

## Пространственно-временная динамика эвапотранспирации в бассейне реки Подкаменной Тунгуски

Т. А. БУРЕНИНА<sup>1</sup>, И. В. ДАНИЛОВА<sup>1, 2</sup>, Н. А. МИХЕЕВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
(обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН)  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28  
E-mail: burenina@ksc.krasn.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, к. 1

Статья поступила 16.02.2022

После доработки 21.04.2022

Принята к печати 25.04.2022

### АННОТАЦИЯ

На основе ландшафтной дифференциации территории сделана оценка гидрологической роли доминирующих в бассейне Подкаменной Тунгуски лесных сообществ по их вкладу в суммарное испарение на водосборе. Используются показатели эвапотранспирации, полученные по данным дистанционного зондирования Земли MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16 ET), в которых учитываются климатические показатели исследуемой территории, типы подстилающей поверхности, а также разнообразие растительного покрова. Исследования показали, что эвапотранспирация выделенных классов лесной растительности характеризуется значительной изменчивостью как в пространстве, так и во времени. Вариабельность эвапотранспирации по годам в первую очередь связана с изменчивостью метеорологических элементов и величиной листового индекса. В пространственном аспекте изменчивость испарения определяется общеклиматическими характеристиками района исследований и различными вариантами породного состава лесных насаждений. В результате анализа данных выявлена тенденция снижения годовой эвапотранспирации в бассейне Подкаменной Тунгуски с 2000 по 2014 г. Сравнительный анализ трендов эвапотранспирации с трендами температуры воздуха и осадков подтверждает, что тенденция к снижению эвапотранспирации обусловлена изменением климатических условий на тестовой территории. Установлено, что ландшафтная структура водосборов может быть использована для индикации процессов, формирующих эвапотранспирацию как важную составляющую водного баланса, и для определения гидрологически значимых границ ландшафтов. Оценка испарения с поверхности суши по данным дистанционного зондирования Земли (продукт MOD16 ET) может быть использована при водобалансовых расчетах в различных по масштабам водосборных бассейнах, особенно при отсутствии базы данных по стоку.

**Ключевые слова:** Подкаменная Тунгуска, лесные экосистемы, лесогидрологические комплексы, испарение, MOD16 ET.

Суммарное испарение – важный компонент и ключевое звено гидрологического цикла речных бассейнов, в котором важную роль играет растительность. Лесные экосистемы, обла-

дая более сложной структурой, чем другие растительные сообщества, оказывают влияние на все составляющие суммарного испарения, что отражается на формировании стока

речных водосборов. В начале 30-х годов прошлого столетия для обозначения испарения с поверхности речных бассейнов, включающих разнородные участки, характер которых изменяется в пространстве и во времени, был предложен термин “суммарное испарение”. Согласно А. И. Будаговскому [1964], под суммарным испарением понимают испарение с покрытых растительностью участков суши, слагающееся из транспирации, испарения влаги с поверхности земной поверхности, а также из испарения осадков, задержанных растительным покровом. Таким образом, суммарное испарение на неоднородной территории, суммированное во времени, имеет общий смысл с термином “эвапотранспирация”, который появился в 50-е годы прошлого столетия для количественной оценки переноса воды в экосистемах.

Определение суммарного испарения влаги лесом до настоящего времени представляет собой сложную и не всегда решаемую с необходимой точностью задачу. Поэтому рассмотрение различных подходов к вычислению данного элемента водного баланса вызывает, по нашему мнению, определенный интерес. Существует три подхода к определению суммарного испарения: методы непосредственных полевых измерений, расчетные методы и эмпирические зависимости. В Советском Союзе большое внимание уделялось исследованию данных натуральных наблюдений [Молчанов, 1960; Раунер, 1972; Лебедев, 1982; Федоров, 1987; и др.]. При этом многие исследователи отмечали большую трудоемкость методов прямого измерения суммарного испарения.

Значительный вклад в изучение испарения сделан А. Р. Константиновым [1968]. В его монографии дается анализ способов измерения испарения с поверхности почвы, снега и воды. Рассматриваются методы исследования турбулентных процессов, в результате анализа которых разрабатывается методика расчета испарения по данным градиентных измерений. Упрощенный вариант этой методики позволяет рассчитывать испарение по температуре и влажности воздуха, измеренным на сетевых метеорологических станциях.

Необходимость изучения изменчивости данного процесса во времени и по площади привела к созданию целого ряда расчетных методов для определения суммарного испарения, основанных на эмпирических моделях

[Будько, 1956, 1971; Будаговский, 1989; Бондарик, Карпечко, 1999]. За рубежом для оценки суммарного испарения развивались главным образом расчетные методы [Morton, 1984; Klaassen, 2001; Zhang et al., 2001].

Из расчетных методов наиболее часто применяется метод водного баланса, где испарение – остаточный член уравнения водного баланса. Используется при наличии данных сетевых наблюдений за атмосферными осадками и речным стоком. Как отмечается в работе [Антипов, Фёдоров, 2000], этот метод целесообразно применять по хорошо изученному водосбору значительной площади, когда сток с этого водосбора полностью дренируется рекой, поверхностные и подземные контуры его совпадают, а величиной водообмена с соседними водосборами можно пренебречь.

Широкое распространение получили расчетные схемы М. И. Будько [1956], А. И. Будаговского [1964], Х. Л. Пенмана [1968]. Они основаны на теории турбулентной диффузии и теплового баланса подстилающей территории. В рамках модели, предложенной М. И. Будько [1971], разрабатываются различные вариации расчетных методов эвапотранспирации в речном бассейне с учетом орографии и растительного покрова [Donohue et al., 2012; Yiping et al., 2021; и др.]. Одной из наиболее распространенных моделей для изучения суммарного испарения благодаря удобству расчета и легкости получения необходимых метеорологических данных является формула Пенмана – Монтейта, которую многие исследователи модифицируют с учетом факторов, влияющих на процесс эвапотранспирации [Yang, 2007; Zhang et al., 2016].

Для оценки фактического суммарного испарения используется метод энергетического баланса. Применение таких инструментов, как сцинтиллометр, пластины теплового потока почвы или измерители радиации, можно считать компоненты энергетического баланса и определить количество энергии, доступной для фактического суммарного испарения. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) [Bastiaanssen et al., 1998] и METRIC (Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration) [Allen et al., 2007] решают энергетический баланс на земной поверхности с использованием спутниковых снимков. Это позволяет рассчитывать как фактическую, так

и потенциальную эвапотранспирацию на по-пиксельной основе. SEBAL и METRIC могут отображать эти ключевые индикаторы во времени и пространстве, по дням, неделям или годам.

Оценка испарения с поверхности суши по данным дистанционного зондирования Земли SEBS (Surface Energy Balance Systems), SEBAL и METRIC [Gibson et al., 2013; Leng, 2017] была неоднократно тестирована в различных по масштабам и направленности подспутниковых экспериментах, в том числе и в России [Музылев и др., 2019].

С появлением спектрометра среднего пространственного разрешения MODIS космическое агентство США NASA для оценки эвапотранспирации использует метод Пенмана – Монтейта [Monteith, 1965], учитывающий климатические характеристики исследуемой территории, типы подстилающей поверхности, а также разнообразие растительного покрова [Ми, 2007, 2011; Расулова, 2021].

Согласно классическим работам лесных гидрологов [Молчанов, 1960; Федоров, 1987; Федоров и др., 1990] суммарное испарение влаги лесом и его гидрологический режим обусловлены типом леса, лесорастительными условиями и продуктивностью, которые взаи-

мосвязаны. Различающиеся по лесоводственно-таксационным характеристикам участки леса по-разному влияют на суммарное испарение и, как следствие, на количество воды, поступающей с водосбора в речную сеть.

Перед авторами настоящей работы стояла задача оценить гидрологическую роль доминирующих лесных сообществ в бассейне р. Подкаменной Тунгуски по их вкладу в суммарное испарение на водосборе.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на Среднесибирском плоскогорье в пределах водосборного бассейна р. Подкаменной Тунгуски, ограниченного гидропостом Кузьмовка (рис. 1). Длина реки на рассматриваемом участке составляет около 1700 км, площадь бассейна – 223 тыс. км<sup>2</sup>. Рельеф исследуемой территории среднегорный. В геологическом строении преобладают траппы. Регион расположен в зоне островного распространения многолетнемерзлых грунтов. Мощность мерзлоты уменьшается с северо-востока на юго-запад от 250 до 50 м. В этом же направлении увеличивается площадь таликов и мощность деятельного слоя.

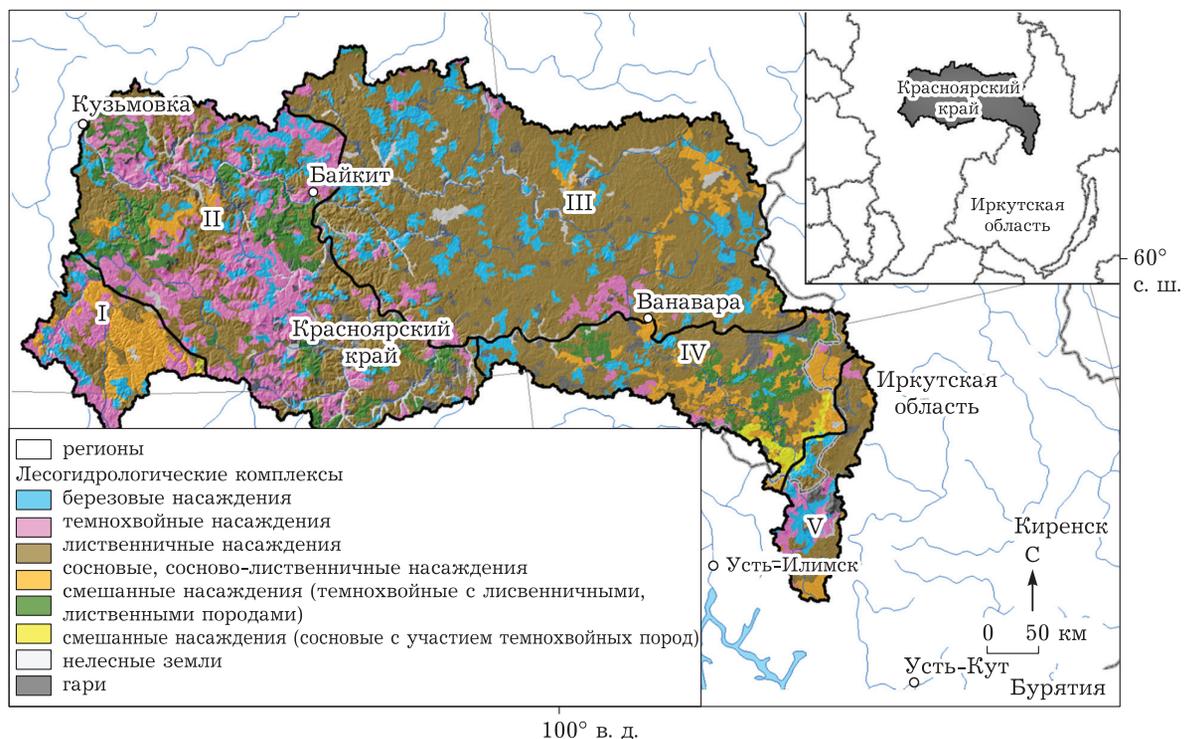


Рис. 1. Распределение лесогидрологических комплексов и регионов в бассейне р. Подкаменной Тунгуски

Почвенный покров наиболее разнообразен по сравнению с другими провинциями Средней Сибири. Это связано с пестротой почвообразующих пород и изменением мощности деятельного слоя. При отсутствии мерзлоты или ее глубоком залегании на безкарбонатных породах формируются подзолистые почвы, а на карбонатных – дерново-карбонатные и дерново-перегнойные. При неглубоком залегании мерзлоты на магматических и карбонатных породах развиваются мерзлотно-таежные нейтральные почвы, на безкарбонатных – кислые. В понижениях рельефа, под мощным моховым покровом, там, где мощность деятельного слоя особенно мала, встречаются глеево-мерзлотно-таежные почвы [Гвоздецкий, Михайлов, 1987].

Бассейн Подкаменной Тунгуски полностью расположен в зоне средней тайги. Основная черта климата – резкая континентальность, возрастающая с запада на восток. Она проявляется как в больших различиях между зимними и летними температурами, так и между дневными и ночными. Наибольшая степень континентальности регистрируется по метеостанции Стрелка-Чуны, где разница между среднемесячными температурами самого холодного и самого теплого месяца достигает 60 °С, экстремальными температурами до 82 °С. Средняя температура самого теплого месяца – июля на метеостанциях бассейна варьируется от 16,8 до 17 °С, исключение составляет метеостанция Стрелка-Чуны, где средняя температура июля +15,9 °С. Диапазон изменения температуры воздуха января в меридиональном направлении достигает 3,1 °С (от –28,1 °С (Кузьмовка) до –31,2 °С (Стрелка-Чуны)), на крайней юго-восточной метеостанции Чемдальск вновь наблюдается повышение температуры января до –28,4 °С.

Характер увлажнения территории является одним из ведущих факторов дифференциации ландшафтов. Неравномерное распределение осадков по территории связано с ослаблением западного переноса воздуха и, соответственно, уменьшением осадков с запада на восток. На западе осадков выпадает 666 мм в год (метеостанция Кузьмовка), а в верховьях реки на юго-востоке – 355 мм (метеостанция Чемдальск).

Согласно лесорастительному районированию [Коротков, 1994] территория включает

Байкитский, Вельминский, Тунгусо-Чунский лесорастительные округа Среднесибирской лесорастительной области. На северной границе соседствует с Нижне-Тунгусским лесорастительным округом северо-таежных лесов. Это слабо расчлененная часть Среднесибирского плоскогорья, занятая хвойными породами, основным лесообразователем являются лиственницы сибирская, Гмелина, Чекановского. Кроме того, в растительном покрове значительное распространение имеют темнохвойные и лиственнично-темнохвойные леса. Ненарушенные темнохвойные леса состоят из ели, кедра, пихты, их производные варианты – лиственничные и мелколиственные леса. Темнохвойные леса из кедра, ели и пихты являются климаксовыми и доминируют на водоразделах разного уровня и в долинах с умеренным и слабым дренажем. Лиственница как лесобразующая порода приурочена к узкому диапазону экотопов с длительной и многолетней мерзлотой. В качестве вторичной породы она формирует послепожарные сообщества на хорошо гумусированных почвах разного механического состава. Сосновые и лиственнично-сосновые леса на почвообразующих породах легкого гранулометрического состава поддерживаются периодическими пожарами [Лесные экосистемы ..., 2002].

С точки зрения влияния различных лесных сообществ на эвапотранспирацию внимание было акцентировано на оценке их гидрологических функций. Рассматривались участки земной поверхности, которые обладают характерной эвапотранспирацией, сложившейся в результате сочетания определенных типов растительности и почв с соответствующим климатом и рельефом. На основе анализа карт растительного покрова [проект Siberia-II ([www.siberia2.uni-jena.de](http://www.siberia2.uni-jena.de)); Bartalev et al., 2003; Барталев и др., 2011] выполнена дифференциация водосбора Подкаменной Тунгуски на три типа земной поверхности: не покрытые растительностью земли; травяно-кустарниковые + болота и т. п.; лесопокрытые. Для типа лесопокрытых земель выделены классы земной поверхности, которые являются значимыми в определении таких важнейших экофизиологических характеристик наземного покрова, как листовой индекс и эвапотранспирация: гари, лиственничные, сосновые, темнохвойные, березовые,

смешанные темнохвойные с лиственничными и лиственными породами, смешанные темнохвойно-сосновые насаждения. Выделенные вышеперечисленные классы условно можно назвать “лесогидрологические комплексы”, так как они играют важную стокоформирующую роль на водосборе через свое влияние на суммарное испарение.

Следующий шаг – интеграция лесогидрологических комплексов изучаемой территории на более крупные единицы (районы), в границах которых наблюдается сходство географических явлений и компонентов ландшафтов, а также пространственного распределения факторов климата и подстилающей поверхности. С этой целью мы проанализировали климатические характеристики исследуемой территории. Для этого были взяты месячные значения температур воздуха и суммы атмосферных осадков по данным метеорологических станций из архива ВНИИГМИ-МЦД за период 2000–2014 гг. (<http://www.meteo.ru>). Осреднение данных по осадкам и температурам воздуха проводилось по шести станциям Красноярского края (Кузьмовка, Байкит, Усть-Камо, Кербо, Стрелка, Чемдалск) и двум метеостанциям Иркутской области (Ика, Токма).

В структуре водного баланса испарение является одной из основных составляющих. База данных Terra MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006>) была использована для вычисления эвапотранспирации за период 2000–2014 гг. Пространственное разрешение данного продукта составляет 500 м. Продукт MOD16 представляет собой 8-суточный растр потоков эвапотранспирации с поверхности суши. По данным MOD16 рассчитывалась суммарная эвапотранспирация для каждого месяца, а затем суммировалась по сезонам. Анализ эвапотранспирации по сезонам связан с тем, что в сезонном разрезе механизм суммарного испарения абсолютно различен. Зимой испаряется влага только со снега, включая сублимацию с поверхности снежного покрова и испарение задержанных твердых осадков кронами деревьев. Летом к физическому испарению с почвы и осадков, задержанных пологом леса, добавляется расход влаги на транспирацию лиственной деревьев и живым напочвенным покровом (травостой, кустарники, мох).

Длительность “зимнего сезона” мы определили по продолжительности залегания устойчивого снежного покрова – с 1 ноября по 31 марта. В апреле в связи с повышением среднесуточной температуры воздуха испарение со снега имеет иной механизм, чем в период с отрицательными температурами. Апрель и май – переходный период к периоду вегетации, когда растениями тратится значительное количество влаги на транспирацию. В “летний сезон” в наш анализ были включены все летние месяцы. Осень – очень сложный период для анализа эвапотранспирации, поскольку она практически прекращается, на задержание осадков кронами деревьев “работают” только хвойные породы, а испарение с почвы из-за низких температур воздуха практически отсутствует. Это переходный этап к зимней эвапотранспирации охватывает промежуток времени с 1 сентября по 31 октября.

Одной из характеристик лесных насаждений является индекс листовой поверхности LAI (leaf area index), который меняется в зависимости от преобладающей породы, среднего возраста древостоя, рельефа [Glatthorn et al., 2017]. Для расчета LAI были использованы данные Terra MODIS MOD15A2H.006 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006>) за период 2002–2014 гг. Пространственное разрешение MOD15 составляет 500 м, шаг агрегации – 4 дня. Индекс характеризует отношение суммарной площади листьев (односторонней) и хвои (полной) к единице площади участка, занятого фитоценозом.

Геопространственный анализ данных MODIS (эвапотранспирация и индекс листовой поверхности) выполнялся с использованием облачной платформы Google Earth Engine.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для того чтобы проанализировать, как структура растительного покрова в бассейне р. Подкаменной Тунгуски влияет на суммарное испарение, и оценить гидрологическую роль доминирующих на водосборе лесных сообществ, выполнена ландшафтная дифференциация исследуемой территории с позиций гидрологической однородности, подразумевая, что каждый природный комплекс имеет определенное гидрологическое содержание. Такой

подход идентичен выделению стокоформирующих комплексов (СФК) или ландшафтно-гидрологических комплексов (ЛГК), в свое время предложенных Ю. Б. Виноградовым [1988] и А. Н. Антиповым [2000]. Основное различие выделяемых природных комплексов от СФК и ЛГК заключается в том, что во главу угла ставилась оценка гидрологической роли леса.

На основе комплексного анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM, карт растительного покрова и почвенной карты Красноярского края и Иркутской области [www.siberia2.uni-jena.de; Rozhkov, 2009], а также метеорологических данных на территории бассейна Подкаменной Тунгуски были выделены регионы, однородные по ландшафтными и лесорастительным условиям. В них были включены различные лесогидрологические комплексы, которые играют особую роль в структуре водного баланса каждого региона и бассейна в целом (см. рис. 1).

Как показал анализ полученных данных, значения годовой эвапотранспирации разли-

чаются как по регионам, так и по лесогидрологическим комплексам (рис. 2). При этом в зимний период (1 ноября – 31 марта) выделенные лесогидрологические комплексы испаряют 10–14 % от суммарного испарения, в переходные сезоны (1 апреля – 31 мая, 1 сентября – 31 октября) – 25–30 %, а в период вегетации (1 июня – 31 августа) – 60–65 %. Анализ изменения эвапотранспирации по сезонам показал, что в зимний период испарение в листопадных классах земной поверхности практически не отличается от классов темнохвойных и сосновых насаждений, что говорит о том, что в отношении суммарного испарения эти насаждения “работают” практически одинаково. Заметные различия в расходах влаги на испарение между этими лесогидрологическими комплексами проявляются в период вегетации, что вполне объяснимо. В этот период представленные древесные породы имеют очень большие различия по интенсивности транспирации. Также различия в испарении задержанных пологом осадков

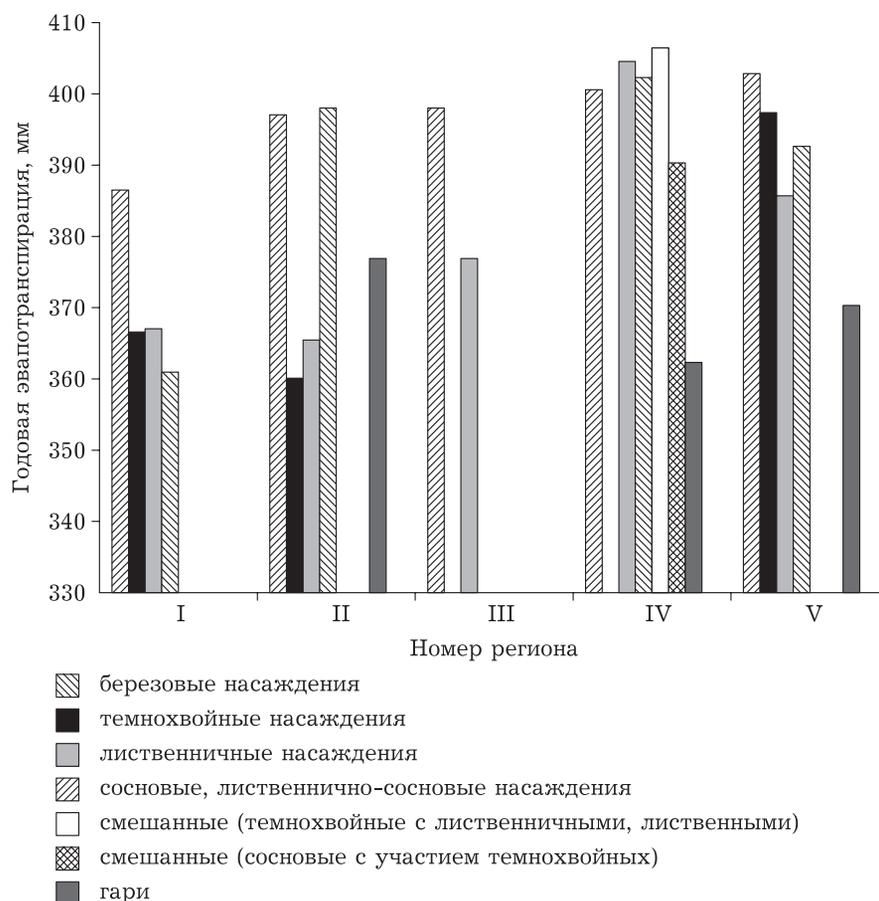


Рис. 2. Средняя годовая эвапотранспирация лесогидрологических комплексов за 2000–2014 гг. по регионам

наблюдаются в зависимости от породного состава и особенностей кроны древостоев.

Одним из ключевых факторов, определяющих количественные показатели эвапотранспирации, является поступающая на земную поверхность солнечная радиация. Косвенным показателем интенсивности солнечной радиации, но более доступным для использования является температура воздуха. Особенно это актуально для сезона вегетации, когда от температуры воздуха зависит не только расход влаги на транспирацию растительным покровом, но и интенсивность испарения осадков, задержанных кронами деревьев, и физическое испарение почвы. Сравнительный анализ изменения эвапотранспирации и суммы температур за сезон вегетации показал значительные различия динамики этих показателей по регионам.

Для регионов I и II наибольшие значения эвапотранспирации приходятся на максимальные суммы температур. Абсолютный минимум эвапотранспирации для всех представленных здесь лесогидрологических комплексов наблюдался в 2010 г., когда сумма летних температур в Северо-Енисейском составляла всего 38 °С, а в Кузьмовке – 36 °С, осадков в этот год выпало на 10–15 % выше средней многолетней величины. Этого тепла было недостаточно, чтобы обеспечить оптимальный расход влаги на испарение во всех лесогидрологических комплексах.

В регионах III–IV не просматривается такой четкой связи между суммой летних температур и эвапотранспирацией, как в первых двух. Чем дальше на восток, суммы летних температур растут на 4–6 °, но недостаточное количество осадков ограничивает эвапотранспирацию. И только в те годы, когда осадков выпадает на 15–20 % выше нормы при сумме температур 47–48 °С, березняки способны испарять до 280 мм за период вегетации, а лиственные насаждения при сумме температур 46–48 °С тратят на эвапотранспирацию 250–260 мм.

Для V региона из-за отсутствия данных с репрезентативных метеостанций не удалось проанализировать связь расхода влаги на испарение с метеорологическими параметрами.

Анализ значений эвапотранспирации каждого лесогидрологического комплекса внутри регионов показал, что независимо от геогра-

фического положения и метеорологических факторов наибольшая изменчивость характерна для березовых насаждений. В них наблюдается значительная вариабельность эвапотранспирации как по годам, так и в рамках каждого года по регионам. Для лиственныхников, несмотря на изменчивость суммарного испарения по годам, просматривается тенденция увеличения этого показателя с запада на восток до V региона (средняя многолетняя величина эвапотранспирации изменяется от 367 до 405 мм в год), в V регионе отмечается ее снижение, в среднем почти на 20 мм в год. Аналогичная тенденция прослеживается и для лесогидрологических комплексов, представленных сосновыми и сосново-лиственными насаждениями. Разница в среднемноголетних показателях эвапотранспирации между сосняками на востоке и западе составляет около 40 мм.

Темнохвойные насаждения больше всего тратят влаги на суммарное испарение в I и V регионах, для II региона характерны минимальные значения. Очевидно, это связано с тем, что в I и V регионах значительная доля в составе древостоя представлена кедром. Отличаясь от пихты и ели более высоким значением биомассы и особенностями кроны, кедры способны перехватывать и испарять больше осадков (как твердых, так и жидких), что в итоге отражается на общей величине эвапотранспирации. Абсолютные максимумы эвапотранспирации во всех трех регионах наблюдались в 2001–2003 гг., что как уже отмечалось выше, связано с большими суммами летних температур для этих территорий. Абсолютный минимум эвапотранспирации для I и II регионов имел место в 2010 г., лето которого было самым холодным за период наших наблюдений.

Анализируя изменение суммарного испарения лесогидрологических комплексов по годам, замечена одна особенность динамики этого показателя – тенденция снижения годовой эвапотранспирации с 2000 по 2014 г. Это прослеживается как на уровне регионов, так и в целом для исследуемой территории (рис. 3).

Полученные тренды можно объяснить с позиций изменения климатических условий. Анализ трендов температуры воздуха и осадков по реперным метеостанциям в бассейне

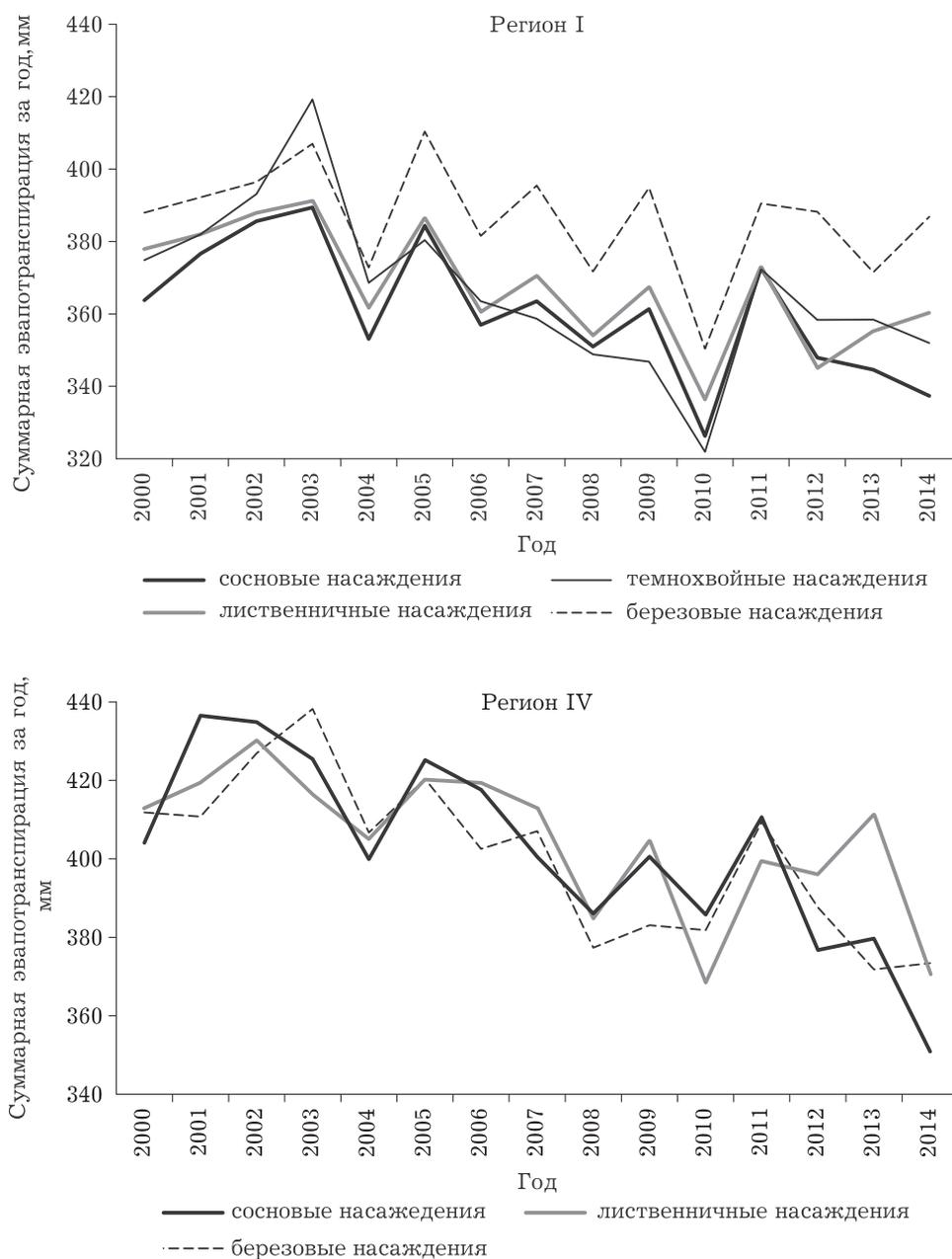


Рис. 3. Динамика годовой эвапотранспирации лесогидрологических комплексов в регионах I и IV

р. Подкаменной Тунгуски (рис. 4) показывает повышение среднегодовой температуры воздуха при некотором снижении суммы годовых осадков (за исключением показателей на метеостанции Северо-Енисейский), т. е. полученные результаты подтверждают, что тенденция к снижению эвапотранспирации обусловлена изменением климата в бассейне реки.

Как известно, данные дистанционного зондирования Земли MODIS Global Evapotranspi-

ration Project (MOD16) основываются на метеорологических показателях и биометрических параметрах растительного покрова, в частности на индексе листовой поверхности. Известно, что листовой индекс растительных сообществ изменяется по фенофазам. При анализе данных по эвапотранспирации мы использовали осредненное значение этого показателя за период 1 июня – 31 августа, как в лесогидрологических комплексах, так и в выде-

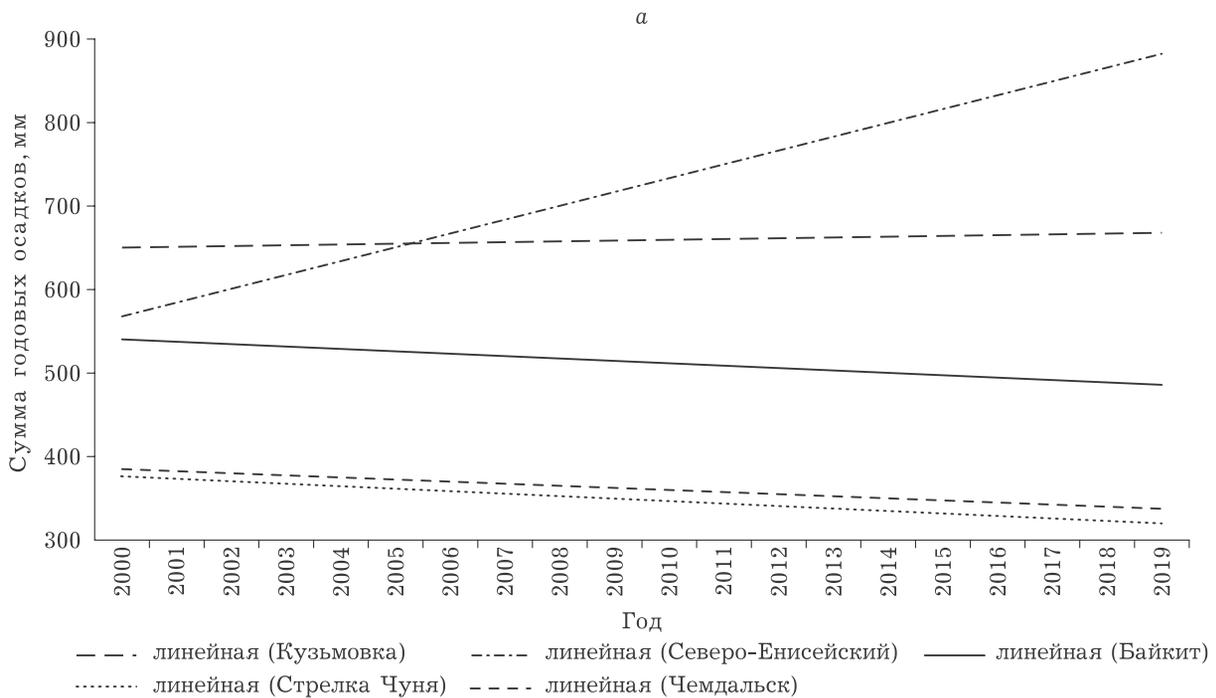


Рис. 4. Тренды суммы годовых осадков (а) и среднегодовой температуры воздуха (б) на реперных метеостанциях исследуемого района

ленных регионах (I–V) бассейна р. Подкаменной Тунгуски.

Наибольшие значения листового индекса имеют насаждения, где преобладает береза. Поэтому с учетом того, что интенсивность транспирации у лиственных пород более высокая, чем у хвойных, и эти насаждения имеют более высокие значения листового индекса, вполне объяснимо, почему при одина-

ковых погодных условиях суммарное испарение с единицы площади в них выше, чем в других фитоценозах. Изменчивость листового индекса по годам определяется продолжительностью вегетационных периодов, что зависит от межгодового варьирования погодноклиматических условий.

Сравнение листового индекса по регионам бассейна показало, что самые высокие (средние

за 12 лет) показатели отмечены в IV и V регионах (2,70–2,73 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>), для этих же регионов определены максимумы среднестатистических величин эвапотранспирации за летние месяцы (233–235 мм). Минимальный листовой индекс 2,1 отмечен в I регионе, который характеризуется минимальными расходами на испарение. Но, как показывает анализ, связь индекса листовой поверхности с суммарным испарением за летний период не является линейной и отражает значительное влияние изменения климатических факторов с запада на восток.

Чтобы показать вклад каждого лесогидрологического комплекса в формирование стока р. Подкаменной Тунгуски, мы рассчитали объем влаги, которую комплекс расходует на испарение, и определили его вклад (%) в эвапотранспирацию каждого региона бассейна реки (рис. 5). Полученные диаграммы показывают, что в I регионе основной вклад в суммарное испарение делают сосновые и темнохвойные насаждения (более 60 %), тогда как во II регионе возрастает роль лиственных лесов (38 %) при значительном участии темнохвойных насаждений (29 % от суммар-

ного испарения составляют темнохвойные и 16 % – смешанные леса со значительным участием темнохвойных пород). В III регионе почти 80 % от суммарного испарения приходится на лиственные леса, к тому же здесь значительный вклад (13 %) вносит лесогидрологический комплекс с березовыми лесами.

В IV регионе наряду с лиственными лесами в суммарное испарение значительный вклад вносят сосновые (21 %) и смешанные (16 %) с участием темнохвойных пород. В V регионе, который значительно отличается по географическим условиям и структуре лесного покрова, значительный вклад в суммарное испарение вносят березовые леса (18 %), но основная доля приходится на лиственные и темнохвойные насаждения (см. рис. 5).

Бассейн р. Подкаменной Тунгуски вытянут с востока на запад, и анализ гидрометеорологических данных показал, что с запада на восток (от устья реки до ее истоков) осадки снижаются почти в два раза. Различия средних значений эвапотранспирации между регионами составляют от 20 до 50 мм, максимальные различия чаще всего наблюдаются в годы

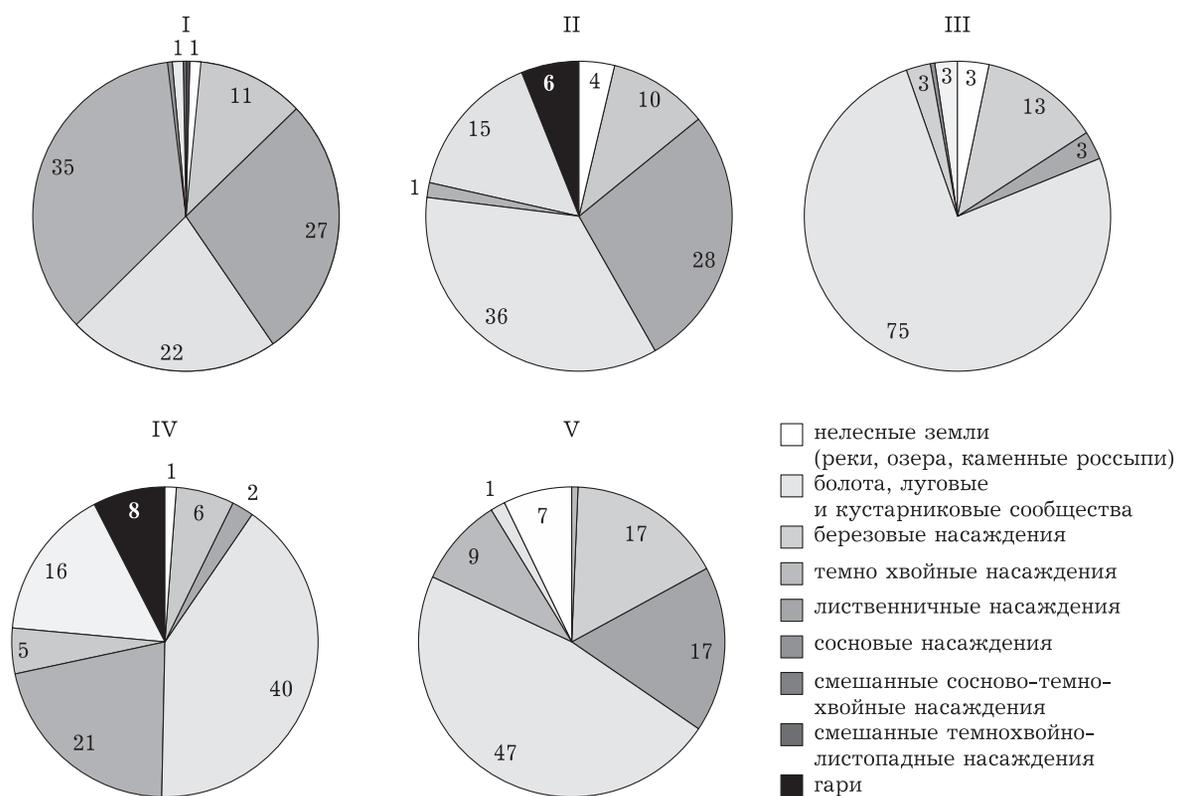


Рис. 5. Доля суммарного испарения (%) лесогидрологических комплексов по регионам I–V

с экстремальными погодными условиями. Гидрологическая значимость любого природного комплекса оценивается по его вкладу в формирование стока, т. е. по отношению испаряемой влаги к выпавшим атмосферным осадкам. В нашей работе была сделана попытка оценить выделенные лесогидрологические комплексы по степени трансформации осадков: подсчитали отношение эвапотранспирации к сумме годовых осадков. Вследствие того что на исследуемой территории ограничено число метеостанций и также то, что данные метеостанций являются точечными, т. е. не всегда являются репрезентативными для больших площадей, мы использовали климатическую базу данных CRU TS4.01 ([https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru\\_ts\\_4.01/](https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.01/)) для определения средневзвешенных величин осадков для пяти регионов бассейна реки.

Анализ полученных данных показал, что в I и II регионах лесные экосистемы тратят на испарение 54–60 % от суммы осадков, в III регионе влаги испаряется более 70 % от суммарного увлажнения. В IV и V регионах лесные экосистемы всех выделенных классов тратят на испарение гораздо больше – до 90 %. Такое соотношение испарения к осадкам, по нашему мнению, является завышенным из-за погрешностей при оценке осадков на данной территории вследствие низкого пространственного разрешения климатических данных CRU.

Таким образом, полученные значения эвапотранспирации выделенных лесогидрологических комплексов характеризуются значительной изменчивостью как в пространстве, так и во времени. Это прежде всего связано с вариабельностью климатических показателей. Связь эвапотранспирации с осадками, радиационным индексом сухости отмечалась большинством авторов, кто занимался вопросами испарения лесной растительностью [Morton, 1984; Klaassen, 2001; Zhang et al., 2011].

Отмеченные различия среднегодовых величин суммарного испарения между регионами, особенно в летние месяцы, определяются разнообразием породного состава лесов и их лесоводственно-биометрических показателей. Утверждение, что расход влаги на эвапотранспирацию зависит от типа растительности, согласуется с мнением многих исследователей. Приводимые в литературе данные по отдельным компонентам испарения

лесными фитоценозами, в частности, по транспирации для насаждений, различающихся по породному составу и другим лесоводственно-таксационным характеристикам [Zhang et al., 1999; Воронков, 1976; Федоров, 1987; Федоров и др., 1990; Ettala, 1988; Chen, 2018], получены для регионов, растительный покров которых очень сильно отличается от среднетаежных ландшафтов Сибири.

## ВЫВОДЫ

Дифференциация лесной растительности в бассейне р. Подкаменной Тунгуски с учетом ее гидрологической роли позволила получить количественные показатели эвапотранспирации для каждого лесогидрологического комплекса. С позиций вклада комплекса в суммарное испарение исследуемой территории было выделено пять регионов, различающихся между собой структурой и средними показателями эвапотранспирации.

Полученные результаты показали, что значения эвапотранспирации выделенных лесогидрологических комплексов характеризуются значительной изменчивостью как в пространстве, так и во времени. Разброс и вариабельность эвапотранспирации лесогидрологических комплексов прежде всего зависит от погодных условий, а регионов – от ландшафтной структуры и климатических особенностей.

Анализ полученных данных позволил установить связь между эвапотранспирацией и биометрическими характеристиками насаждений. Наиболее высокие значения листового индекса и эвапотранспирации характерны для районов, характеризующихся наибольшим разнообразием по породному составу.

Таким образом, результаты исследования показали, что определение ландшафтной структуры водосборов может быть использовано для индикации процессов, формирующих эвапотранспирацию как важную составляющую водного баланса, и в проведении гидрологически значимых границ ландшафтов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ “Исследование особенностей гидрологического цикла в речных бассейнах таежной зоны Средней Сибири при усилении антропогенного пресса на лесные экосистемы в условиях меняющегося климата” № 20-05-00095.

## ЛИТЕРАТУРА

- Антипов А. Н., Федоров В. Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 255 с.
- Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 285–302.
- Бондарик Н. Л., Карпечко Ю. В. Сравнение методов определения среднемноголетней величины испарения с леса // Метеорология и гидрология. 1999. № 9. С. 98–105.
- Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. М.: Наука, 1964. 244 с.
- Будаговский А. И. Полуэмпирическая теория транспирации и водного режима растительного покрова // Водн. ресурсы. 1989. № 6. С. 5–17.
- Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеоздат, 1956. 255 с.
- Будыко М. И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 472 с.
- Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока (опыт критического анализа). Л.: Гидрометеоздат, 1988. 310 с.
- Воронков Н. А. Гидрологическая и метеорологическая роль насаждений разного породного состава // Лесоведение. 1976. № 1. С. 3–10.
- Гвоздецкий Н. А., Михайлов Н. И. Физическая география СССР. Азиатская часть. М.: Высш. шк., 1987. 448 с.
- Константинов А. Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 532 с.
- Коротков И. А. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР. Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: ИЛ СО РАН, 1994. С. 29–47.
- Лебедев А. В. Гидрологическая роль горных лесов Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 182 с.
- Лесные экосистемы Енисейского меридиана / под ред. Ф. И. Плешикова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 357 с.
- Молчанов А. А. Гидрологическая роль леса. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 487 с.
- Музылев Е. Л., Старцева З. П., Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Волкова Е. В., Василенко Е. В., Осипов А. И. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 44–60.
- Пенман Х. Л. Растение и влага. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 161 с.
- Расулова А. М. Расчет эвапотранспирации на территории бассейна Ладожского озера // Тр. Карел. науч. центра РАН. Серия. Лимнология и океанология. 2021. № 9. С. 146–156.
- Раунер Ю. Л. Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 206 с.
- Федоров В. Н. Растительность как индикатор речного стока // Структура и динамика речного стока горных регионов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. С. 74–108.
- Федоров С. Ф., Марунич С. В., Федоров А. С. Исследование суммарного испарения с различных по составу и возрасту лесных насаждений // Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогенноз лесов и болот. М.: Наука, 1990. С. 41–53.
- Allen R. G., Tasumi M., Morse A., Trezza R., Wright J. L., Bastiaanssen W., Robison C. W. Satellite – based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications // J. Irrig. Drain Eng. ASCE. 2007. Vol. 133. P. 395–406.
- Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S., Bartholom E., Gond V., Vogt P., Achard F., Zubkov A. M., Mollicone D., Savin I. Yu, Fritz S., Repinan G., Hartley A. The Land Cover Map for Northern Eurasia for the Year 2000. GLC2000 database // Eur. Comm. Joint Res. Centre. 2003. <http://www.gvm.jrc.it/glc2000>
- Bastiaanssen W., Menenti M., Feddes R., Holtslag A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation // J. Hydrol. 1998. Vol. 212. P. 198–212.
- Chen Y., Xue Y., Hu Y. How multiple factors control evapotranspiration in North America evergreen needle leaf forests // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 622. P. 1217–1224.
- Donohue R. J., Roderick M. L., McVicar T. R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model // J. Hydrol. 2012. P. 35–50.
- Ettala M. Evapotranspiration from a Salix aquatica plantation at a sanitary landfill // Aqua-Fennica. 1988. Vol. 18, N 1. P. 3–14.
- Gibson L. A., Bob Su C. J., Eckardt F. D. Estimating evapotranspiration using remote sensing and the Surface Energy Balance System. A South African perspective // Water S. A. 2013. Vol. 39, N 4. P. 477–484.
- Glatthorn J., Pichler V., Hauck M., Leuschner Ch. Effects of forest management on stand leaf area: Comparing beech production and primeval forests in Slovakia // Forest Ecol. and Management. 2017. Vol. 389. P. 76–85.
- Klaassen W. Evaporation from Rain-Wetted Forest in relation to Canopy Wetness, Canopy Cover, and Net Radiation // Water Res. Res. 2001. Vol. 37, N 12. P. 3227–3236.
- Leng P., Li Z.-L., Duan S.-B., Tang R. L. and M.-F. A method for deriving all-sky evapotranspiration from the synergistic use of remotely sensed images and meteorological data // J. Geophys. Res. Atmosphere. 2017. Vol. 122. P. 13263–13277.
- Monteith J. L. Evaporation and environment. In The State and Movement of Water in Living Organisms. XIXth Symposium Soc. for Exp. Biol. Swansea: Cambridge Univ. Press., 1965. P. 205–234.
- Morton F. I. What are the limits of forest evaporation? // J. Hydrol. 1984. Vol. 74, N 3–7. P. 373–398.
- Mu Q., Heinsch F. A., Zhao M., Running S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data // Remote Sens. Environ. 2007. Vol. 111, N 4. P. 519–536.
- Mu Q., Zhao M., Running S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Remote Sens. Environ. 2011. Vol. 115, N 8. P. 1781–1800.
- Rozhkov V. A. GIS-model of the forest cover dynamics in landscapes of Russia // Productivity and resistance

- of forest soils. III International forest soil science conference. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2009. P. 24–27.
- Yang D., Sun F., Liu Z., Cong Z., Ni G., Lei. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis // *Water Resour. Res.* 2007. Vol. 43. W04426.
- Yiping H., Wei X., Margot V. et al. Cumulative forest disturbances decrease runoff in two boreal-forested watersheds of the northern interior of British Columbia, Canada // *J. Hydrol.* 2021. Vol. 605.
- Zhang L., Dawes W. R., Walker G. R. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance // *Tech. Rep. 99/12. Coop. Res. Cent. for Catchment Hydrol., Canberra, ACT, Australia.* 1999. 42 p.
- Zhang L., Dawes W. R., Walker G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale // *Water Resour. Res.* 2001. Vol. 37, N 3. P. 701–708.
- Zhang L., Fangfang Zhao, Yun Chen, Renee N. M. Dixon. Estimating effects of plantation expansion and climate variability on streamflow for catchments in Australia // *Water Resour. Res.* 2011. Vol. 47. W12539.
- Zhang Y., Peña-Arancibia J. L., McVicar T. R. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. Scientific reports, 6. 2016. Article number 19124.

## Spatio-temporal dynamics evapotranspiration in the Podkamennaya Tunguska river basin

T. A. BURENINA<sup>1</sup>, I. V. DANILOVA<sup>1, 2</sup>, N. A. MIKHEYEVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28  
E-mail: burenina@ksc.krasn.ru*

<sup>2</sup>*Siberian Federal University  
660074, Krasnoyarsk, Academic Kirensky str., 26/1*

Based on the landscape differentiation of the territory, an assessment of the hydrological role of the forest communities dominating in the Podkamennaya Tunguska basin in terms of their contribution to the total evaporation in the watershed was made. Evapotranspiration indicators, obtained from the Earth remote sensing data from the MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16 ET), which take into account the climatic characteristics of the study area, the types of terrestrial surface, and the diversity of vegetation cover were used. Studies have shown that the evapotranspiration of the identified classes of forest vegetation is characterized by significant variability both in space and in time. The variability of evapotranspiration over the years is primarily related to the variability of meteorological elements and the value of the leaf area index. In the spatial aspect, the variability of evaporation is determined by the general climatic characteristics of the study area and the forest species composition. As a result of data analysis, a reduction trend in annual evapotranspiration in the Podkamennaya Tunguska basin from 2000 to 2014 was revealed. A comparative analysis of evapotranspiration trends with temperature and precipitation trends confirms that the reduction trend in evapotranspiration is due to Climate change in region. It was found that the landscape structure of watersheds can be used to indicate the processes that form evapotranspiration as an important component of the water balance, and to determine the hydrologically significant boundaries of landscapes. An estimation of land surface evaporation from Earth remote sensing data (MOD16 ET product) can be used in water balance calculations in watersheds of various scales, especially in the absence of a runoff database.

**Key words:** Podkamennaya Tunguska, forest ecosystems, forest-hydrological complexes, evapotranspiration, MOD16 ET.