рассеивается сокодвижением, в то время как второй, измеряя температуру ненагреваемой части ствола, используется как контроль для оценки теплового градиента, а также включает в себя емкостной датчик влажности древесины. Для определения плотности потока влаги в ксилеме по методу Гранье применялось следующее уравнение: (1)

$$F_d = 11.899 \left[\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{on} - \Delta T_{off}} \right]^{1.231} \quad (1)$$

$$\Delta T_{on} = Theat_1 - Tref_1, \Delta T_{off} = Theat_0 - Tref_0$$

Где F_d - плотность потока (г м⁻² с⁻¹), ΔT - фактический температурный градиент между двумя датчиками после нагревания, ΔT_{max} - максимальный температурный градиент, измеренный между датчиками после нагревания за определенный временной период (чаще всего сутки), ΔT_{on} – температурный градиент между температурой нагрева и контроля после включения датчика нагрева; ΔT_{off} – температурный градиент между температурой нагрева и контроля до включения датчика нагрева.

Для определения объемной влажности древесины каждого дерева отбирался керн, при помощи буравы, с южной и северной сторон на высоте 1 метр. Во избежание изменения влажности отобранных образцов, в течение часа после отбора керны были упакованы в пищевую пленку и отправлены на глубокую заморозку при температуре -80 °С.

Определение сокопроводящей части ствола дерева проводилось следующим образом: первые два сантиметра керна нарезались на 4 отрезка по 5 мм; затем оставшийся образец делился на отрезки (далее образцы) по 10 мм. Полученные образцы взвешивались на лабораторных весах Cas CUX 620H II класса с точностью измерения 0,001 г и помещались в бумажный конверт и отправлялись на высушивание в сушильный шкаф при температуре 80°С. Каждый конверт обладал уникальным номером, с помощью которого кодировались древесная порода и порядковый номер отрезка в керне.

Предполагая, что сокопроводящим будет весь объем образца, проводилось измерение электронным штангенциркулем Matrix с погрешностью 0,02 мм длины и диаметра отрезка с дальнейшим вычислением его объема. Рассчитав объем образца и измерив его сухую массу, мы определяли объемную влажность для каждого отрезка керна по формуле №2:

$$W = \frac{(M_1 - M_2)}{V} * 100 \quad (2)$$

где: W – объемная влажность (%); V – объем образца до высушивания (мм³); M₁ – масса образца до высушивания (г); M₂ – масса сухого образца (г).

Для расчета транспирации на уровне экосистемы по данным TreeTalker нами предложена следующая формула №3:

$$T_i = \frac{F_{di} \cdot BA_i \cdot SAR_i}{r_{ci}^2} \cdot SR_i, \text{ мм}; T_e = \sum T_i \quad (3)$$

где: T_i это транспирация i-го вида в экосистеме (м 10⁻³), F_{di} - средняя плотность сокодвигения представителей i-го вида (м³ м⁻² ч⁻¹ 10⁻³), BA_i – площадь поперечного сечения ствола на уровне груди i-го вида (м²), SAR_i – доля сокопроводящей древесины от общей площади ствола i-го вида, r_{ci}² – средняя площадь кроны i-го вида, SR_i – доля вида в общем древостое, T_e - общая экосистемная транспирация.

Для получения средних площадных значений крон был проанализирован ортофотоплан обследуемой территории, полученный в программном комплексе Agisoft Metashape Professional 1.7.5 по результатам облета и фотосъемки обследуемой территории БВС DJI Phantom4 RTK. Средствами Metashape было проведено преобразование раstra для получения максимальной контрастности. Полученный растр был экспортирован в ГИС Quantum GIS 3.14, где случайным образом было выбрано 70 крон (за исключением крон деревьев, где были установлены TreeTalker, они были взяты преднамеренно). Далее определялись вид и площадь кроны дерева.

Для перехода от транспирации отдельных деревьев к транспирации на уровне изучаемой территории, было заложено 3 учетных площадки квадратной формы размером 30 на 30 метров. В учетных площадках на уровне груди измерялись обхваты стволов (DBH) доминирующих пород деревьев и оценивалась формула древостоя. После усреднения по 3 площадкам были получены средние диаметры стволов доминирующих пород. Важно отметить, что под пологом крон доминирующих видов, с высотой древостоя 25-30 м,

=====

произрастает довольно много угнетенных деревьев клена остролистного (*Acer platanoides*), высотой 5-10 м и диаметром ствола 10-30 см. Их вклад никак не оценивался и был исключен из рассмотрения из-за большой трудоемкости включения их в анализ и невозможности оценить диаметр крон дистанционным методом.

На территории ЛОД установлена 35-метровая вышка с комплексом высокочастотного оборудования для измерения потоков воды и углекислого газа по методу турбулентных пульсаций, а также оборудование, измеряющее основные биометеорологические параметры, далее СТП.

Температура и относительная влажность воздуха измерялись при помощи датчика HC2S3 (Rotronic AG, Швейцария). Измерение осадков проводилось осадкомером YOUNG модели 52202/52203. Изучение водного режима почв на территории Лесной опытной дачи проводилось на 7 опытных площадках с помощью влагомера Delta-T модель PR2.

Измерение потоков турбулентных пульсаций осуществлялось с помощью газоанализатора с закрытым трактом Li 7200 с газосборной трубкой длиной 72 см, с функцией подогрева [13] и ультразвукового анемометра Gill WindMaster. Обработка и расчет данных, измеренных ковариационных потоков, проводилась при помощи программного обеспечения EddyPro® Software (Version 7.0).

Поскольку, при проведении измерений, использовался газоанализатор закрытого типа Li 7200 с подогреваемой газосборной трубкой длиной 70 см, то для минимизации задержек измерений был использован метод максимизации ковариации. Версия внутреннего программного обеспечения анемометра содержала ныне широко известную ошибку “w-boost”, поэтому поправка на эту ошибку вносилась на уровне расчетов в EddyPro.

Турбулентная пульсация рассчитывалась по методу блочного усреднения (усреднение по Рейнольдсу). Компенсация колебаний проводилась с учетом поправок WPL. Качество потока оценивалось по шкале, предложенной Mauder and Foken (2004). Оценка линейного следа (footprint) проводилась согласно Kljun et al. (2004). Итоговая обработка экспериментальных данных и частичная визуализация выполнена в программном комплексе Tovi.

Результаты и обсуждения

Рассмотрим содержание почвенной влаги с учетом ее доступности для растений. На рис. 1 представлено содержание почвенной влаги в % от величины полной влагоемкости.

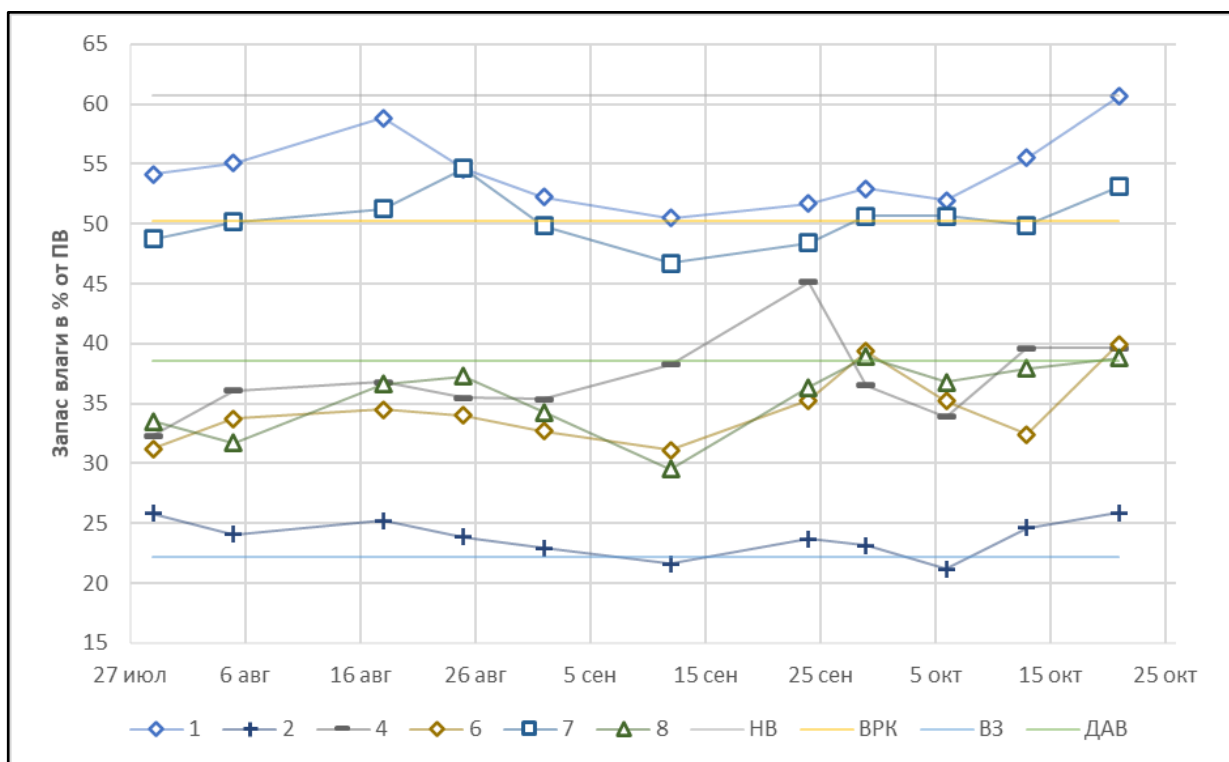


Рис. 1. Содержание запасов почвенной влаги в % от полной влагоемкости (ПВ) в метровом слое и запасы влаги в % от ПВ, соответствующие НВ (наименьшей влагоемкости), влажности разрыва капилляров (ВРК), влажности завядания (ВЗ), диапазону активной влаги (ДАВ).

В точке 1 запасы почвенной влаги в метровом слое составляют 60% от величины ПВ и на протяжении всего срока наблюдений являются близкими к значениям наименьшей влагоемкости, что свидетельствует о хорошей обеспеченности деревьев влагой. На точке 7 запасы влаги составляют 50% от величины ПВ и соответствуют влаге разрыва капилляров, что также говорит о хорошей влагообеспеченности деревьев. На точках 4, 6 и 8 запасы влаги несколько меньше и соответствуют диапазону активной влаги, что свидетельствует о доступности влаги деревьям.

Определение гидрофизической константы влажности завядания (ВЗ), позволяет определить в почве диапазоны доступной (продуктивной) влаги в момент наблюдения и

более объективно судить о запасах этой влаги на опытных участках с точки зрения влагообеспеченности деревьев. Величина представляет собой разность между текущей величиной влажности и величиной завядания. Однако более наглядной величиной характеристики влагообеспеченности растений можно назвать относительную влагообеспеченность. Степень влагообеспеченности представляет собой отношение наблюдаемого содержания доступной влаги в данном слое почвы к максимально возможному ее содержанию, т.е. к диапазону активной влаги, который равен разности между величинами НВ и ВЗ. Относительная влагообеспеченность = $\frac{В - ВЗ}{НВ - ВЗ} * 100\%$.

Результаты расчетов степени влагообеспеченности представлены в таблице 1.

Таблица 1 Степень влагообеспеченности в метровом слое. Содержание доступной влаги в процентах от диапазона активной влаги (ДАВ)

№ точки	Июль	Август				Сентябрь				Октябрь		
	29	5	18	25	1	12	24	29	6	13	21	
1	92	95	105	93	87	82	86	89	86	96	110	
2	16	11	14	10	8	4	10	9	3	12	16	
3	10	8	10	3	0	0	5	1	3	5	7	
4	33	43	45	42	41	49	68	45	37	53	53	
6	30	37	39	38	34	30	41	52	41	33	54	
7	78	81	84	93	81	72	77	83	83	81	89	
8	36	32	45	47	39	26	44	51	45	48	51	

Из таблицы 1 можно заметить, что наилучшие условия влагообеспеченности наблюдались на точках 1 и 7. Величина относительной влагообеспеченности составляет 80-100% в течение всего периода наблюдений. Менее благоприятными условиями влагообеспеченности характеризуются деревья на точках 4, 6 и 8. На точках 2 и 3 самые неблагоприятные условия по влагообеспеченности деревьев, но как выше было сказано, это связано с заниженными величинами объемной влажности.

Расчеты испарения почвенного покрова методом испарителей не дали адекватных результатов. Мы связываем это в первую очередь с тем, что количество осадков, проникающих под полог насаждения в действительности гораздо меньше, чем дает метеостанция на открытой территории. Другой причиной, как уже упоминалось выше, может быть неравномерное распределение осадков по территории, что также мешает

правильному учету испарения. Для получения адекватных величин испарения напочвенным покровом необходим учет осадков, проникающих под полог насаждения на каждой точке.

Краткий анализ данных по влажности кернов, показал, что деревья одного вида имеют очень сходные профили распределения воды внутри ствола, причем картины незначительно отличаются для северной и южной части дерева. На рис. 2 приведены усредненные изменения объемной влажности липы мелколистной и сосны обыкновенной.

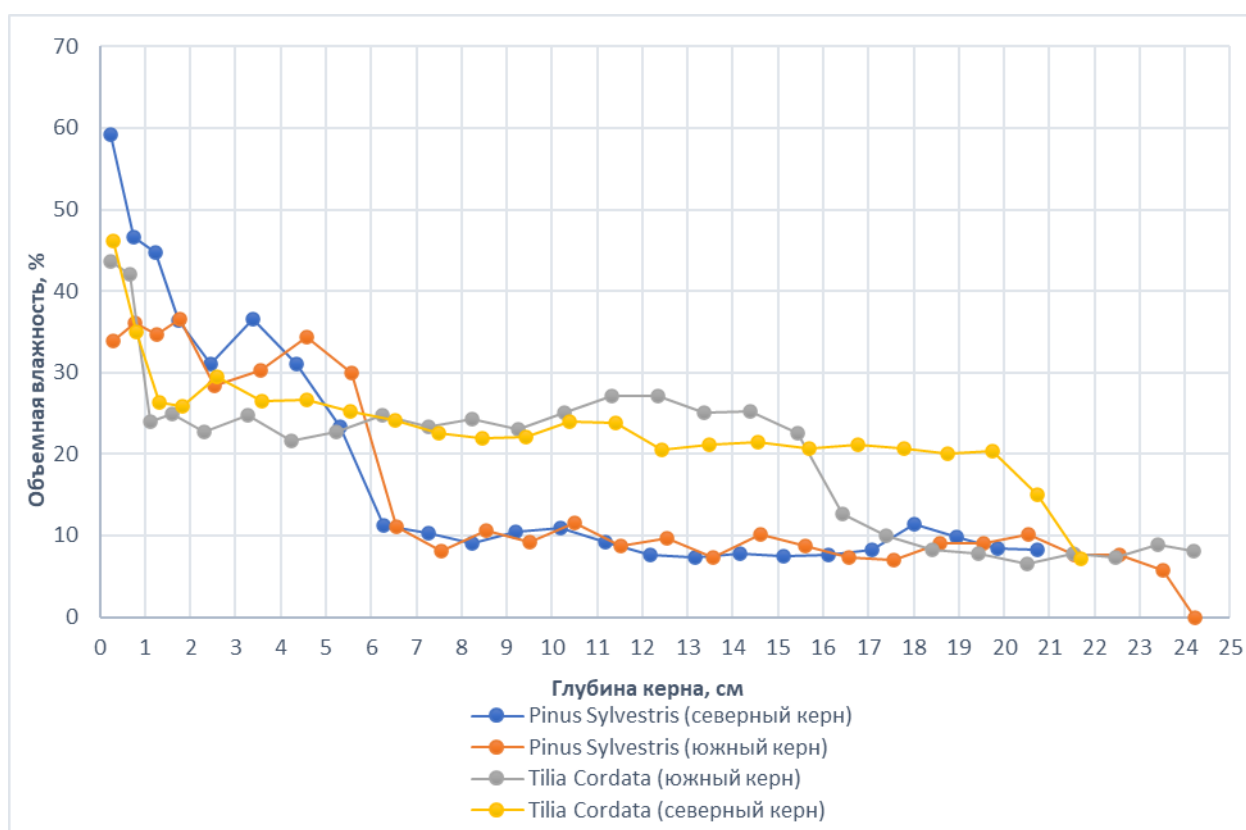


Рис. 2. Объемная влажность кернов

Для обоих видов прослеживается четкая граница изменения объемной влажности древесины. Мы предполагаем, что так как отбор образца проводился утром после жаркого дня на деревьях без явных признаков повреждений, то часть древесины с капиллярами, заполненными водой, и является сокопроводящей. Таким образом доля сокопроводящей ткани керна от общей его длины для сосны обыкновенной составила $6/23 = 26\%$, а для липы остролистной $18/22 = 81,8\%$. Легко посчитать, что при пересчете на базальную

площадь ствола доли составят 6,8% и 70% соответственно. В дальнейшем эти значения были использованы для расчета транспирации деревьев по данным плотности сокодвижения датчиков TreeTalker

При рассмотрении динамик плотности сокодвижения и доли доступной влаги в метровом слое почвы для двух, имевших наибольшую разницу в абсолютных значениях скважин (рис. 3), можно отметить следующее. Абсолютные значения плотности сокодвижения были выше на участке с меньшей долей доступной влаги и были максимальны, когда уровень доступности влаги достигал минимальных значений.

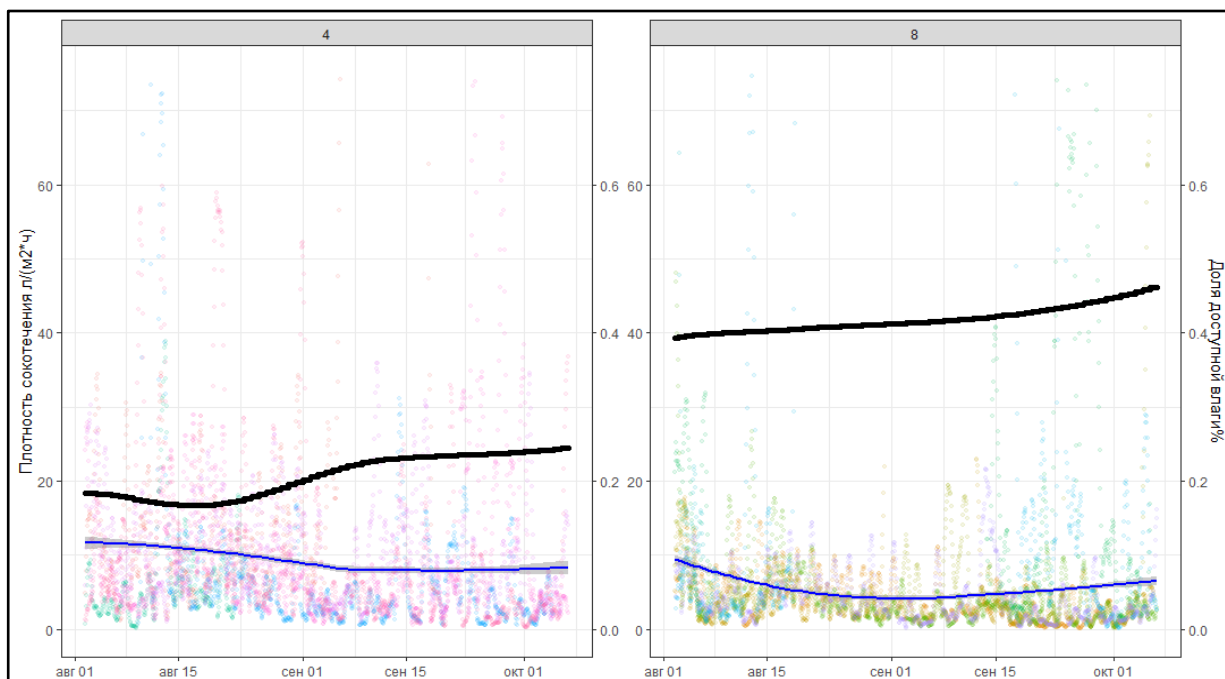


Рис. 3. Динамика плотности доли доступной влаги в метровом слое почвы на скважинах 4 и 8 (черная линия) и соответствующая им динамика плотности сокодвижения на ближайших деревьях (точками представлены значения от отдельных устройств и синей линией скользящее среднее с окном в одни сутки)

Это говорит о том, что данный уровень влагообеспеченности позволяет деревьям полноценно функционировать без какого-либо лимитирования. Таким образом, можно предположить, что доступность влаги в почве не была лимитирующим фактором транспирации деревьев за все время наблюдения.

Сравнение динамик плотности сокодвижения для деревьев вида сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и липа мелколистная (*Tilia cordata*) и эвапотранспирации на уровне

экосистемы, измеренных по методу турбулентных пульсаций, показывает их большое сходство. Наблюдаются стабильные значения с июля до середины августа. Наименьшие значения наблюдаются с середины августа и до середины сентября, характеризующиеся аномальными всплесками со второй половины сентября до конца наблюдений в середине октября.

Интересно, что интенсивность сокодвижения у сосны была ниже, чем у липы, что, возможно, является еще одним доказательством нашего предположения о том, что всплески транспирации и эвапотранспирации в конце вегетационного сезона связаны неконтролируемым выбросом паров воды у отмирающих листьев при дефолиации. (рис. 4).

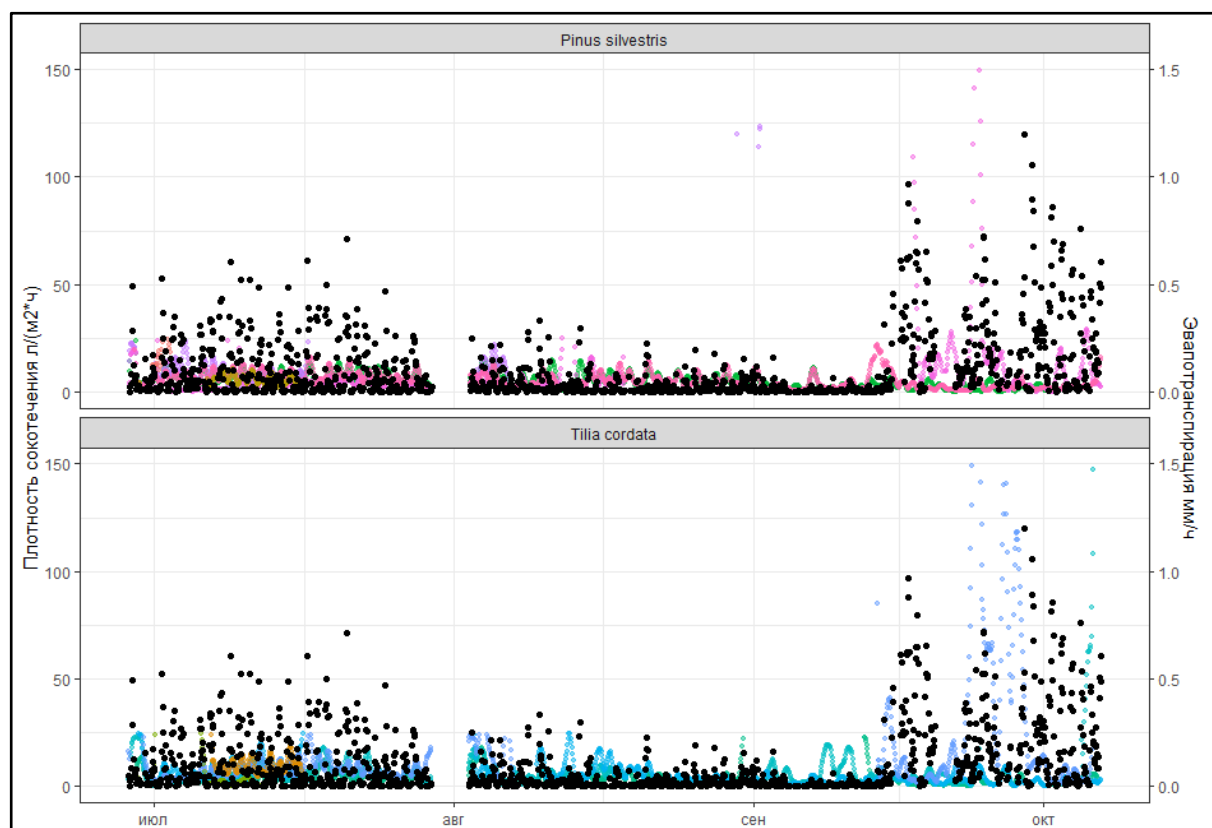


Рис. 4. Динамика плотности сокодвещения деревьев вида сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и липа сердцевидная (*Tilia cordata*), расположенных вокруг скважины 8 и значения эвапотранспирации на уровне экосистемы, измеренных по методу турбулентных пульсаций (черные точки)

Общая эвапотранспирация по данным СТП заметно увеличивается к осенним месяцам. Предполагаем, что в летние месяцы, когда на деревьях присутствует много

листвы, пар от поверхности почвы не полностью уходит в атмосферу, а частично задерживается пологом леса (как механически, так и физико-химически, например, адсорбцией фитомассы). И только осенью, с усилением ветров и увеличением интенсивности листопада, начинается более адекватное отражение наземной эвапотранспирации.

Данные с учетных площадок позволили рассчитать транспирацию на уровне территории по данным TreeTalker и сравнить ее с эвапотранспирацией, полученной по методу турбулентных пульсаций (рис. 5). Очевидно, что динамика транспирации не будет отличаться от динамики плотности сокодвижения, меж тем, если посмотреть на абсолютные значения параметров, мы можем обнаружить, что к середине августа (225 день) транспирация значительно превышала значения эвапотранспирации, что безусловно является ошибкой. Причиной ее, как нам кажется, является переоценка вклада доминирующих пород в общую транспирацию в результате исключения из расчета формулы древостоя деревьев клена остролистного.

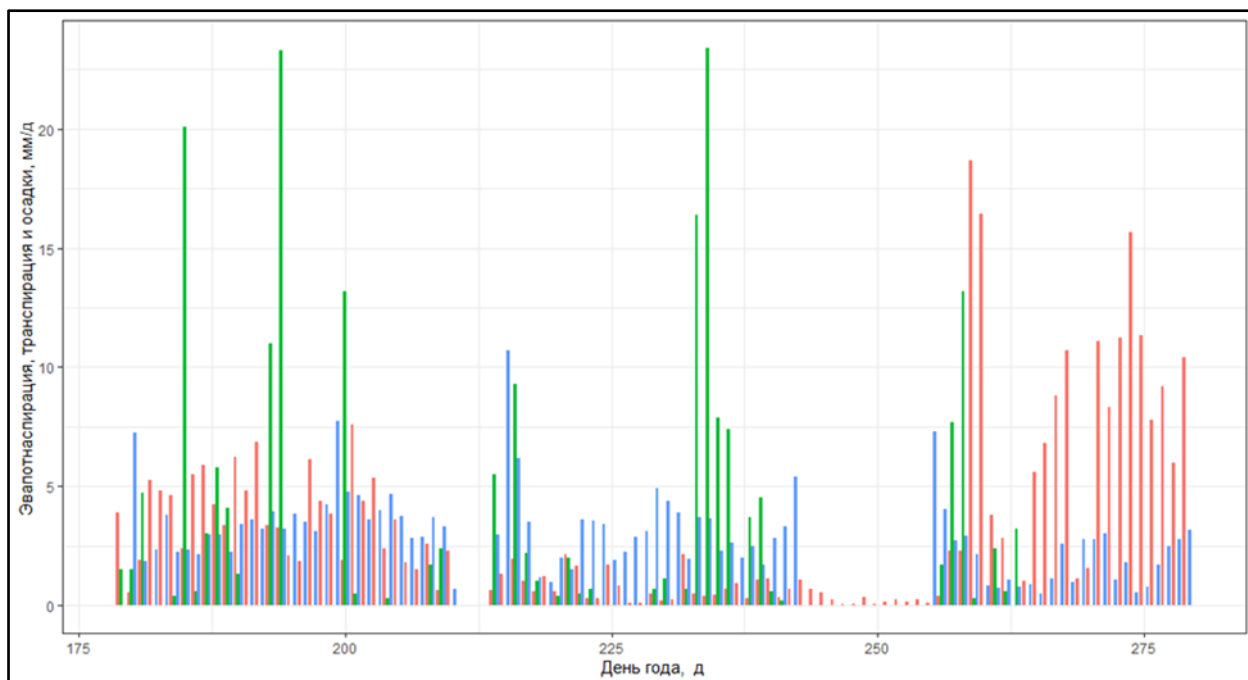


Рис. 5. Суточные значения эвапотранспирации (красный) по данным метода турбулентных пульсаций, осадков (синий) и транспирации (зеленый)

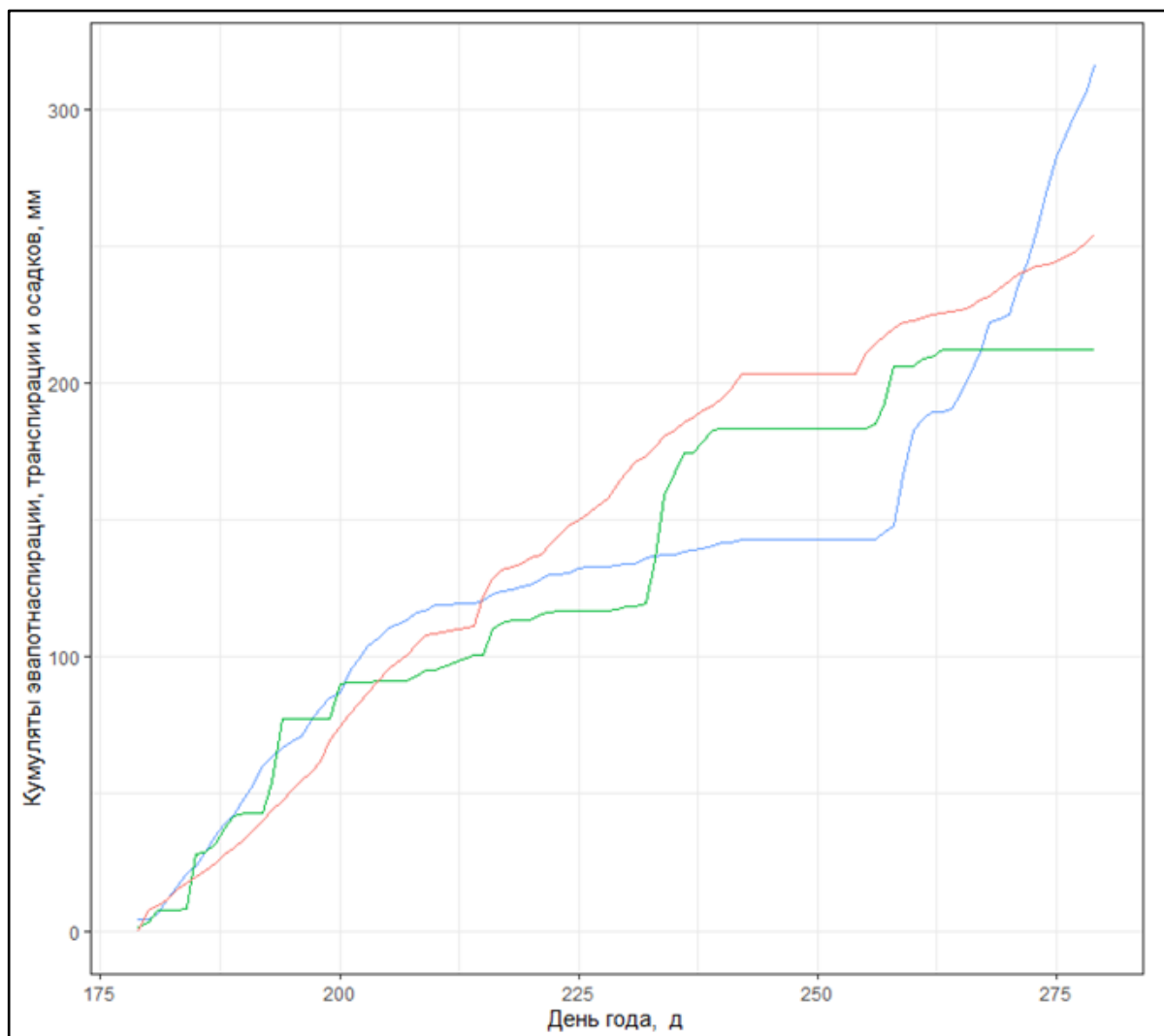


Рис. 6. Кумуляты эвапотранспирации (красный), транспирации (зеленый) и осадков (синий)

Но даже несмотря на явную переоценку абсолютных значений транспирации, предложенная методика может быть использована для грубой оценки общей динамики и абсолютных значений эвапотранспирации на уровне экосистемы. Последнее хорошо видно по кумулятам эвапотранспирации, транспирации и осадков для изучаемого участка (рис. 6).

Уровень накопленных осадков значительно превысил уровень эвапотранспирации к концу сезона, а значит вода должна была начать накапливаться в экосистеме, что хорошо согласуется с данными по влажности почвы.

Выводы

1. Большая часть точек наблюдения обладали влажностью в диапазоне доступной влаги. Только одна точка в нижней части склона имела влажность чуть превышающую влажность завядания, что говорит о высокой пространственной неоднородности доступной влаги из-за влияния явно выраженного мезорельефа.

2. Проведенный мониторинг динамики сокодвигания с помощью экспериментального оборудования TreeTalker выявил высокую пространственную и временную (как сезонную, так и дневную) неоднородность скорости сокодвигания деревьев, связанную с видовой принадлежностью и доступностью влаги.

3. Расчет эвапотранспирации территории с помощью метода турбулентных пульсаций составил от 0,5 до 1,2 мм/ч.

4. Предложенный метод оценки транспирации древостоя городского лесопарка с использованием ДДЗ, по данным распределенной сети устройств TreeTalker, показал сходную динамику и абсолютные значения с данными по эвапотранспирации полученными методом турбулентных пульсаций.

Благодарности:

В.И. Васеневу за организацию и проведение сезонных наблюдений; д.б.н. А.В. Смагину за предоставление необходимого оборудования; к.б.н., Н.П. Шабановой за совместную работу и помощь в расчетах.

Исследование выполнено при поддержке проекта Российского научного фонда 19-77-30012

Список использованных источников:

1. Jin Y., Liu Y., Liu J., Zhang X. 2022, Energy Balance Closure Problem over a Tropical Seasonal Rainforest in Xishuangbanna, Southwest China: Role of Latent Heat Flux. *Water*, 14, 395. - DOI: <https://doi.org/10.3390/w14030395>

2. Nelson J.A., Pérez-Priego O., Zhou S., et al. 2020, Ecosystem transpiration and evaporation: Insights from three water flux partitioning methods across FLUXNET sites. *Glob Change Biol*, 00:1–15. - DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15314>

3. Schlesinger, W. H., & Jasechko, S., 2014, Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 115–117. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrfor.2014.01.011>

4. Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., Wood, E. F. (2017). The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources: The future of evapotranspiration. *Water Resources Research*, 53(4), 2618–2626. - DOI: <https://doi.org/10.1002/2016W R020175>

5. Nelson J.A., Carvalhais N., Cuntz M., Delpierre N., Knauer J., Ogée J., & Jung, M. - 2018. Coupling water and carbon fluxes to constrain estimates of transpiration: The TEA algorithm. *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences*, 123, 3617–3632. - DOI: <https://doi.org/10.1029/2018J G004727>

6. Baldocchi, D. D. 2020, How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global Change Biology*, 26, 242–260. - DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14807>

7. Weber R.H., Studer E., 2016, Cybersecurity in the Internet of Things: Legal aspects, ScienceDirect. - DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clsr.2016.07.002>

8. Riccardo V., B. M. Luca, Gianelle Damiano [at al] 2019, New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0.// *Annals of Silvicultural Research*, № 4. — С. 84-88.

9. Наумов В.Д. 145 лет Лесной опытной даче РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева: учебное пособие / В.Д. Наумов, Наумов В.Д., Поляков А.Н. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2009. – 511 с. – ISBN 978-5-9675-0334-4. – EDN QLANMR.

10. Яшин И.М., Васенев И.И., Гареева И.Е., Рамазанов С.Р. // *Экологический мониторинг, моделирование и проектирование в условиях природных, городских и агроэкосистем*, Москва, 01–11 июля 2015 года / Под общей редакцией И.И. Васенева, Р. Валентини. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Скрипта Манент", 2015. - С. 7–35. – EDN UIDUZN.

11. Тихонова М.В. и др. Экологическая оценка пространственно-временной изменчивости почвенной эмиссии п 2O на лесном участке природного заказника «Петровско-разумовское» // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство.* – 2013. – №. 5. – С. 93-104.

12. Do F., Rocheteau A., 2002, Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies, *Tree Physiology* 22, 641–648.

13. Бурба Г.Г. и др. Метод турбулентных пульсаций // *Краткое практическое руководство.* Москва: ИПЭЭ им. АН Северцова РАН. – 2016.

=====

Серёгин И.А., Шабанова Н.П., Оспищев Р.Н., Горбов С.Н., Александров Н.А., Ярославцев А.М.
Функционально-экологическая оценка и моделирование транспирации древостоя лесной экосистемы
в условиях Москвы по данным IoT-систем мониторинга

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

=====

Цитирование:

Серёгин И.А., Шабанова Н.П., Оспищев Р.Н., Горбов С.Н., Александров Н.А., Ярославцев А.М. Функционально-экологическая оценка и моделирование транспирации древостоя лесной экосистемы в условиях Москвы по данным IoT-систем мониторинга [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 6. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/6/st_611.pdf.
DOI: <https://doi.org/10.51419/202136611>.