

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ ВОДНОГО БАЛАНСА В ХОДЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СУКЦЕССИЙ НА ВЫРУБКАХ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

© 2024 Т. А. Буренина^{1, *}, М. А. Корец^{1, **}, Ж. Р. Сулейманова^{1, ***}

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), Красноярск, Россия

*e-mail: burenina@ksc.krasn.ru

**e-mail: mik@ksc.krasn.ru

***e-mail: janetta_syleiman@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2022 г.

После доработки 11.09.2023 г.

Принята к публикации 26.12.2023 г.

В статье обсуждаются особенности трансформации структуры водного баланса в темных хвойных лесах Енисейского кряжа, нарушенных рубками. Рассматривается динамика эвапотранспирации с учетом лесовосстановительных сукцессий на вырубленных участках. На основе спутниковых данных (MOD16A2) было проанализировано изменение параметров эвапотранспирации с учетом нарушений лесного покрова на водосборе. На фоне ее общей зависимости от метеорологических параметров показано, что на бассейновом уровне вариация суммарного испарения зависит от аккумулирующего эффекта нарушенности лесного покрова. Ранжирование площадей вырубок с учетом восстановительно-возрастной динамики лесного покрова позволило оценить вклад различных стадий восстановительного процесса в суммарное испарение в бассейне р. Сухой Пит и выявить, как влияет соотношение площадей свежих вырубок к площадям уже облесившихся лесосек на величину суммарного испарения. Исследования показали, что если вырубается менее 2% лесов от всей площади водосбора, тогда рубки вызывают незначительные изменения в величине суммарного испарения и речного стока.

Ключевые слова: речной бассейн, водный баланс, осадки, эвапотранспирация, сток, вырубки, лесовосстановление, сукцессии, Landsat, спутниковые данные MOD16A

DOI: 10.31857/S2587556624010031, **EDN:** GLMOQK

ВВЕДЕНИЕ

Подход к лесопользованию с позиций поддержания и восполнения водных ресурсов на реках Средней Сибири ориентируется на изучение последствий рубок на гидрологический режим территории. Удаление лесного полога в результате рубки сказывается на трансформации гидрологического режима, и, прежде всего, на соотношении основных элементов водного баланса — суммарного испарения и стока. Если данные по стоку для некоторых рек доступны благодаря регулярным наблюдениям на гидропостах гидрометеорологической сети, то данные по суммарному испарению представлены фрагментарными натурными исследованиями на лесных водосборах (Антипов, Антипова, 1984; Буренина, 1982; Лебедев, 1982; Молчанов, 1960; Раунер, 1972; Федоров, 1979, 1981; Bosch and Hewlett, 1982; Turner, 1991) или основаны на расчетных мето-

дах и эмпирических зависимостях (Будаговский, 1964; Будыко, 1956; Карпечко, Мясникова, 2014). В Советском Союзе большое внимание уделялось исследованию данных натурных наблюдений, но при этом многие исследователи отмечали большую трудоемкость прямого измерения суммарного испарения и невозможность экстраполяции полученных данных на большие территории.

Из расчетных методов наиболее часто используемый — метод водного баланса, который применялся при наличии данных сетевых наблюдений за атмосферными осадками и речным стоком. Широкое распространение получили расчетные схемы М.И. Будыко (1956), А.И. Будаговского (1964), Х.Л. Пенмана (1968). Они основаны на теории турбулентной диффузии и теплового баланса подстилающей территории. 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).

Некоторые модели, такие как SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen et al., 1998) и METRIC (Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration) (Allen et al., 2007), определяют энергетический баланс на земной поверхности с использованием спутниковых снимков. Это позволяет рассчитывать как фактическую, так и потенциальную эвапотранспирацию на пиксельной основе. SEBAL и METRIC могут отображать эти ключевые индикаторы во времени и пространстве, по дням, неделям или годам. 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 (Расулова, 2021; Mu, 2007, 2011).

Как показали исследования (Лебедев, 1982; Побединский, 1976; Федоров, 1979, 1981; Bates and Henry, 1928; Hibbert, 1967 и др.), в результате масштабных рубок на водосборах резко меняется структура водного баланса, но по мере восстановления лесной растительности на вырубках соотношение эвапотранспирации и стока постоянно меняется в зависимости от направленности лесовосстановительного процесса. На основе комплексного анализа изменения структуры лесов после рубки и динамики элементов водного баланса за несколько десятилетий, выполненного для лесной зоны Европейской территории СССР, О.И. Крестовский (1984) установил, что восстановление водного режима территории до рубки леса и, соответственно, водности рек произойдет не раньше чем через 50 лет.

Настоящая статья посвящена изучению динамики расходных составляющих водного баланса, связанных с лесовосстановительными сукцессиями после проведения лесозаготовок.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в бассейне р. Сухой Пит (рис. 1), которая является левым притоком р. Большой Пит, принадлежащей к бассейну р. Енисей. Сухой Пит протяженностью 156 км и площадью бассейна 1262 км² формирует свой сток на западном склоне Енисейского кряжа, который, несмотря на его незначительную высоту, является орографическим барьером на пути господствующего переноса влагонесущих воздушных масс и существенно влияет на рас-

пределение осадков в регионе. С повышением местности над уровнем моря количество осадков увеличивается. По данным метеорологических станций Усть-Пит и Северо-Енисейск, на наветренных склонах кряжа выпадает от 540 мм до 1002 мм осадков в год. На восточных склонах (метеостанции Южно-Енисейск и Раздолинск) количество осадков уменьшается и составляет 406–490 мм (<http://meteo.ru/it/178-aisori>). По лесорастительному районированию изучаемая территория относится к Приенисейской провинции, округу темнохвойных и темнохвойно-лиственничных лесов (Кутафьев, 1970). Преобладают темнохвойные леса, представленные пихтовыми насаждениями, спелые и перестойные VI–VIII классов возраста и низкой продуктивности (III–IV классов бонитета). Сомкнутость полога 0.7–0.9. Запас древесины не превышает 200–250 м³/га. Подлесок представлен рябиной, черемухой, красной смородиной, подрост куртинный – из пихты, осины и березы. В живом напочвенном покрове преобладает кислица, майник, звездчатка Бунге. Зеленые мхи образуют сплошной покров (90%). Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса – 40–60%, средняя высота 10 см. Подстилка рыхлая, толщиной до 6 см. Почва сильно оподзоленная, влажная, суглинистая, средней мощности. За последние десятилетия в результате хозяйственного использования лесов лесной покров исследуемого района претерпел значительную антропогенную трансформацию (Лапшина и др., 1971).

Территория водосбора р. Сухой Пит была определена при помощи функций гидрологического анализа (ESRI ArcGIS 10 Spatial Analysis) на основе цифровой модели рельефа (SRTM 1 Arc-Second Global). Динамика площадей вырубок для водосбора определялась по данным спутниковой съемки Landsat TM/ETM/OLI из открытых архивов USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) за период 2001–2020 гг. При этом для погодичной агрегации вырубок использовался продукт Global Forest Change (<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1244693>). Изображения Landsat, отобранные для территории водосбора, дешифрировались последовательным применением методов сегментации Multiresolution Segmentation (Trimble Cognition Developer 8) и неуправляемой классификации Isoclaster (ESRI ArcGIS 10) с последующим уточнением классов по методу Maximum Likelihood Classification (ESRI ArcGIS 10). Выделенные классы вырубок для каждой спутниковой сцены идентифицировались, датировались и дополнялись на основе данных Global Forest Change.

Для выделения классов вырубок были привлечены данные лесоводственных исследований 2011 г., полученные в результате полевых исследований. Пробные площади, где проводились

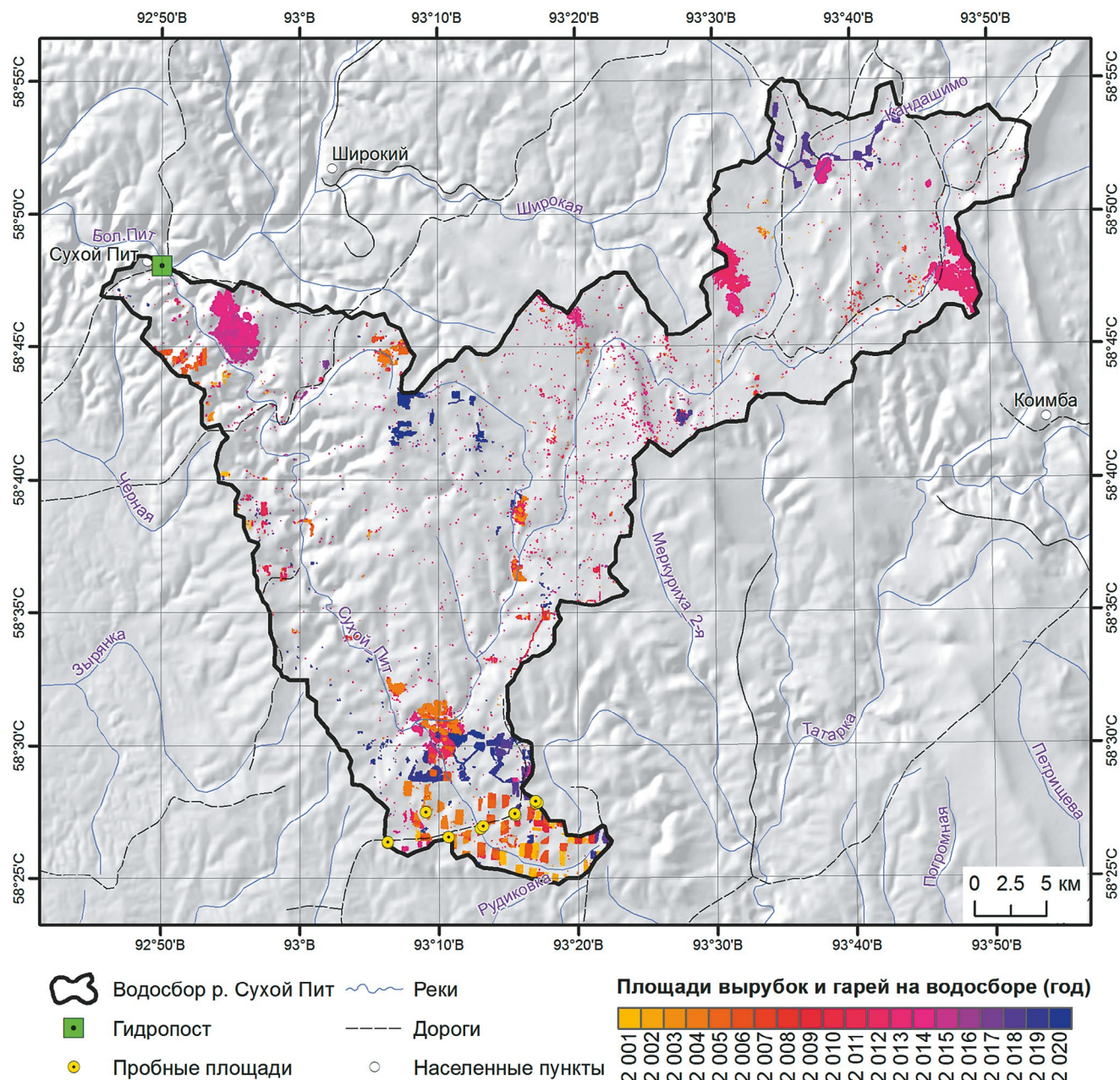


Рис. 1. Участки, нарушенные вырубками и пожарами на водосборе р. Сухой Пит за период 2001–2020 гг.

обследования состояния лесовозобновления на вырубках, находятся на арендных территориях Лесосибирского ЛДК № 1, где Институтом леса ведется мониторинг за процессом лесовосстановления на площадях, нарушенных рубкой леса. Бассейн Сухого Пита вследствие небольшой площади и незначительных перепадов высоты характеризуется относительно однородными лесорастительными условиями и, соответственно, растительным покровом.

Коренные насаждения представлены формациями темнохвойных лесов, в которых доминантное положение принадлежит пихте. Классы бонитета IV–III, группы типов леса зеленомошная и разнотравная. Объекты натурных исследо-

ваний являются репрезентативными для всего бассейна Сухого Пита и представлены различными стадиями лесовосстановительных сукцессий после проведенных здесь рубок.

В работе были использованы данные многолетних наблюдений за стоком и осадками по гидрологическом посту Сухой Пит (<http://www.textual.ru/gvr/>). Данные по испарению по месяцам были получены по спутниковым данным MODIS – эвапотранспирация с шагом агрегации 8 дней (продукт MOD16A2 – пространственное разрешение 500 м/пикс., <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod16.php>). Также были использованы данные по индексу листовой поверхности на основе Terra MODIS (MOD15A2H,

500 м/пикс., <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod15a2hsv006/>). Значения среднемесячной температуры воздуха (TMP) и суммарных месячных осадков (PRE) были взяты нами из пространственной растровой базы данных CRU TS 4.01 (разрешение 0.5 ~ 50 км/пикс., https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.01/).

Нами использовался продукт MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3) рассчитанный на основе спутниковых данных MODIS по алгоритму Year-end Gap-filled (MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (https://lpdaac.usgs.gov/documents/931/MOD16_User_Guide_V61.pdf). Приведенный метод расчета данных ET основан на уравнении Пенмана–Монтейта (Monteith, 1965):

$$ET = (\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (\delta e) g_a) / ((\Delta + \gamma(1 + g_a/g_s))L_v),$$

где ET — объем эвапотранспирированной воды (мм с⁻¹); Δ — скорость изменения удельной влажности насыщения с температурой воздуха (Па К⁻¹); R_n — чистая освещенность (Вт м⁻²), внешний источник потока энергии; G — тепловой поток почвы (Вт м⁻²); c_p — удельная теплоемкость воздуха (Дж кг⁻¹ К⁻¹); ρ_a — плотность сухого воздуха (кг м⁻³); δe — дефицит давления пара (Па); g_a — проводимость воздуха, проводимость атмосферы (м с⁻¹); g_s — проводимость stomы, поверхностная или устьичная проводимость (м с⁻¹); γ — психрометрическая константа ($\gamma \approx 66$ Па К⁻¹).

Алгоритм расчета параметров уравнения подробно описан в документации продуктов MOD16A2GF/A3GF и включает параметры, определяемые дистанционно (по данным съемки MODIS), такие как индекс листовой поверхности (LAI), альbedo и тип земной поверхности, а также данные о температуре и влажности воздуха. В расчетах мы использовали набор изображений. MOD16A2 — (суммарную) за 8 дней эвапотранспирацию (ET, мм) с пространственным разрешением 500 × 500 м в пикселе.

Средневзвешенные по суммарной площади пикселей тестовых участков значения эвапотранспирации, индекса листовой поверхности, осадков и температура воздуха были рассчитаны для трех участков: объединенных полигонов вырубок за период 2001–2020 гг.; фонового полигона внутри водосбора (без нарушений) и для всего водосбора целиком. При этом 8-дневные значения эвапотранспирации суммировались для каждого года по трем диапазонам дат: 17 мая — 14 сентября (летний период), 8 февраля — 30 марта (зимний период) и для всего года в целом. Интервалы дат были выбраны с учетом наличия данных в архивах продуктов MOD16A2

и MOD15A2H. Все указанные выше растровые данные приводились к единой картографической проекции (WGS 1984 UTM Zone 46N) с разрешением растровой сетки 500 м/пикс. Внутри трех тестовых полигонов (1 — вырубки, 2 — ненарушенный фон, 3 — весь водосбор) рассчитывалось среднее значение величин ET и LAI (8-дневный шаг дат), а также TMP и PRE (месячный шаг дат) из диапазона 2001–2020 гг. Сформированные временные ряды значений ET, LAI, TMP и PRE (для полигонов 1, 2 и 3) использовались далее для определения среднегодовых, сезонных значений (летний и зимний периоды) и сравнительного статистического анализа. Для оценки уровня связи между показателями использовался коэффициент корреляции Пирсона при уровне значимости $p < 0.05$ (5%).

Обработка и анализ данных выполнялись с использованием процедур открытого сервиса Google Earth Engine и функций зональной статистики пакета ESRI ArcGIS 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значительные площади лесов в бассейне р. Сухой Пит, пройденные рубками в конце прошлого и начале этого века, в настоящее время представляют мозаику лесовосстановительного процесса. Согласно исследованиям, процесс лесовосстановления на вырубках пихтовых насаждений происходит по двум направлениям: со сменой пород на лиственные леса и темнохвойному варианту, когда сохраненный подрост пихты формирует темнохвойные насаждения. Как показали результаты мониторинга, динамический тренд лесовосстановления направлен к формированию структуры исходных типов леса через стадии травяно-кустарниковых сообществ и производных насаждений. В зависимости от варианта лесовосстановительного процесса изменяются не только доминанты травяно-кустарникового покрова и подрост (табл. 1), но и запасы фитомассы производных фитоценозов.

Проведение снегомерных съемок на объектах мониторинга в течение нескольких лет позволили проследить динамику формирования снежного покрова на вырубках в пространственном и временном аспектах, а также рассчитать испарение со снежного покрова на вырубках с учетом стадии лесовосстановления (Burenina et al., 2017). Испарение со снега на вырубках текущего года варьирует от 12 до 34 мм в зависимости от экспозиции склона, по мере зарастания вырубок оно уменьшается, но в пихтовых жердняках отмечается некоторое повышение испарения со снега за счет перехваченных осадков сомкнувшимся пологом древостоя.

Из наших работ и публикаций других авторов (Лебедев, 1982; Fu, 1981; Morton, 1983, 1984)

Таблица 1. Характеристика мониторинговых объектов ИЛ СО РАН, использованных в работе (данные на 2011 г.)

Тип растительных сообществ	Лесоводственно-таксационные характеристики				Подрост		Травяно-кустарниковый ярус	Координаты
	Состав	Возраст древостоя, лет	Полнота	Высота, м	Диаметр, см	Состав	Густота, шт./га	
Трехлетняя вырубка вейниково-разнотравная	–	–	–	–	–	–	–	58°27'49 93°16'59
Трехлетняя вырубка – кипрейно-вейниковый малинник	–	–	–	–	–	–	–	58°27'51 93°17'61
Семилетняя гарь кипрейно-малинниковая (по вырубке)	–	–	–	–	–	8Ос2Б, ед. К, П	9750	58°27'22 93°15'31
Вырубки								
Березняк малинниково- кипрейно-вейниковый	5Б5Ос	8	0.3	0.5	1.2	9Б1П, ед. К, Е	35500	58°26'52 93°13'10
Пихтарник с березой чернично-разнотравный	5П5Б	10	0.3	0.5	1.5	–	–	58°26'58 93°13'01
Березняк вейниковый с красной смородиной	10Б+Ос, Е, П	13	0.7	1.8	1.7	4П3Б2Ос1Е	7800	58°26'33 93°10'42
Молодняки								
Березняк с осиной разнотравный	8Б2П	23	0.3	2.0	1.6	8П2Б	6300	58°26'21 93°16'19
	7П3Б	30	0.8	6.4	5.6	–	–	58°26'23 93°06'18
Жердняки								
Пихтарник чернично- зеленомошный	10П	120	0.8	19.5	17.8	–	–	58°27'26 93°15'28
Пихтарник вейниково- мелкотравный	10П+Ос+Б	100	0.9	18.0	17.0	–	–	58°27'54 93°16'57
Контроль								

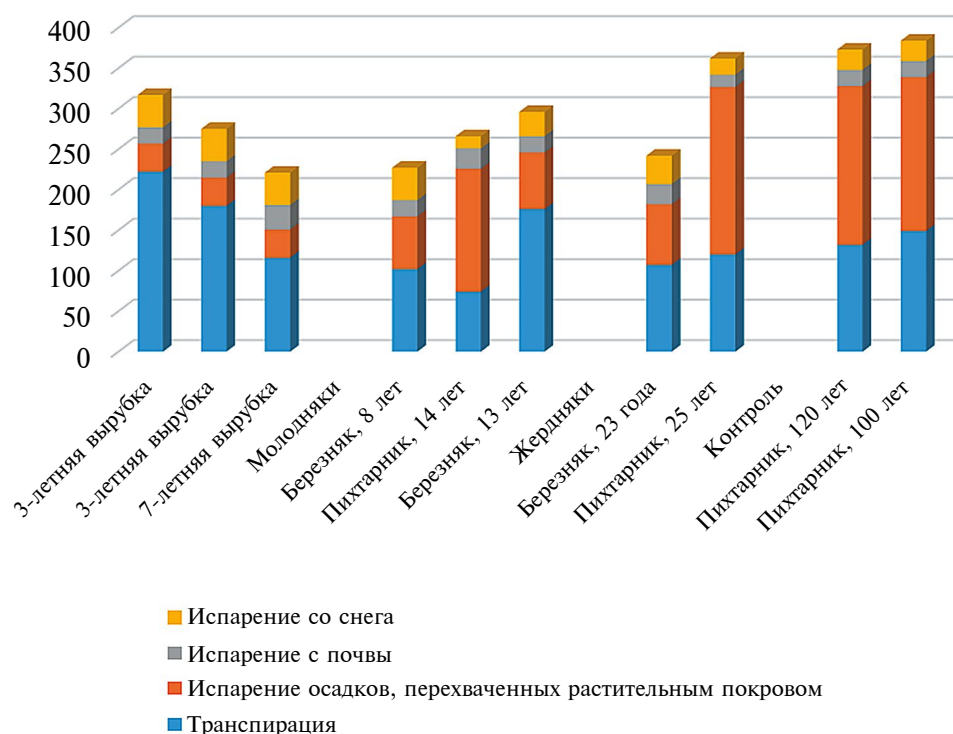


Рис. 2. Изменение компонентов суммарного испарения в процессе лесовосстановления на мониторинговых вырубках.

известно, что основной расход влаги на испарение растительным покровом происходит за счет транспирации и испарения осадков, задержанных растительным пологом. С использованием зависимости расхода влаги на транспирацию и испарение задержанных осадков от лесоводственно-биометрических параметров (Грибов, 1997; Лебедев, 1982; Онучин, 2001; Onuchin and Burenina, 2008) были рассчитаны составляющие суммарного испарения на исследуемых вырубках. Для расчетов использовались литературные данные по интенсивности транспирации древесных пород и травяно-кустарникового яруса (Бейдеман, 1983), а также фондовые материалы лаборатории техногенных лесных экосистем Института леса СО РАН по запасам фитомассы травяно-кустарниковой растительности и листвы и хвои древесного яруса.

Располагая расчетными данными по эвапотранспирации, мы проанализировали структуру суммарного испарения в зависимости от сукцессий растительного покрова на вырубках темной хвойных лесов Енисейского края (рис. 2). Снижение суммарного испарения от 3-летних рубок до 13–14-летних лесных молодняков связано с уменьшением транспирации и незначительным задержанием атмосферных осадков древостоем. Переход от травянисто-кустарниковой стадии на вырубке в стадию молодняков ведет к уменьшению запасов транспирирующей фитомассы (Буренина, 1982; Burenina et al., 2021). Значительные различия суммарного испарения между 23-летним березняком и 25-летним

пихтарником — это результат того, что хвойные древостои задерживают не только жидкие, но и твердые атмосферные осадки. Полученные данные характеризуют локальные условия лесорастительных условий и не всегда могут быть использованы для оценки суммарного испарения на бассейновом уровне. Для анализа динамики эвапотранспирации по стадиям лесовосстановления на бассейновом уровне использованы спутниковые данные Terra (MOD16A2).

Эвапотранспирация, полученная по спутниковым данным MODIS, характеризуется значительной изменчивостью по годам, как для нетронутых рубками территорий, так и для рубок. Это прежде всего связано с временной вариабельностью климатических показателей (табл. 2).

Модель расчета эвапотранспирации (MOD16A2) использует климатические данные глобальных архивов и поэтому может быть успешно использована на среднемасштабном пространственном уровне для установления динамических связей между испарением и площадью нарушенных рубками лесов. Для оценки качества продукта MOD16A2 нами была проанализирована связь эвапотранспирации, полученной по MODIS, с температурой воздуха и осадками с метеостанции Усть-Пит и гидрологического поста Сухой Пит.

Для того чтобы понять, насколько общие модели применимы на региональном и локальном уровнях, мы оценили связь между годовой эвапотранспирацией и среднегодовой температурой

Таблица 2. Эвапотранспирация на вырубках и фоновой территории за вегетационный сезон (15.05–15.09)

Год	Эвапотранспирация, мм		Средняя температура, °С	Сумма осадков, мм
	условный фон	вырубки		
2001			12.9	302
2002	164.4	163.1	13.6	311
2003	187.2	188.4	13.2	288
2004	191.3	189.9	13.3	216
2005	187.1	185.1	12.5	302
2006	195.2	194.4	13.2	317
2007	186.1	189.0	12.7	221
2008	185.6	189.8	12.3	323
2009	182.2	187.5	12.3	313
2010	180.3	187.6	12.0	321
2011	177.4	185.4	11.5	332
2012	186.3	194.5	12.8	322
2013	180.8	193.2	13.5	228
2014	172.7	177.5	11.9	364
2015	178.6	182.6	11.9	352
2016	196.3	208.9	13.2	359
2017	194.9	197.7	13.2	265
2018	196.6	203.6	12.6	350
2019	195.6	201.3	12.6	256
2020	188.8	203.8	13.4	276

воздуха, годовой суммой осадков (несмещенная и с опережением эвапотранспирации на 1 и 2 года) и накопленной площадью вырубок на территории водосбора р. Сухой Пит за период 2001–2020 гг. (длина выборки $n = 20$ лет). В табл. 3 приведены значения коэффициентов корреляции Пирсона (R) для ET и указанных характеристик, отобранных по уровню значимости $p < 0.05$ (5%).

Тесная корреляция существует между эвапотранспирацией и среднегодовой температурой воздуха. Что касается суммы годовых осадков, то максимальное значение коэффициента корреляции характерно для суммы годовых осадков с опережением эвапотранспирации на 1 год. Это подтверждает вывод, что максимумы суммарного испарения проявляются через год после максимальных значений годовых осадков.

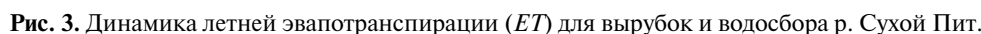
Сравнение межгодовой вариабельности эвапотранспирации с климатическими характеристиками по вегетационным сезонам показало,

что максимальный уровень эвапотранспирации наблюдается в годы с оптимальным сочетанием температуры воздуха и осадков. В годы с осадками менее 300 мм и температурой воздуха выше 12.5°C наблюдается максимальное испарение как на фоновых участках водосбора р. Сухой Пит, так и на вырубках. При величине осадков более 300 мм даже при температуре воздуха 13.0°–13.9°C наблюдается снижение суммарного испарения. Минимальные значения эвапотранспирации характерны в годы с максимальными значениями осадков (более 350 мм) и температурой воздуха менее 12°C (см. табл. 2).

Принимая во внимание, что на эвапотранспирацию в значительной степени оказывают влияние метеорологические факторы, мы проанализировали связь изменения эвапотранспирации по годам с общей нарушенностью лесного покрова в бассейне Сухого Пита и вырубками текущего года.

Таблица 3. Оценка уровня корреляции годовой эвапотранспирации (ET) с основными метеорологическими характеристиками и площадью вырубок на водосборе р. Сухой Пит за период 2001–2020 гг.

Характеристика водосбора	Коэффициент корреляции (R)	Уровень значимости (p)
Среднегодовая температура воздуха	0.62	0.003
Сумма годовых осадков (несмещенная)	0.36	0.05
Сумма годовых осадков (с опережением ET на 1 год)	0.82	0.00004
Сумма годовых осадков (с опережением ET на 2 года)	0.44	0.04
Накопленная с 2000 г. площадь вырубок	0.71	0.0002



Согласно данным рис. 3 на временном отрезке 2001–2020 гг. эвапотранспирация на вырубленных участках и на водосборе в целом имеет тенденцию к увеличению. На водосборе суммарное испарение увеличилось на 22 мм, что можно объяснить устойчивым годовым приростом сред-

Изменение летней эвапотранспирации по годам с учетом дифференциации вырубок по возрастным категориям показало, что максимальные значения эвапотранспирации приурочены к максимальным площадям вырубок 5-летнего возраста, но в 2018–2020 гг. отмечается снижение суммарного испарения, возможно связанное с увеличением площадей молодняков и жердняков на месте вырубок предыдущих лет. Более высокий расход влаги в летний период на 5-летних вырубках (травяно-кустарниковая стадия) по сравнению с другими производными фитоценозами вполне обоснован их высокой продуктивностью и высо-

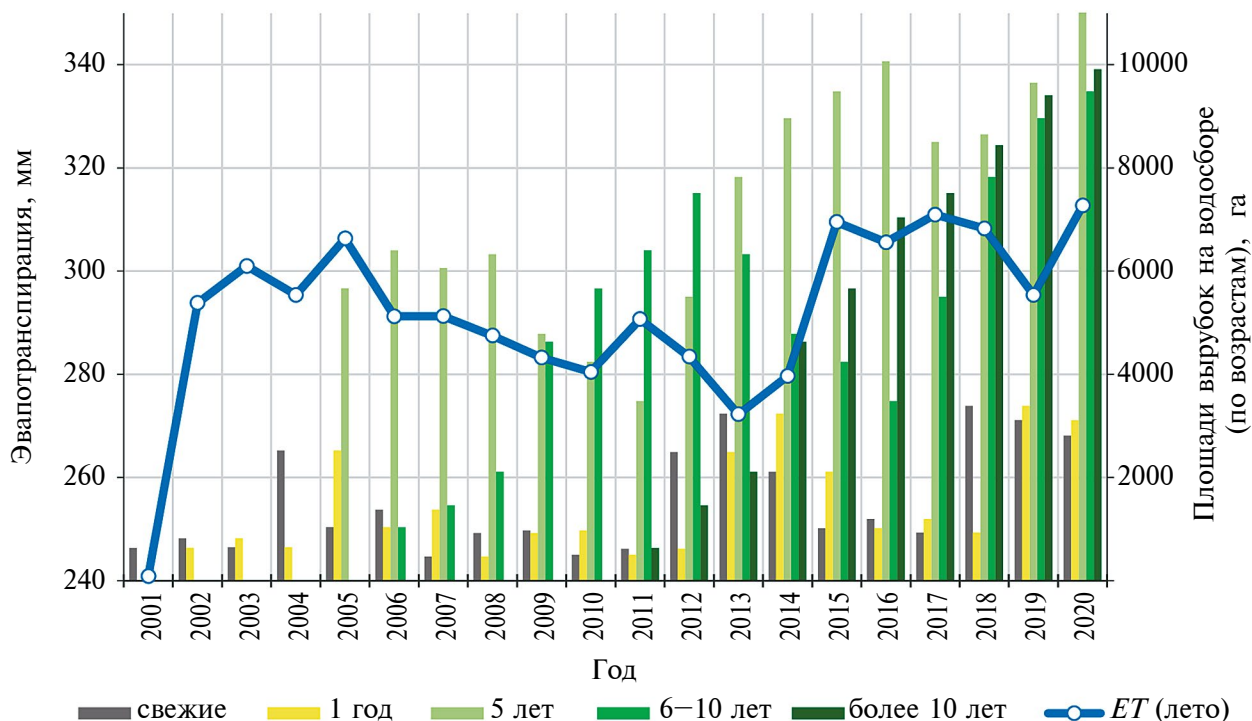


Рис. 4. Динамика площадей вырубок различной давности и летней эвапотранспирации (ET) для территории водосбора р. Сухой Пит.

кими показателями транспирации произрастающих здесь видов растений (Буренина и др., 2021).

В целом на водосборе величина эвапотранспирации будет зависеть как от общей площади нарушений лесного покрова, так и от соотношения площадей, вырубленных в разные годы, т.е. стадий восстановительной сукцессии.

Констатируя, что вырубка леса и последующие стадии лесовосстановления вносят определенный вклад в суммарное испарение в бассейне р. Сухой Пит, определенный интерес представляет вопрос, в какой степени это отражается на речном стоке.

Анализ динамики стока р. Сухой Пит с учетом изменения площадей свежих вырубок показал, что наиболее значительные пики подъема воды в реке приурочены не к годам проведения наиболее масштабных рубок, а являются результатом, когда 2–3 года подряд вырубаются значительные площади (2004–2006 гг.), т.е. на увеличении стока отражается аккумулирующий эффект нарушенности земель на водосборе (рис. 5). Резкий скачок модуля стока с 2012–2014 гг. связан как с аномальными погодными условиями (в 2010–2011 и 2013 гг. выпало на 50% больше нормы осадков, а в 2014 г. почти в два раза больше среднееголетней величины), так и с тем, что в 2012–2013 гг. ежегодно вырубалось более 2% от площади водосбора.

Из вышесказанного следует, что при ежегодно вырубаемой площади лесов менее 2% от

площади водосбора лесные рубки вызывают незначительные изменения в величине суммарного испарения и, соответственно, речного стока. Следует отметить, что большее влияние на гидрологический режим промышленных лесозаготовок проявляется в аномальные годы: если годовая сумма осадков превышает среднюю многолетнюю норму на 50–60%, уже при вырубке 2–2.5% от площади водосбора отмечается увеличение годового стока до 30% с высоким уровнем воды в реке в половодье и летние паводки. При этом следует принимать во внимание факт, что при накоплении вырубленных площадей в сочетании с экстремальными осадками на небольших водосборах можно ожидать катастрофических наводнений. В ряде публикаций (Sun et al., 2006; Wang, 2008; Wei et al., 2003) утверждается, что переход лесных земель в результате рубок или пожаров в травяные сообщества приводит к возникновению пиков паводков на локальном уровне, но не являются главной причиной высоких половодий. Из выводов, сделанных Центром Международных лесных исследований (FAO, 2006) на основе обобщения данных многолетних наблюдений, следует, что леса не могут предотвращать катастрофические наводнения, вызванные метеорологическими явлениями. Отдельные гидрологи (Vertessy and Bessard, 1999; Zhang et al., 2001, 2012) придерживаются концепции, что лесистость водосборов является более значимым фактором, чем метеорологические параметры.

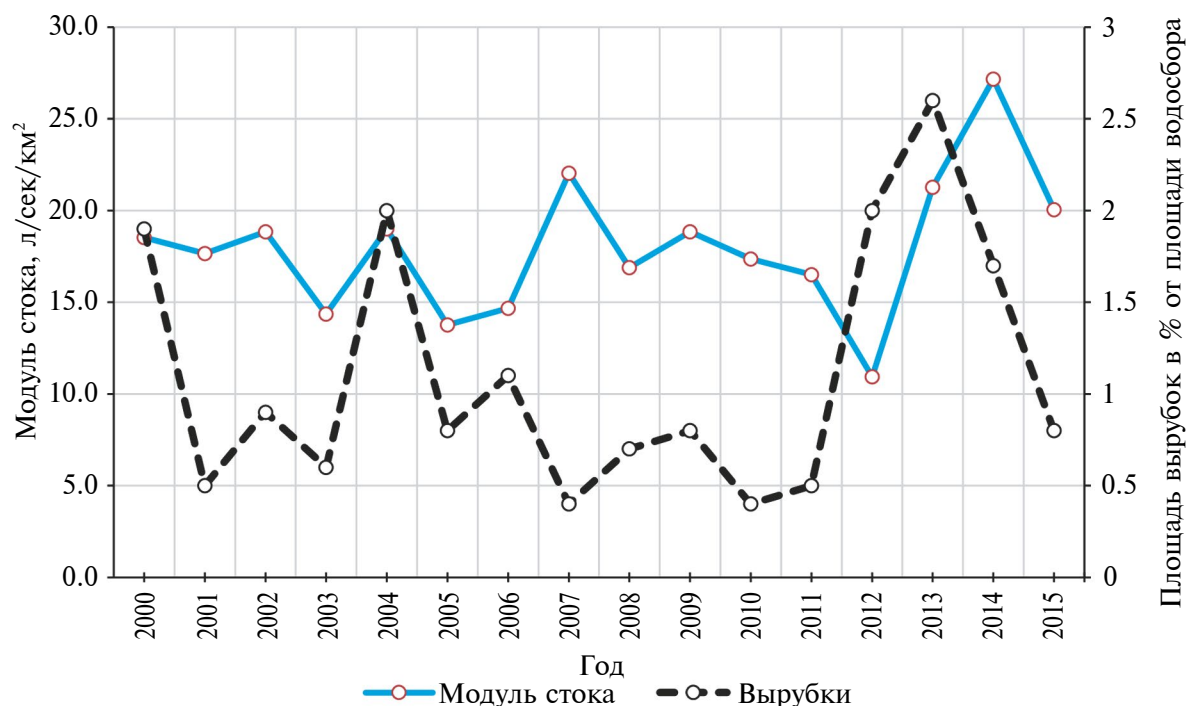


Рис. 5. Динамика площади вырубок на водосборе и модуля стока р. Сухой Пит.

По результатам исследований водный режим р. Сухой Пит определяется суммарным увлажнением территории, т.е. формирование стока прежде всего обязано климату. Как показал анализ изменения структуры водного баланса, несмотря на некоторое повышение эвапотранспирации на водосборе, сток растет тоже. Это связано со значительным увеличением годовых осадков в бассейне реки. При этом нарушение лесного покрова рубками оказывает значительный эффект на суммарное испарение и речной сток, особенно в годы с аномальными метеорологическими условиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оценка испарения с поверхности суши по данным дистанционного зондирования Земли (продукт MOD16A2) может быть использована при воднобалансовых расчетах в различных по масштабам водосборных бассейнах, особенно при отсутствии базы данных по стоку, а также при экологической экспертизе последствий нарушения лесов на водосборе в результате воздействия природных и антропогенных факторов. Анализ динамики показателей эвапотранспирации, полученных с использованием спутниковых данных MODIS для бассейна р. Сухой Пит, позволил констатировать, что на бассейновом уровне вариация эвапотранспирации по годам в первую очередь связана с изменчивостью температуры воздуха и осадков в сочетании с динамикой свежих вы-

рубков и уже облесившихся лесосек. Ранжирование площадей вырубок с учетом восстановительно-возрастной динамики растительного покрова позволило оценить вклад различных стадий восстановительных сукцессий в суммарное испарение в бассейне р. Сухой Пит и показать, как соотношение площадей свежих вырубок с площадями уже облесившихся лесосек отражается на величине суммарного испарения. Сравнение трендов эвапотранспирации на фоновых участках бассейна и площадях, нарушенных рубками, показывает, что на изменение испарения на водосборе влияют не только климатические характеристики, но и устойчивый тренд увеличения площадей молодняков и жердняков на месте вырубок конца XX и начала XXI в. Результаты исследований показали, что при поддержании оптимальной лесистости и выполнении технологии рубки с соблюдением сроков примыкания и площадью ежегодной рубки не более 2% от площади водосбора возможно поддержание стабильности гидрологического режима на малых и средних реках Сибири с учетом климатических трендов, зафиксированных на данный момент.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИЛ СО РАН “Теоретические основы сохранения экологического и ресурсного потенциала лесов Сибири в условиях возрастающего антропогенного пресса и климатических аномалий”, № AAAA-A17-117101940014-9

(0356-2019-0027) и 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.

FUNDING

This work was supported by the basic project of the Institute of forest Siberian Branch of RAS “Theoretical Foundations of Preserving the Ecological and Resource Potential of Siberian Forests under the Conditions of Increasing Anthropogenic Press and Climate Anomalies,” no. AAAA-A17-117101940014-9 (0356-2019-0027) and RFBR grant “Study of the features of the hydrological cycle in the river basins of the taiga zone of Central Siberia with increased anthropogenic pressure on forest ecosystems in a changing climate” no. 20-05-00095.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антипов А.Н., Антипова Н.Д. Оценка транспирации растительности таежных геосистем // География и природ. ресурсы. 1984. № 4. С. 115–124.
- Бейдеман И.Н. Справочник по расходу воды растениями в природных зонах СССР. Новосибирск: Наука Сиб. отд., 1983. 257 с.
- Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги. М.: Наука, 1964. 244 с.
- Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 255 с.
- Буренина Т.А. Динамика восстановления лесогидрологических условий на экспериментальной вырубке Западного Саяна // Средообразующая роль лесных экосистем Сибири / отв. ред. В.В. Протопопов. Красноярск: Изд-во ИЛИД СО АН СССР, 1982. С. 106–114.
- Буренина Т.А., Мусохранова А.В., Сулейманова Ж.Р. Динамика структуры водного баланса в ходе лесовосстановительных сукцессий на вырубках в темнохвойных лесах Енисейского края // Управление лесными экосистемами в условиях изменения климата: матер. Международной науч.-практич. конф., посвященной 105-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Петра Алексеевича Гана. Бишкек, 2021. С. 88–92.
- Грибов А.И. Средообразующая роль лесных экосистем юга Средней Сибири. Абакан: Хакаский гос. ун-т им. Н.Ф. Катанова, 1997. 160 с.
- Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А. Оценка изменения элементов водного баланса в первый год после рубок в таежной зоне Европейского Севера России // Ученые записки Рос. гос. гидрометеорологического ун-та. 2014. Вып. 33. С. 31–44.
- Корец М.А., Прокушкин А.С., Буренина Т.А. Пространственно-временные тенденции изменения средних показателей температуры воздуха и количества осадков в бассейне Среднего Енисея (зона тайги) на основе данных Climatic Research Unit (CRU TS V. 3.22): матер. III Всерос. науч.-практич. конф. “Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России”. Иркутск, 2020.
- Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек подзон южной и средней тайги ЕТС // Водные ресурсы. 1984. № 5. С. 125–135.
- Кутафьев В.П. Лесорастительное районирование Средней Сибири // Вопросы лесоведения. Красноярск: Изд-во ИЛИД СО АН СССР, 1970. Т. 1. С. 165–179.
- Лапшина Е.И., Горбачев В.Н., Храмов А.А. Растительность и почвы Енисейского края (Южной части) // Растительность правобережья Енисея / под ред. А.В. Куминовой. Новосибирск: Наука, 1971. С. 21–66.
- Лебедев А.В. Гидрологическая роль горных лесов Сибири. Новосибирск: Наука СО, 1982. 182 с.
- Молчанов А.А. Гидрологическая роль леса. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 487 с.
- Онуцин А.А. Общие закономерности снегонакопления в бореальных лесах // Изв. РАН. Сер. геогр. 2001. № 2. С. 80–86.
- Пенман Х.Л. Растение и влага. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 161 с.
- Побединский А.В. Изменение защитной и водорегулирующей роли леса под влиянием рубок // Вопросы географии. 1976. Вып. 102. С. 169–179.
- Расулова А.М. Расчет эвапотранспирации на территории бассейна Ладожского озера // Тр. Карел. науч. центра РАН. Сер. лимнология и океанология. 2021. № 9. С. 146–156.
- Раунер Ю.Л. Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 206 с.
- Федоров С.Ф. О влиянии вырубки леса на изменение элементов его водного баланса // Труды ГГИ. 1979. Вып. 258. С. 30–42.
- Федоров С.Ф. Изменение структуры водного и теплового баланса залесенных территорий под влиянием вырубок // Труды ГГИ. 1981. Вып. 279. С. 20–31.
- 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.
- Bastiaanssen W., Menenti M., Feddes R., Holtslag A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation // J. of Hydrol. 1998. Vol. 212. P. 198–212.
- Bosch J.M., Hewlett J.D. A review of catchment experiment to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration // J. of Hydrology. 1982. Vol. 55. P. 3–23.
- Burenina T.A., Borisov A.N., Shishikin A.S. Changes of Snow Moisture Balance in Logging Areas in Dark-Needled Forests of the Yenisei Ridge, Central Siberia // Forest

- Ecosystems: Management, Impact Assessment and Conservation / Deborah Elliott (Ed.). Nova Science Publ., 2017. P. 129–154.
- FAO 2006: Global Forest Resources assessment 2005: Progress towards sustainable forest Management. Rome: Food and Agriculture organization of the United Nations, 2006.
- Fu B.P. On the calculation of the evaporation from land surface // Chinese J. of Atmospheric Sciences. 1981. Vol. 5. P. 23–31.
- Hibbert A.R. Forest treatment effects on water yield // Forest hydrology, Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar. Oxford: Pergamon Press, 1967. P. 527–543.
- Monteith J.L. Evaporation and environment // XIX Symposium Society for Experimental Biology. Swansea: Cambridge Univ. Press., 1965. P. 205–234.
- Morton F.I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology // J. of Hydrology. 1983. Vol. 66. № 1–4. P. 1–76.
DOI: 10.1016/0022-1694(83)90177-4
- Morton F.I. What are the limits of forest evaporation? // J. of Hydrology. 1984. Vol. 74. 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 Sensing of Environment. 2007. Vol. 111. № 4. P. 519–536.
DOI: 10.1016/j.rse.2007.04.015
- Mu Q., Zhao M., Running S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. № 8. P. 1781–1800.
DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.019
- Onuchin A.A., Burenina T.A. Hydrological role of the Forest in Siberia / Trends in Water Research. NOVA Sci. Publ., 2008. P. 67–92.
- Sun G., Zhou G., Zhang Z., Wei X., McNulty S.G., Vose J.M. Potential water yield reduction due to reforestation across China // J. of Hydrology. 2006. Vol. 328. P. 548–558.
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.12.013
- Turner K.M. Annual evapotranspiration of native vegetation in a Mediterranean-type climate // Water Res. Bull. 1991. Vol. 27. № 1. P. 1–6.
DOI: 10.1111/j.1752-1688.1991.tb03107.x
- Vertessy R.A., Bessard Y. Anticipating the negative hydrologic effects of plantation expansion: Results from a GIS-based analysis on the Murrumbidgee basin / Forest management for water quality and quantity. Proceeding of the second forest erosion workshop. 1999.
- Wang Y. Water-yield reduction after afforestation and related processes in the semiarid Liupan Mountains, northwest China // J. of the American Water Res. Association. 2008. Vol. 44. № 5. P. 1086–1097.
DOI: 10.1111/j.1752-1688.2008.00238.x
- Wei X., Zhou X.F., Wang C.K. The influence of mountain temperate forests on hydrology, Northeast of China // Forest Chronicle. 2003. Vol. 79. P. 297–300.
DOI: 10.5558/tfc79297-2
- Yang D., Sun F., Liu Z., Cong Z., Ni G., Lei Zh. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis // Water Res. Research. 2007. Vol. 43. DOI: 10.1029/2006WR005224
- Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale // Water Res. Research. 2001. Vol. 37. № 3. P. 701–708.
DOI: 10.1029/2000WR900325
- Zhang L., Zhao F.F., Brown A.E. Predicting effects of plantation expansion on streamflow regime for catchments in Australia // Hydrology and Earth System Sciences. 2012. Vol. 16. P. 2109–2121.
DOI: 10.5194/hess-16-2109-2012
- Zhang Y., Peña-Arancibia J.L., McVicar T.R. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. № 1. DOI: 10.1038/srep19124

Regional Specificity of the Transformation of the Water Balance Structure during Restoration Successions in the Cutting of Dark Coniferous Forests of the Yenisey Ridge

T.A. Burenina^{a,*}, M.A. Korets^{a,**}, and Zh. R. Suleimanova^{a,***}

^aV. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch –
Separate division of FRC KSC SB RAS (IF SB RAS), Krasnoyarsk, Russia

*e-mail: burenina@ksc.krasn.ru

**e-mail: mik@ksc.krasn.ru

***e-mail: janetta_suleiman@mail.ru

The paper discusses the features of the transformation of the structure of the water balance in the dark coniferous forests of the Yenisey Ridge, disturbed by logging. Questions of evapotranspiration dynamics are considered, considering reforestation successions in the cut areas. Based on the use of satellite data (MOD16A2), the change in evapotranspiration was analyzed considering the disturbance of the forest cover in the watershed. Against the background of the general dependence of evapotranspiration on meteorological parameters, the results showed that at the basin level, the variation in evapotranspiration depends on the accumulative effect of forest cover disturbance in the watershed. The ranking of felled areas, consid-

ering the regenerative-age dynamics of the vegetation cover, made it possible to assess the contribution of various stages of the reforestation process to the total evaporation in the Suhoi Pit River basin, and to reveal how the ratio of logging sites of the current year to the areas of already afforested cutting areas affects the amount of total evaporation. Studies have shown that if less than 2% of the total watershed area is deforested, then the logging does not cause major change in evapotranspiration and river runoff.

Keywords: river basin, water balance, precipitation, evapotranspiration, runoff, logging, reforestation, Landsat, MOD16A satellite data

REFERENCES

- 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, pp. 395–406.
- Antipov A.N., Antipova N.D. Estimation of transpiration of vegetation in taiga geosystems. *Geogr. Priir. Resur.*, 1984, no. 4, pp. 115–124. (In Russ.).
- Bastiaanssen W., Menenti M., Feddes R., Holtslag A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Formulation. *J. Hydrol.*, 1998, pp. 198–212.
- Beideman I.N. *Spravochnik po raskhodu vody rasteniyami v prirodnnykh zonakh SSSR* [Reference Book on Water Consumption by Plants in the Natural Zones of the USSR]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983. 257 p.
- Bosch J.M., Hewlett J.D. A review of catchment experiment to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 1982, pp. 3–23.
- Budagovskii A.I. *Isparenie pochvennoi vlagi* [Evaporation of Soil Moisture]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 244 p.
- Budyko M.I. *Teplovoi balans zemnoi poverkhnosti* [Thermal Balance of The Earth's Surface]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1956. 255 p.
- Burenina T.A. Dynamics of hydrological regime restoration at the experimental felled plots. In *Sredobrazuyushchaya rol' lesnykh ekosistem Sibiri* [The Environmental Role of Siberian Forest Ecosystems]. Protopopov V.V., Ed. Krasnoyarsk: Izd-vo ILiD SO AN SSSR, 1982, pp. 106–114. (In Russ.).
- Burenina T.A., Borisov A.N., Shishikin A.S. Changes of Snow Moisture Balance in Logging Areas in Dark-Needled Forests of the Yenisei Ridge, Central Siberia. In *Forest Ecosystems: Management, Impact Assessment and Conservation*, edited by Deborah Elliott. Nova Science Publ., 2017, pp. 129–154.
- Burenina T.A., Musokhranova A.V., Suleimanova Zh.R. Dynamics of the structure of the water balance during reforestation successions in logging sites in the dark coniferous forests of the Yenisei Ridge. In *Upravlenie lesnymi ekosistemami v usloviyakh izmeneniya klimata: Mat. Mezhdun. Nauch.-Prakt. Konf. posvyashchennoi 105-letiyu so dnya rozhdeniya doktora biologicheskikh nauk, professora, zaslužennogo deyatelya nauki Petra Alekseevicha Gana* [Management of Forest Ecosystems under Climate Change: Proc. of the Int. Sci. and Pract. Conf. Dedicated to the 105th Anniversary of the Birth of Doctor of Biol. Sci., Prof., Honored Scientist P.A. Gan]. Bishkek, 2021, pp. 88–92. (In Russ.).
- FAO 2006. *Global Forest Resources assessment 2005: Progress towards sustainable forest Management*. Rome: FAO, 2006.
- Fedorov S.F. On the impact of felling on changes in the elements of its water balance. *Tr. GGI*, 1979, vol. 258, pp. 30–42. (In Russ.).
- Fedorov S.F. Mutations in structure of water and heat balance of forest areas under impression of deforestation. *Tr. GGI*, 1981, vol. 279, pp. 20–31. (In Russ.).
- Fu B.P. On the calculation of the evaporation from land surface. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 1981, no. 5, pp. 23–31.
- Hibbert A.R. Forest treatment effects on water yield. In *Forest hydrology. Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar*. Pergamon, Oxford, 1967, pp. 527–543.
- Gribov A. *Sredobrazuyushchaya rol' lesnykh ekosistem yuga Srednei Sibiri* [Ecological Role of Forest in the South of Central Siberia]. Abakan: Khakas. Gos. Univ. im. N.F. Katanova, 1997. 160 p.
- Karpechko Yu.V., Myasnikova N.A. Assessment of changes in water balance elements in the first year after felling in the taiga zone of the European North of Russia. *Uch. Zapisk. Ross. Gos. Gidrometeorolog. Univ.*, 2014, no. 33, pp. 31–44. (In Russ.).
- Korets M.A., Prokushkin A.S., Burenina T.A. Spatio-temporal trends in the average air temperature and precipitation in the Middle Yenisei basin (taiga zone) based on data from the Climatic Research Unit (CRU TS V. 3.22). In *Mat.y III Vseross. Nauch.-Prakt. Konf. "Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii"* [Proc. of the 3rd All-Russian Sci. and Pract. Conf. "Modern Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia"]. Irkutsk, 2020. (In Russ.).
- Krestovskii O.I. Logging and forestation influence water-yield in southern and middle taiga of ETS. *Vodn. Resur.*, 1984, no. 5, pp. 125–135. (In Russ.).
- Kutaf'ev V.P. Forest zoning of Central Siberia. *Vopr. Lesoved.*, 1970, no. 1, pp. 165–179. (In Russ.).
- Lapshina E.I., Gorbachev V.N., Khramov A.A. Vegetation and soils of the Yenisei Ridge (Southern part). In *Rastitel'nost' pravoberezh'ya Yeniseya* [Vegetation of the Right Bank of the Yenisei River]. Kuminova A.V., Ed. Novosibirsk: Nauka Publ., 1971, pp. 21–66. (In Russ.).
- Lebedev A.V. *Gidrologicheskaya rol' gornyykh lesov Sibiri* [Hydrological Role of Siberian Mountain Forests]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1982. 182 p.
- Molchanov A.A. *Gidrologicheskaya rol' lesa* [The Hydrological Role of the Forest]. Moscow: Izd-vo Akad. Nauk SSSR, 1960. 487 p.

- Monteith J.L. Evaporation and environment. In *The State and Movement of Water in Living Organisms: 19th Symposium Soc. for Exp. Biol.* Swansea: CUP, 1965, pp. 205–234.
- Morton F. I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *J. Hydrol.*, 1983, vol. 66, no. 1–4, pp. 1–76. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90177-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90177-4)
- Morton F.I. What are the limits of forest evaporation? *J. Hydrol.*, 1984, vol. 74, pp. 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, no. 4, pp. 519–536. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>
- Mu Q., Zhao M., Running S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.*, 2011, vol. 115, no. 8, pp. 1781–1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- Onuchin A.A. General snow accumulation trends in boreal forests. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2001, no. 2, pp. 80–86. (In Russ.).
- Onuchin A.A., Burenina T.A. Hydrological role of the Forest in Siberia. In *Trends in Water Research*. NOVA Sci. Publ., 2008, pp. 67–92.
- Penman H.L. *Rastenije i vlaga* [Plant and Moisture]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1968. 161 p.
- Pobedinskii A.V. Changes in the protective and water-regulating role of the forest under the influence of logging. *Vopr. Geogr.*, 1976, no. 102, pp. 169–179. (In Russ.).
- Rasulova A.M. Calculation of evapotranspiration in the basin of Lake Ladoga. In *Trud. Karel. Nauch. Tsentra RAN. Ser. limnologiya i okeanologiya* [Proc. of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Series of Limnology and Oceanology], 2021, no. 9, pp. 146–156. (In Russ.).
- Rauner Yu.L. *Teplovoi balans rastitel'nogo pokrova* [Thermal Balance of Vegetation]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1972. 206 p.
- Sun G., Zhou G., Zhang Z., Wei X., McNulty S.G., Vose J.M. Potential water yield reduction due to reforestation across China. *J. Hydrol.*, 2006, vol. 328, pp. 548–558. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.013>
- Turner K.M. Annual evapotranspiration of native vegetation in a Mediterranean-type climate. *Water Resour. Bull.*, 1991, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1991.tb03107.x>
- Vertessy R.A., Bessard Y. Anticipating the negative hydrologic effects of plantation expansion: Results from a GIS-based analysis on the Murrumbidgee basin. In *Forest management for water quality and quantity. Proceeding of the second forest erosion workshop*, 1999.
- Wang Y. Water-yield reduction after afforestation and related processes in the semiarid Liupan Mountains, northwest China. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 1086–1097. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00238.x>
- Myneni R. MOD15A2H v006. MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid. USGS, 2023. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.006>
- Wei X., Zhou X.F., Wang C.K. The influence of mountain temperate forests on hydrology, Northeast of China. *For. Chron.*, 2003, vol. 79, pp. 297–300. <https://doi.org/10.5558/tfc79297-2>
- Yang D., Sun F., Liu Zh., Cong Zh., Ni G., Lei Zh. 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, no. 4. <https://doi.org/10.1029/2006WR005224>
- 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, no. 3, pp. 701–708. <https://doi.org/10.1029/2000WR900325>
- Zhang L., Zhao F.F., Brown A.E. Predicting effects of plantation expansion on streamflow regime for catchments in Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2012, vol. 16, pp. 2109–2121. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2109-2012>
- Zhang Y., Peña-Arancibia J.L., McVicar T.R. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, no. 1. <https://doi.org/10.1038/srep19124>