

<https://doi.org/10.25686/4184.2022.65.71.001>

УДК 528.9:630*1

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ ЛЕСОВ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ ПО ДАННЫМ MOD16A2 ЗА 2001-2021 ГГ.

Д.М. Дергунов, О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, С.А. Лежнин,
А.В. Губаев, Л.В. Тарасова

Поволжский государственный технологический университет

В статье представлены результаты анализа трендов эвапотранспирации лесного покрова Среднего Поволжья за 2001-2021 годы в связи с климатическими факторами и его продуктивностью (NDVI). В исследовании использовались данные временных рядов, полученных по спектрорадио-метру MODIS: продукт MOD16A2 для эвапотранспирации и MOD13Q1 для NDVI. Климатические данные температуры подстилающей поверхности (LST) и осадков (Pr) получены из набора данных TerraClimate. Исследование показало, что значения эвапотранспирации имеют тенденцию к снижению в течение всего периода исследования со скоростью 1,57 мм/год. Оценка динамики климатических показателей показала тесную связь эвапотранспирации с уровнем осадков и умеренную связь с температурой подстилающей поверхности. Главными факторами, влияющими на динамику эвапотранспирации, были количество осадков и крупные лесные пожары на территории исследования. Особенно такое снижение заметно в 2010 году, когда на территории Республики Марий Эл и Нижегородской области имели место крупные лесные пожары. Умеренные и положительные тренды наблюдаются на севере Нижегородской и Кировской областей и центральной части Республики Марий Эл, что может быть связано с зарастанием больших участков земель залежей и последующим активным участием этого объема фитомассы в потоках водного баланса лесных экосистем. Анализ данных спутниковых временных рядов показал существенное влияние деградации лесов на индекс ET.

Ключевые слова: лесные экосистемы, временные ряды, MODIS, эвапотранспирация, осадки, средняя температура, NDVI

ANALYSIS OF EVAPOTRANSPIRATION DYNAMICS IN THE FOREST STANDS OF THE MIDDLE VOLGA REGION BASED ON MOD16A2 DATA DURING THE 2001-2021 PERIOD

D.M. Dergunov, O.N. Vorobev, E.A. Kurbanov, S.A. Lezhnin, A.V. Gubaev, L.V. Tarasova
Volga State University of Technology

The paper examines evapotranspiration trends in the Middle Volga region from 2001 to 2021 in relation to climatic factors and forest stand productivity (NDVI). MODIS data products have been widely used in time series analysis: MOD16A2 for evapotranspiration and MOD13Q1 for NDVI. The climatic data for the land surface temperature (LST) and precipitation (Pr) have been obtained from the TerraClimate dataset. The research proved a decreasing trend in evapotranspiration values during the whole study period at a rate of 1.57 mm/year. The analysis of climatic indicators revealed close linkages between evapotranspiration and precipitation levels and moderate linkages between evapotranspiration and land surface temperature. The amount of

precipitation and large-scale wild fires in the area under study were the key factors that influenced the dynamics of evapotranspiration. In 2010, when severe forest fires broke out on the territory of the Republic of Mari El and the Nizhny Novgorod region, this decreasing trend was particularly prominent. Moderate and positive trends are observed in the north of the Nizhny Novgorod and Kirov regions as well as in the central part of the Republic of Mari El, which may be due to the overgrowth of large areas and the subsequent active contribution of this phytomass to the water balance of forest ecosystems. Analysis of satellite time series data proved a significant impact of forest degradation on the evapotranspiration index.

Keywords: forest ecosystems, time series, MODIS, evapotranspiration, precipitation, average temperature, NDVI

Введение

Лесные экосистемы обеспечивают жизненно важный процесс водного баланса между поверхностью земли и атмосферой, а также депонирования углерода фитомассой (Курбанов, 2009; Xu et al., 2022). В глобальном водном балансе важными экосистемами являются бореальные леса, которые содержат больше поверхностных пресных вод, чем другие биомы планеты (Walls et al., 2010). В связи с этим во всем мире наблюдается рост исследований в области оценки водорегулирующей и водоохранной роли экосистем бореальных лесов, особо выделяя процессы транспирации и эвапотранспирации (Ungar et al., 2013; Wang et al., 2017). Исследования свидетельствуют о том, что в последние десятилетия транспирация растительного покрова бореальных лесов находится под влиянием глобальных изменений климата и экстремальных погодных явлений (Sheffield et al., 2009; Jasechko et al., 2013). Изменения температуры воздуха, влажности и режима осадков непосредственно влияют на лесные экосистемы, вызывая нарушения различной степени интенсивности (Воробьев и др., 2022). Например, кратковременная засуха может сделать леса более уязвимыми для нападения насекомых и лесных пожаров, в то время как продолжительная засуха может напрямую вызвать гибель деревьев (Allen et al., 2010; Anderegg et al., 2015; Lai et al., 2022).

Эвапотранспирация (ЕТ) представляет собой суммарное количество влаги, выделяемой почвой и растительностью в атмосферу и коррелирующей с биопродуктивностью экосистем. ЕТ связывает биологические и гидрологические циклы и является важной переменной во многих эколого-гидрологических моделях (Sun et al., 2016). Она может варьировать в зависимости от климата, типа растительности и фенологической стадии и напрямую зависит от стратегий управления земельными ресурсами. В лесных насаждениях эвапотранспирация состоит из испарения почвы и транспирации растений (Sun et al., 2016). На эвапотранспирацию влияют как водные условия почвы, так и метеорологические факторы, включая радиацию, температуру и влажность (Hadiwijaya et al., 2020; Wang et al., 2019). В некоторых случаях лесные экосистемы могут иметь различные модели эвапотранспирации в течение продолжительных засушливых дней (Shinohara and Otsuki, 2015; Zhou et al., 2019). Количественная оценка воздействия каждого фактора на эвапотранспирацию насаждений в различных моделях может повысить точность оценки водопотребления почвы, функции и энергетический баланс экосистем (Liu et al., 2018).

Теоретически транспирация должна реагировать одновременно как на осадки, так и на почвенную воду, благоприятствуя последним. Однако положительная связь между содержанием влаги в почве и плотностью сокодвижения не всегда может быть обнаружена как в суточном, так и в месячном масштабе (Zhang et al., 2015; Zhang et al., 2018). Было установлено, что выпадение одинакового количества осадков в разные периоды времени приводит

к различиям в физиологическом поведении растений. Тем не менее, механизм того, как изменения влажности почвы, вызванные осадками, влияют на транспирацию растительности, пока остается неясным (Gu et al., 2016; Denager et al., 2020).

Существует множество формул для оценки значений ЕТ. Например, комбинированный метод, метод на основе излучения или на основе температуры. Все они оптимально адаптированы для входных данных наземных метеостанций. В то же время данные дистанционного зондирования, которые получили широкое развитие в последние годы, дают возможность использовать новую перспективу для оценки наземного покрова как в глобальном, так и в локальном масштабе (Kurbanov et al., 2021; Running et al., 2017; Шарый и др., 2020; Yang et al., 2022). Для оценки растительного покрова следует отметить миссию MODIS, которая обеспечивает наборы данных, необходимые для конечного продукта ЕТ, с 8-дневным временным и 500-метровым пространственным разрешением.

Цель работы – оценка временных трендов эвапотранспирации лесного покрова Среднего Поволжья в связи с биологической продуктивностью и климатическими факторами. Для этого были решены следующие **задачи**:

- 1) получен набор данных временных рядов климатических показателей, индексных значений NDVI и показателей эвапотранспирации лесных насаждений на территории исследования;
- 2) проведена комплексная оценка динамики трендов эвапотранспирации на площади лесов Среднего Поволжья.

Область исследования

Объектом исследования выступает лесной покров, включающий хвойные, смешанные и широколиственные лесные насаждения на территории Среднего Поволжья России, расположенные в границах мозаики безоблачных снимков Landsat-8 за 2021 год (earthexplorer.usgs.gov) (рис. 1).

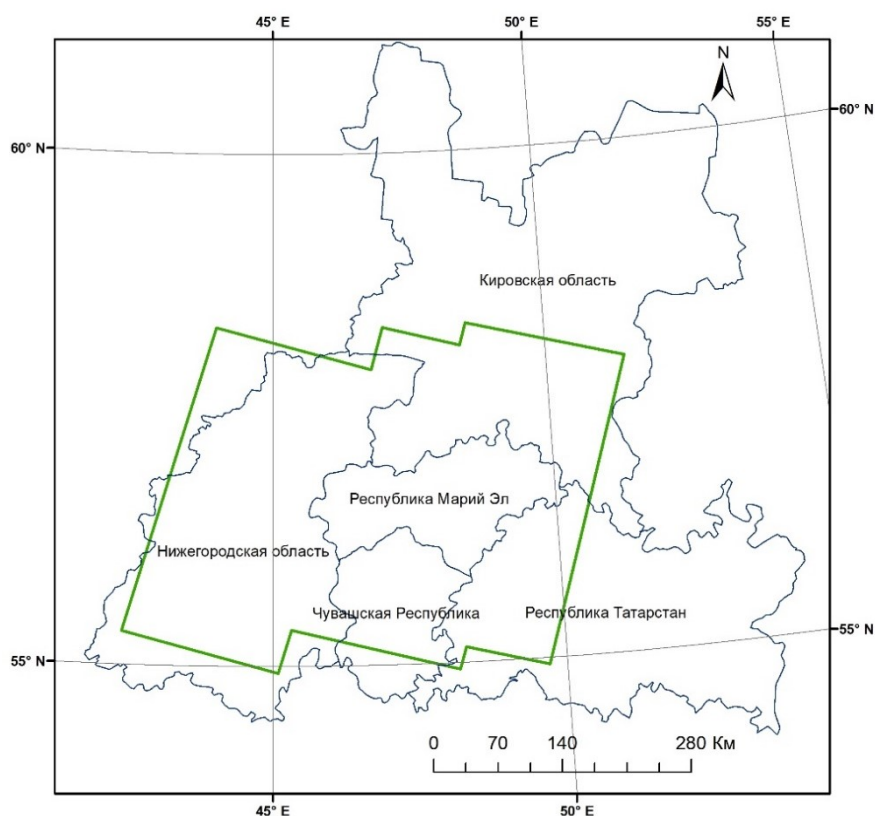


Рис.1. Область исследования Среднего Поволжья в границах мозаики безоблачных снимков Landsat-8 за 2021 г.

Методика исследований

На первом этапе, с целью выделения границ лесного покрова была проведена пошаговая классификация шести снимков Landsat-8, 2021 г. предварительно трансформированных в формат BGW (B — *англ.* Brightness, яркость; G — *англ.* Greenness, зелень; W — *англ.* Wetness, влажность) (Курбанов, Воробьев, 2020). В результате был получен тематический слой «Лес», в который вошли все основные лесообразующие породы региона (Курбанов и др., 2018). Все картографические цифровые слои и атрибутивные данные обрабатывались в пакете ArcGIS Pro. На втором этапе для извлечения данных NDVI и ET с готовых продуктов, полученных на основе спутниковых снимков MODIS, была создана векторная регулярная сеть, состоящая из 78918 тестовых точек в узлах решетки с шагом 1×1 км в пределах границ площади лесного покрова на изучаемой территории (рис. 2).

Для проведения оценки взаимосвязи эвапотранспирации с нормализованным индексным показателем NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) лесного покрова были использованы временные ряды с 2001 по 2021 год спутниковых данных спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Данные по эвапотранспирации были получены с использованием продукта MOD16A2, а по NDVI – MOD13Q1. Оба продукта имеют пространственное разрешение 500 м. MOD16A2 представляет собой набор тайлов растровых значений восьмисуточных потоков суммарного испарения (ETa8) исследуемого наземного покрова. Набор тайлов формирует общее непрерывное покрытие территории земной суши между параллелями 80° с.ш. и 60° ю.ш. для каждого из 43-х восьмису-

точных периодов календарного года. Алгоритм расчета для наполнения этих тайлов рассчитан по коду компьютерной модели SEBS, основанной на уравнении Пенмана-Монтейта (Running et al., 2019).

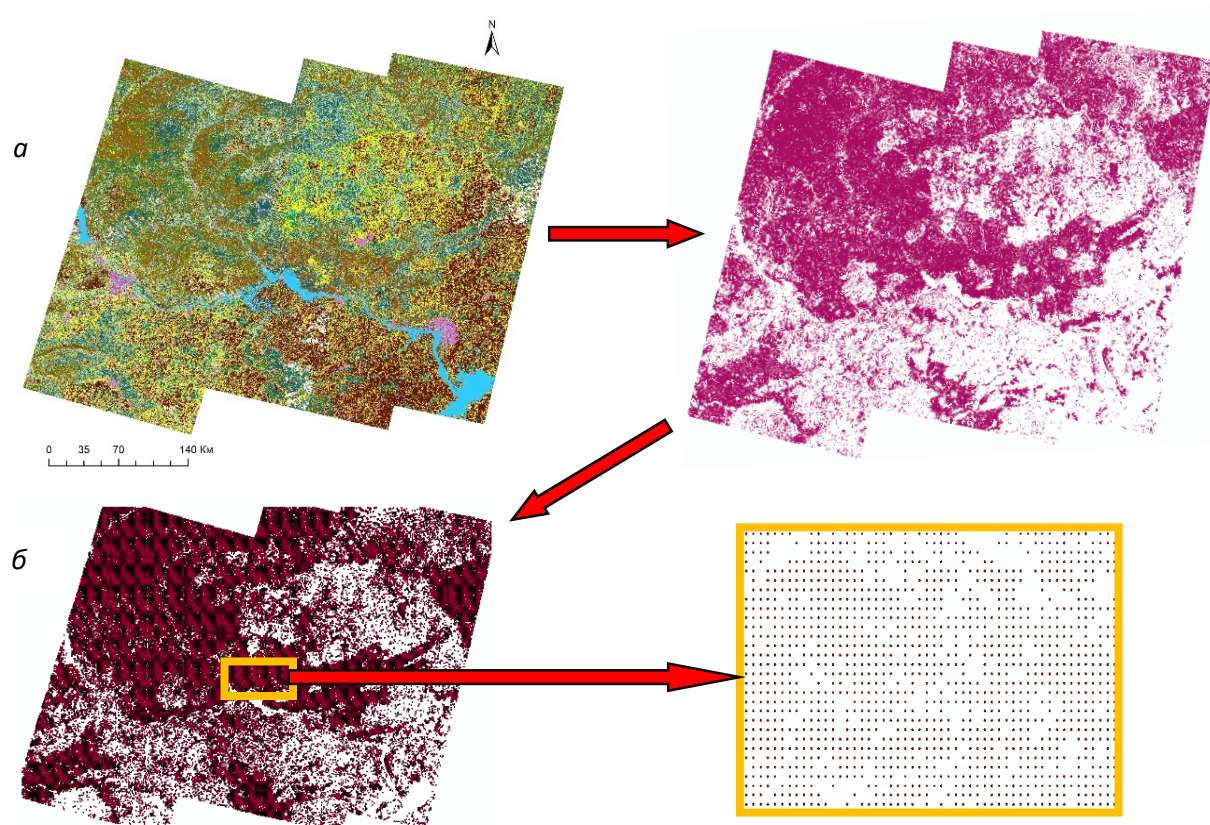


Рис 2. Тематические карты: а) маска лесного покрова территории исследования, б) векторная регулярная сеть тестовых участков 1х1 км

Данные продукта MOD16A2 применяются достаточно широко для оценки процессов взаимосвязи водного баланса, эвапотранспирации и растительного покрова (Ермолаева, Зейлигер, 2021; Che et al., 2022). Продукт MOD13Q1 включает 16-дневные композитные изображения вегетационного индекса NDVI, которые применяются для получения сведений по пространственному и временному распределению фитомассы (биологической продуктивности) наземного покрова как в глобальном, так и в региональном масштабе (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>). Данные среднемесячной температуры подстилающей поверхности (LST – *англ.* Land surface temperature) и осадков (Pr - *англ.* precipitation) на территорию исследования были получены из набора глобальных климатических данных интернет-ресурса TerraClimate (<https://climatologytoolbox.org/tool/data-download>). Таким образом, для проведения исследований были сформированы массивы данных по четырем параметрам в виде временных рядов геопространственных значений.

Результаты исследования

На основе анализа массивов геоданных ET, NDVI, LST и Pr для территории Среднего Поволжья получена детальная картина динамики процессов эвапотранспирации (ET) за период 2001-2021 гг. и представлены результаты анализа взаимосвязей исследуемых параметров (рис. 3 и 4). На рисунке 3 видно, что общая динамика эвапотранспирации (ET) лесного

покрова имеет характерное сезонное распределение, достигая максимальных значений в летние месяцы сезона вегетации и снижаясь в его конце (рис. 3).

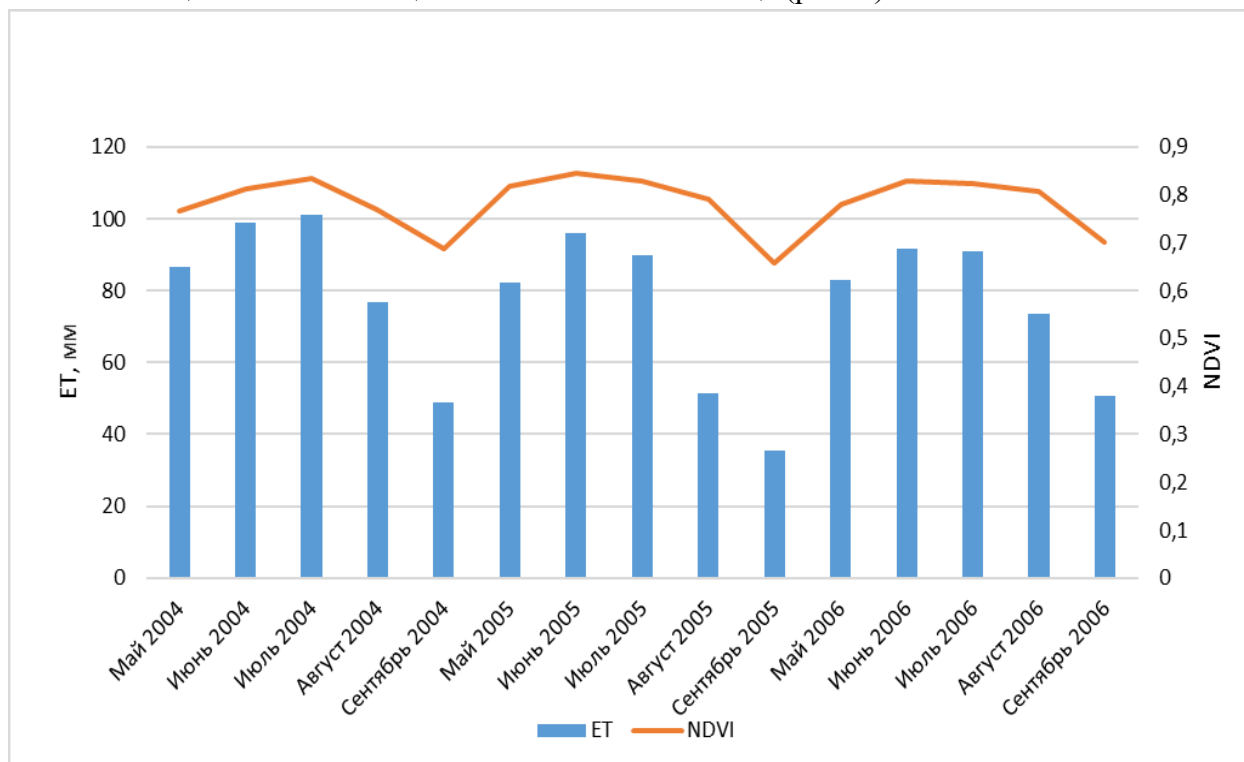


Рис. 3. Распределение средних значений ET и NDVI в течение вегетационных периодов 2004 -2006 гг.

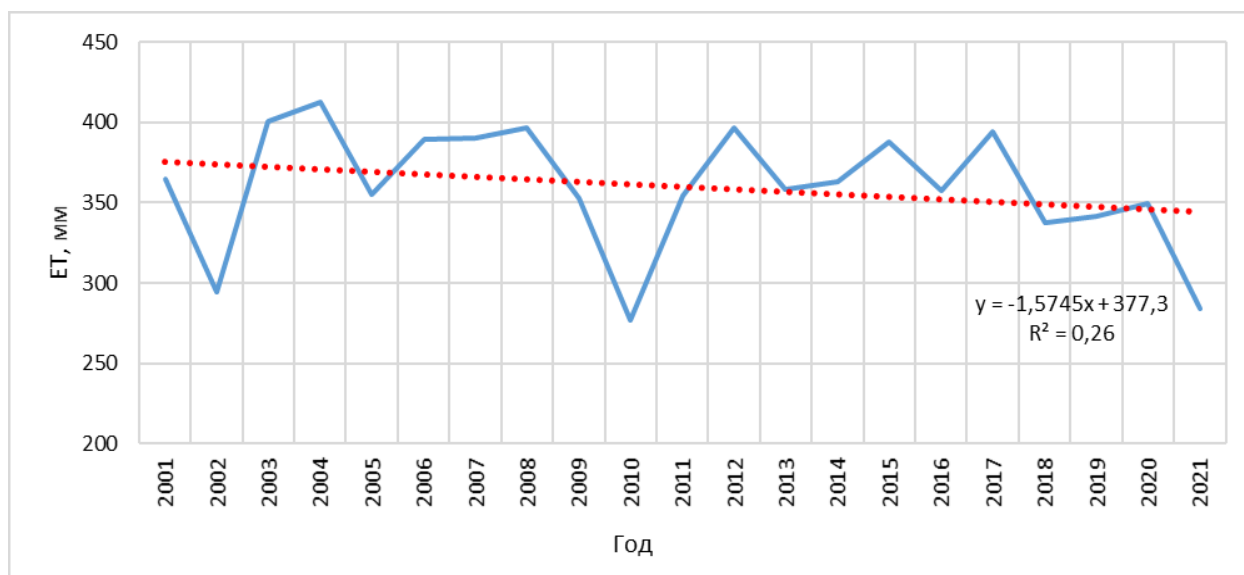


Рис. 4. Общая динамика суммарной эвапотранспирации лесов Среднего Поволжья за 2001-2021 гг.

Линейный тренд временного ряда ET за 20-летний период демонстрирует постепенное снижение испаряемой и транспируемой влаги в атмосферу на исследуемой территории лесов Среднего Поволжья (рис. 4). При этом наблюдается существенное снижение процессов эвапотранспирации в сильно засушливые 2002, 2010 и 2021 годы. Особенно заметно такое снижение в 2010 году, когда на территории Республики Марий Эл и Нижегородской

области имели место крупные лесные пожары (рис. 4). Подобные же тенденции подтверждает динамика временного ряда ЕТ с распределением по всем месяцам вегетационного периода (рис. 5).

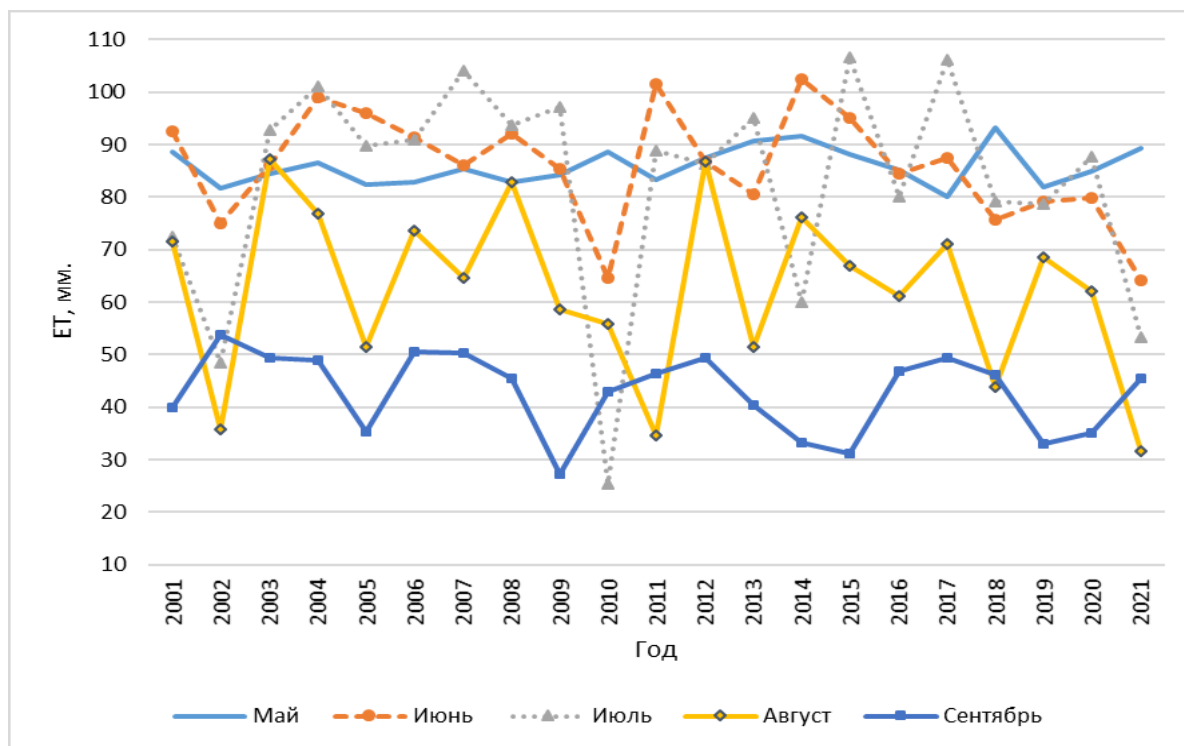


Рис. 5. Динамика средних показателей ЕТ в каждом месяце вегетационного периода за 2001–2021 годы

Период максимальных значений эвапотранспирации приходится на май, июнь и июль, что составляет более 70 % от всех месяцев периода вегетации. Май является периодом быстрого накопления фитомассы лесной растительностью, а июль периодом максимума запасов растительности в лесных экосистемах. Оценка динамики климатических показателей показала тесную связь эвапотранспирации с уровнем осадков и умеренную связь с температурой подстилающей поверхности (рис. 6).

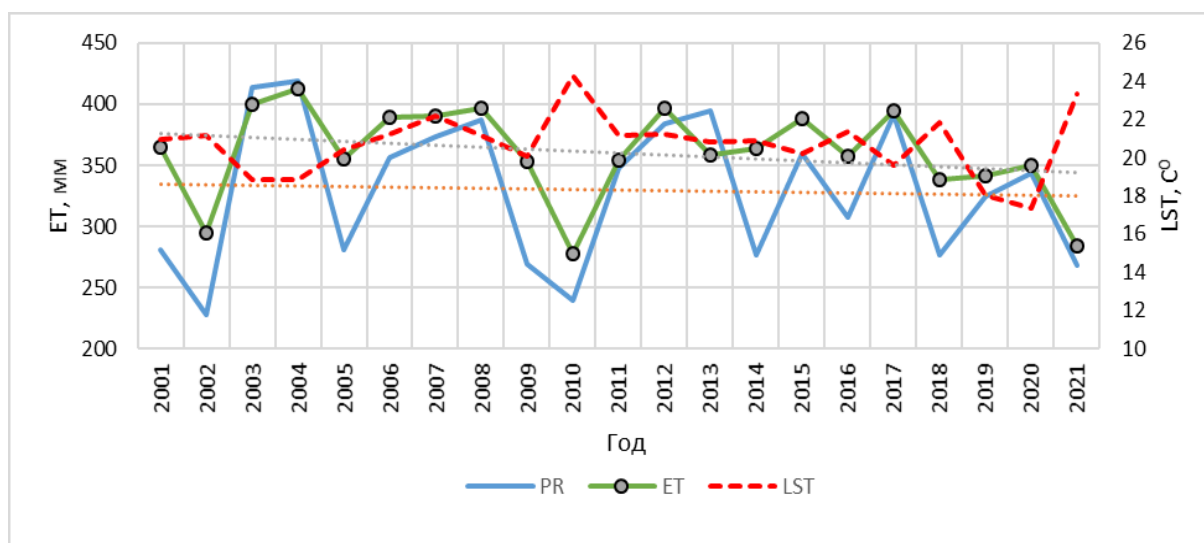


Рис. 6. Динамика средних значений эвапотранспирации (ЕТ), осадков (Pr) и средней температуры (LST) за вегетационные периоды с 2001 по 2021 год

Заключение

В работе проведена оценка эвапотранспирации (ЕТ) лесов Среднего Поволжья и основных факторов, влияющих на нее. Выявлены пространственно-временные закономерности распределения и изменения эвапотранспирации на основе данных MODIS (MOD16A2) за 20-летний период. За исследуемый временной период 2001-2021 гг. значение ЕТ лесов Среднего Поволжья в течение вегетационных периодов снижалось со скоростью 1,57 мм/год⁻¹. Тенденция к снижению усилилась после засухи 2010 года. Выявленная тенденция к более резкому снижению эвапотранспирации по сравнению с уменьшением уровня осадков означает, что рециркуляция воды на региональном уровне с поверхности суши в атмосферу становится слабее, что соответствует выводам других исследователей (Yang et al., 2016).

Анализируя полученное распределение тренда ЕТ за исследуемый период времени, можно сделать вывод о том, что на большей части территории исследования наблюдается общее снижение уровня эвапотранспирации. Максимальный отрицательный тренд потерь показателя (ЕТ) наблюдается на территории Республики Марий Эл и Нижегородской области и частично – в северной части Чувашской Республики. В первую очередь это связано с крупными лесными пожарами 2010 года на территории этих субъектов РФ, приведших к большим потерям в лесном покрове. Умеренные и положительные тренды наблюдаются на севере Нижегородской и Кировской областей и центральной части Республики Марий Эл, что может быть связано с зарастанием больших участков земель залежей и последующим активным участием этого объема фитомассы в потоках водного баланса лесных экосистем.

В результате исследования выявлены различия в ежемесячной динамике эвапотранспирации растительного покрова. В мае, июне и июле наблюдается более высокий уровень ЕТ, связанный в первую очередь с процессами формирования фитомассы (NDVI) лесного покрова в течение всего периода вегетации. Также была выявлена тесная связь эвапотранспирации за вегетационный период с уровнем осадков и умеренная связь с температурой. Осадки и ЕТ демонстрировали практически синхронное колебание. Это означает что дефицит осадков фактически приводит к снижению доступности влаги в лесных насаждениях. Температура оказывала меньшее влияние на ЕТ, так как оставалась относительно стабильной по сравнению с динамикой уровня осадков за весь период исследования, за исключением 2010 и 2021 годов. В этом случае низкое содержание влаги в почве не оказало существенного влияния на уровень эвапотранспирации лесной растительности, который может повышаться при увеличении температурных режимов.

Таким образом, используя спутниковые данные индекса ЕТ в совокупности с климатическими показателями местности, можно проводить качественный анализ влияния стрессовой ситуации на лесные экосистемы Среднего Поволжья. Динамика изменений значений эвапотранспирации (ЕТ) в засушливые периоды 2002, 2010 и 2021 годов практически совпадает с данными повышенных температур атмосферы, что свидетельствует об аномальных явлениях на территории исследования в этот период.



*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 22-16-00094, <https://rscf.ru/project/22-16-00094/>*

Библиографический список

1. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Ша Дж., Лежнин С.А., Ван Дж., Коул Дж., Дергунов Д.М. Анализ трендов временных рядов вегетационных индексов по данным MODIS для оценки влияния засух на лесные насаждения Среднего Поволжья с 2000 по 2020 год // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 181-194. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-181-194.
2. Ермолаева О.С., Зейлигер А.М. Анализ трендов потоков суммарного испарения (за 2003-2017 гг.) по данным продукта MOD16A2 для территории Марковского района Саратовской области // Природообустройство. 2021. № 2. С. 16-25. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-16-25.
3. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н. Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технолог. ун-т, 2020. 266 с.
4. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Меньшиков С.А., Смирнова Л.Н. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 18, № 5. С. 154-166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166
5. Курбанов, Э.А. Моделирование бюджета углерода лесных насаждений на примере сосняков Поволжья // Лесной журнал. 2009. № 2. С. 7-15.
6. Шарый П. А., Шарая Л. С., Сидякина Л.В. Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 4. С. 154-163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163
7. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // Forest. Ecology and Management. 2010. Vol. 259. P. 660-684. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
8. Anderegg W.R.L., Hicke J.A., Fisher R.A., Allen C.D., Aukema J., Bentz B., et al. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate // New. Phytologist. 2015. Vol. 208. P. 674-683. <https://doi.org/10.1111/nph.13477>
9. Biederman J., Scott R., Goulden M., Vargas R., Litvak M., Kolb T., et. al. Terrestrial carbon balance in a drier world: the effects of water availability in southwestern North America // Global Change Biology. 2016. Vol. 22. P. 1867-1879. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13222>
10. Brandt J., Flannigan M., Maynard D. An introduction to Canada's boreal zone: Ecosystem processes, health, sustainability, and environmental issues // Environmental Reviews. 2013. Vol. 21. P. 207-226.
11. Che X., Zhang H.K., Sun Q., Ouyang Z., Liu J. MODIS Evapotranspiration downscaling using a deep neural network trained using Landsat 8 reflectance and temperature data // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. P. 5876. <https://doi.org/10.3390/rs14225876>
12. Denager T., Looms M.C., Sonnenborg T.O., Jensen K.H. Comparison of evapotranspiration estimates using the water balance and the eddy covariance methods // Vadose Zone Journal. 2020. Vol. 19. <http://dx.doi.org/10.1002/vzj2.20032>
13. Gu L., Pallardy S.G., Hosman K.P., Sun Y. Impacts of precipitation variability on plant species and community water stress in a temperate deciduous forest in the central US // Agricultural and. Forest Meteorology. 2016. Vol. 217. P. 120-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.014>
14. Hadiwijaya B., Pepin S., Isabelle P.E., Nadeau D.F. The Dynamics of transpiration to evapotranspiration ratio under wet and dry canopy conditions in a humid boreal forest // Forests. 2020. Vol. 11. P.237. <https://doi.org/10.3390/f11020237>
15. Huang L., Cai J., Zhang B., Chen H., Bai L., Wei Z. Estimation of evapotranspiration using the crop canopy temperature at field to regional scales in large irrigation district // Agric. For. Meteorol. 2019. Vol. 269. P. 305-322. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.024>
16. Jasechko S., Sharp Z.D., Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y., Fawcett P.J. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration // Nature. 2013. Vol. 496. P. 347-350. <https://doi.org/10.1038/nature11983>
17. Kurbanov E., Vorobiev O., Sha J., Li X., Gitas I., Minakou C., Gabdelkhakov A., Martynova M. A survey on the use of GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology in Russia and China // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 5. С. 9-20. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-5-9-20
18. Lai S., El-Adawy A., Sha J., Li X., Wang J., Kurbanov E., Lin Q. Towards an integrated systematic approach for ecological maintenance: Case studies from China and Russia // Ecological Indicators. 2022. Vol. 140, 108982. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108982>
19. Liu X., Sun G., Mitra B., Noormets A., Gavazzi M., Domec J.C., Hallema D.W., Li J., et. al. Drought and thinning have limited impacts on evapotranspiration in a managed pine plantation on the southeastern United States coastal plain // Agricultural and For. Meteorology. 2018. Vol. 262. P. 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.025>

20. Méndez-Barroso L., Vivoni E., Watts C., Rodríguez J. Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region // J. Hydrol. 2009. Vol. 377. P. 59-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.009>
21. Running S.W., Mu Q., Zhao M., Moreno A. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) t product (MOD16A2/A3 and Year year-end gap filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6) // MODIS Land Team. 2019. P. 1-38. <https://www.nts.gov/umt.edu/project/modis/user-guides/mod16c61usersguidev11mar112021.pdf>
22. Sheffield J., Andreadis K., Wood E.F., Lettenmaier D. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: severity–area–duration analysis and temporal variability of large-scale events // Journal of Climate. 2009. Vol. 22. P. 1962–1981. <http://dx.doi.org/10.1175/2008JCLI2722.1>
23. Shinohara Y., Otsuki, K. Comparison of soil-water content between a Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest and an evergreen broadleaved forest in western Japan in a P. pubescens Bamboo Forest // Plant Species Biology. 2015. Vol. 30. P. 96-103. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12076>
24. Sun G., Domec J.C., Amatya, D.M. Forest evapotranspiration: measurement and modelling at multiple scales // Forest hydrology: Processes, management and assessment. 2016. P. 32-50.
25. Sun G., Hallema D., Asbjornsen H. Ecohydrological processes and ecosystem services in the Anthropocene: a review // Ecological processes. 2017. Vol 6. P. 35. <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0104-6>
26. Ungar E.D., Rotenberg E., Raz-Yaseef N., Cohen S., Yakir D., Schiller G. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: Implications for forest management // Forest, ecology and management. 2013. Vol. 298. P. 39–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.003>
27. Wells J., Roberts D., Lee P., Cheng R., Darveau M. A forest of blue – Canada's boreal forest: the world's water-keeper. // International Boreal Conservation Campaign, Seattle. 2010. 74 pp. <http://www.borealscience.org/wp-content/uploads/2012/06/report-forestofblue.pdf>
28. Wang H., Tetzlaff D., Dick J., Soulsby C. Assessing the environmental controls on Scots pine transpiration and the implications for water partitioning in a boreal headwater catchment // Agricultural and forest meteorology. 2017. Vol. 240–241. P. 58-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.002>
29. Wang Y., Cao G., Wang Y., Webb A., Yu P., Wang X. Response of the daily transpiration of a larch plantation to variation in potential evaporation, leaf area index and soil moisture // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. P. 4697. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-41186-1>
30. Xu Y., Xiao F. Assessing Changes in the Value of Forest Ecosystem Services in Response to Climate Change in China // Sustainability. 2022. Vol. 14. P. 4773. <https://doi.org/10.3390/su14084773>
31. Yang Y., Anderson M., Gao F., Xue J., Knipper K., Hain C. Improved daily evapotranspiration estimation using remotely sensed data in a data fusion system // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, Iss. 1772. <https://doi.org/10.3390/rs14081772>
32. Yang Z., Zhang Q., Hao X. Evapotranspiration trend and its relationship with precipitation over the Loess Plateau during the last three decades // Advances in meteorology. 2016. Vol. 2016. Article ID 6809749 <https://doi.org/10.1155/2016/6809749>
33. Zhang J.G., Guan J., Shi W.Y., Yamanaka N., Du S. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China // Ecohydrology. 2015. Vol. 8. P. 137-147. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1495>
34. Zhang Q., Jia X., Shao M., Zhang C., Li X., Ma C. Sap flow of black locust in response to short-term drought in southern Loess Plateau of China // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, Iss. No. 6222. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24669-5>
35. Zhou Q., Sun Z., Liu X., Wei X., Peng Z., Yue C., Luo Y. Temporal soil moisture variations in different vegetation cover types in karst areas of southwest China: A plot scale case study // Water. 2019. Vol. 11. P. 1423. <http://dx.doi.org/10.3390/w11071423>

References

1. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Sha Dzh., Lezhnin S.A., Van Dzh., Koyl Dzh., Dergunov D.M. Analiz trendov vremennykh ryadov vegetatsionnykh indeksov po dannym MODIS dlya otsenki vliyaniya zasukh na lesnye nasa-zhdeniya Srednego Povolzh'ya s 2000 po 2020 god (Analysis of trends in the time series of vegetation indices according to MODIS data to assess the impact of droughts on forest plantations in the Middle Volga region from 2000 to 2020). *Sovremennye problemy distantsionno-go zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. T. 19, № 4. P. 181-194. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-181-194.
2. Ermolaeva O.S., Zeiliger A.M. Analiz trendov potokov summarnogo ispareniya (za 2003-2017 gg.) po dannym produkta MOD16A2 dlya territorii Marksovskogo raiona Saratovskoi oblasti (Analysis of trends in evapotranspi-ration flows (for 2003-2017) according to the MOD16A2 product for the territory of the Markovsky district of the Saratov region). *Priroda-obustroistvo*. 2021. № 2. P. 16-25. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-16-25.
3. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N. Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve: ucheb. posobie (Remote methods in forestry: a tutorial). Ioshkar-Ola: Povolzhskii gos. tekhnolog. un-t, 2020. 266 p.
4. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Men'shikov C.A., Smirnova L.N. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenii i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoi oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 (Recognition of forest

- plantations and dominant tree species of the Penza region according to the data of the Sentinel-2 satellite). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. T. 18, № 5. P. 154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166
5. Kurbanov, E.A. Modelirovanie byudzheta ugleroda lesnykh nasazhdenii na primere sosnyakov Povol-zh'ya (Modeling the carbon budget of forest plantations on the example of pine forests of the Volga region). *Lesnoi zhurnal*. 2009. № 2. P. 7–15.
 6. Sharyi P. A., Sharaya L. S., Sidiyakina L. V. Svyaz' NDVI lesov i kharakteristik klimata Volzhskogo basseina (Relationship between NDVI forests and climate characteristics of the Volga basin). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. T. 17, № 4. P. 154–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163
 7. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259. P. 660–684. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
 8. Anderegg W.R.L., Hicke J.A., Fisher R.A., Allen C.D., Aukema J., Bentz B., et al. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*. 2015. Vol. 208. P. 674–683. <https://doi.org/10.1111/nph.13477>
 9. Biederman J., Scott R., Goulden M., Vargas R., Litvak M., Kolb T., et. al. Terrestrial carbon balance in a drier world: the effects of water availability in southwestern North America. *Global Change Biology*. 2016. Vol. 22. P. 1867–1879. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13222>
 10. Brandt J., Flannigan M., Maynard D. An introduction to Canada's boreal zone: Ecosystem processes, health, sustainability, and environmental issues. *Environmental Reviews*. 2013. Vol. 21. P. 207–226.
 11. Che X., Zhang H.K., Sun Q., Ouyang Z., Liu J. MODIS Evapotranspiration downscaling using a deep neural network trained using Landsat 8 reflectance and temperature data. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. P. 5876. <https://doi.org/10.3390/rs14225876>
 12. Denager T., Looms M.C., Sonnenborg T.O., Jensen K.H. Comparison of evapotranspiration estimates using the water balance and the eddy covariance methods. *Vadose Zone Journal*. 2020. Vol. 19. <http://dx.doi.org/10.1002/vzj2.20032>
 13. Gu L., Pallardy S.G., Hosman K.P., Sun Y. Impacts of precipitation variability on plant species and community water stress in a temperate deciduous forest in the central US. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2016. Vol. 217. P. 120–136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.014>
 14. Hadiwijaya B., Pepin S., Isabelle P.E., Nadeau D.F. The Dynamics of transpiration to evapotranspiration ratio under wet and dry canopy conditions in a humid boreal forest. *Forests*. 2020. Vol. 11. P.237. <https://doi.org/10.3390/f11020237>
 15. Huang L., Cai J., Zhang B., Chen H., Bai L., Wei Z. Estimation of evapotranspiration using the crop canopy temperature at field to regional scales in large irrigation district. *Agric. For. Meteorol.* 2019. Vol. 269. P. 305–322. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.024>
 16. Jasechko S., Sharp Z.D., Gibson J.J.; Birks S.J., Yi Y., Fawcett P.J. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*. 2013. Vol. 496. P. 347–350. <https://doi.org/10.1038/nature11983>
 17. Kurbanov E., Vorobiev O., Sha J., Li X., Gitas I., Minakou C., Gabdelkhakov A., Martynova M. A survey on the use of GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology in Russia and China. *Sovremennye problemy distantsionno-go zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. T. 17, № 5. C. 9–20. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-5-9-20
 18. Lai S., El-Adawy A., Sha J., Li X., Wang J., Kurbanov E., Lin Q. Towards an integrated systematic approach for ecological maintenance: Case studies from China and Russia. *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 140, 108982. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108982>
 19. Liu X., Sun G., Mitra B., Noormets A., Gavazzi M., Domec J.C, Hallema D.W., Li J., et. al. Drought and thinning have limited impacts on evapotranspiration in a managed pine plantation on the southeastern United States coastal plain. *Agricultural and For. Meteorology*. 2018. Vol. 262. P. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.025>
 20. Méndez-Barroso L., Vivoni E., Watts C., Rodríguez J. Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region. *J. Hydrol.* 2009. Vol. 377. P. 59–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.009>
 21. Running S.W., Mu Q., Zhao M., Moreno A. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) t product (MOD16A2/A3 and Year year-end gap filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). *MODIS Land Team*. 2019. P. 1–38. <https://www.nts.gov/umt.edu/project/modis/user-guides/mod16c61usersguidev11mar112021.pdf>
 22. Sheffield J., Andreadis K., Wood E.F., Lettenmaier D. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: severity–area–duration analysis and temporal variability of large-scale events. *Journal of Climate*. 2009. Vol. 22. P. 1962–1981. <http://dx.doi.org/10.1175/2008JCLI2722.1>
 23. Shinohara Y., Otsuki, K. Comparison of soil-water content between a Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest and an evergreen broadleaved forest in western Japan in a P. pubescens Bamboo Forest. *Plant Species Biology*. 2015. Vol. 30. P. 96–103. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12076>

24. Sun G., Domec J.C., Amatya, D.M. Forest evapotranspiration: measurement and modelling at multiple scales. *Forest hydrology: Processes, management and assessment*. 2016. P. 32-50.
25. Sun G., Hallema D., Asbjornsen H. Ecohydrological processes and ecosystem services in the Anthropocene: a review. *Ecological processes*. 2017. Vol 6. P. 35. <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0104-6>
26. Ungar E.D., Rotenberg E., Raz-Yaseef N., Cohen S., Yakir D., Schiller G. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: Implications for forest management. *Forest, ecology and management*. 2013. Vol. 298. P. 39–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.003>
27. Wells J., Roberts D., Lee P., Cheng R., Darveau M. A forest of blue – Canada’s boreal forest: the world’s water-keeper. International Boreal Conservation Campaign, Seattle. 2010. 74 pp. <http://www.borealscience.org/wp-content/uploads/2012/06/report-forestofblue.pdf>
28. Wang H., Tetzlaff D., Dick J., Soulsby C. Assessing the environmental controls on Scots pine transpiration and the implications for water partitioning in a boreal headwater catchment. *Agricultural and forest meteorology*. 2017. Vol. 240–241. P. 58-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.002>
29. Wang Y., Cao G., Wang Y., Webb A., Yu P., Wang X. Response of the daily transpiration of a larch plantation to variation in potential evaporation, leaf area index and soil moisture. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 4697. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-41186-1>
30. Xu Y., Xiao F. Assessing Changes in the Value of Forest Ecosystem Services in Response to Climate Change in China. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. P. 4773. <https://doi.org/10.3390/su14084773>
31. Yang Y., Anderson M., Gao F., Xue J., Knipper K., Hain C. Improved daily evapotranspiration estimation using remotely sensed data in a data fusion system. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, Iss. 1772. <https://doi.org/10.3390/rs14081772>
32. Yang Z., Zhang Q., Hao X. Evapotranspiration trend and its relationship with precipitation over the Loess Plateau during the last three decades. *Advances in meteorology*. 2016. Vol. 2016. Article ID 6809749 <https://doi.org/10.1155/2016/6809749>
33. Zhang J.G., Guan J., Shi W.Y., Yamanaka N., Du S. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China. *Ecohydrology*. 2015. Vol. 8. P. 137-147. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1495>
34. Zhang Q., Jia X., Shao M., Zhang C., Li X., Ma C. Sap flow of black locust in response to short-term drought in southern Loess Plateau of China. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, Iss. No. 6222. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24669-5>
35. Zhou Q., Sun Z., Liu X., Wei X., Peng Z., Yue C., Luo Y. Temporal soil moisture variations in different vegetation cover types in karst areas of southwest China: A plot scale case study. *Water*. 2019. Vol. 11. P. 1423. <http://dx.doi.org/10.3390/w11071423>