

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«**СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**»
Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ А.А. Гостева

« ____ » _____ 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Анализ гидрологической роли лесов рек Сибирского региона с использованием
ГИС

09.04.02 Информационные системы и технологии

09.04.02.06 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге
природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель _____ зав. кафедрой, канд.техн.наук А.А. Гостева
подпись, дата

Выпускник _____ И.В. Данилова
подпись, дата

Рецензент _____ ст.науч.сотр., канд.техн.наук А.В. Токарев
подпись, дата

Нормоконтролер _____ А.А. Гостева
подпись, дата

Красноярск 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Водный баланс и его составляющие	6
1.1 Формула водного баланса	6
1.2 Суммарное испарение или эвапотранспирация.....	7
1.3 Методы расчета эвапотранспирации	9
1.4 Глобальные базы данных для оценки эвапотранспирации	12
2 Район исследований и используемые данные и программное обеспечение	16
2.1 Район исследований.....	16
2.2 Используемые данные	18
2.3 Используемое программное обеспечение	27
3 Расчет значений эвапотранспирации для ландшафтно-гидрологических комплексов и экорегионов	30
3.1 Систематизация климатических и гидрологических данных	30
3.2 Анализ климатических условий исследуемой территории по данным метеостанций и базы данных CRU.....	31
3.3 Выделение ландшафтно-гидрологических комплексов и экорегионов на основе карт растительности, почвенной и ЦМР.....	35
3.4 Результаты обработки данных Terra MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)	39
4 Анализ влияния структуры растительного покрова на суммарное испарение	41
4.1 Анализ эвапотранспирации по сезонам.....	41
4.2 Связь суммарного испарения с суммой летних температур	44
4.3 Интенсивность эвапотранспирации лесогидрологических комплексов.	46
4.4 Изменчивость суммарного испарения по годам.....	48
4.5 Вклад лесогидрологических комплексов в формирование стока реки Подкаменная Тунгуска.....	50
4.6 Анализ испарения лесогидрологических комплексов и климатических данных CRU.....	52
Заключение	53

Список использованных источников	55
Приложение А	63
Базы данных по эвапотраспирации	63
Приложение Б	66
Карта категорий земель и легенда к ней.....	66
Приложение В.....	70
Код для расчета эвапотранспирации по MOD 16	70

ВВЕДЕНИЕ

Гидрологический цикл или влагооборот - это непрерывное и циклическое движение воды по всей планете - вода выпадает в виде осадков на земную поверхность, формируя водотоки (реки), затем испаряется в атмосферу, снова превращаясь в осадки.

Территория земной суши, где формируется поверхностный водоток (река), называется гидрографическим водосбором (бассейном). Гидрологический режим рек - это закономерные изменения состояния водного объекта и его бассейна во времени и в пространстве, обусловленные физико-географические и климатические условия бассейна.

При расчете характеристик физико-географических условий прежде всего учитывают рельеф (средняя высота и уклон бассейна) и почвенно-растительный покров. Для изучения рельефа бассейнов рек привлекают цифровые модели рельефа (SRTM, MERIT Hydro и др.). Различные тематические карты и данные дистанционного зондирования используют для изучения растительного и почвенного покрова территории.

В качестве основных климатических условий учитывают атмосферные осадки, испарение, температуру воздуха. Фактические данные о гидрологических характеристиках (сток рек) и климатических показателях (атмосферные осадки, температура воздуха) в основном получают со стационарных метеостанций и гидропостов. Получение данных об эвапотранспирации - это очень трудоемкий процесс. Но, в последнее время развиваются глобальные климатические и гидрологические базы данных, которые содержат огромное количество структурированной информации. Появление таких баз данных способствовало значительному прогрессу в сфере облачных платформ для их обработки. Самая известная на сегодняшний день - это облачная платформа для геопространственного анализа данных в планетарных масштабах - Google Earth Engine.

Цель данной работы: на основе ландшафтной дифференциации исследуемой территории и данных об эвапотранспирации оценить вклад лесной растительности в суммарное испарение в бассейне реки Подкаменная Тунгуска.

Для этого нам предстояло решить следующие задачи:

- провести ландшафтную дифференциацию территории на основе карт растительности, почв, ЦМР с учетом климатических условий;
- разработать скрипт для пространственного анализа данных об эвапотранспирации в облачной системе Google Earth Engine;
- оценить гидрологическую роль лесных сообществ по их вкладу в суммарное испарение на водосборе.

1 Водный баланс и его составляющие

1.1 Формула водного баланса

Водный баланс - количественная характеристика всех форм прихода и расхода воды в атмосфере, на земном шаре и его отдельных участках. Водный баланс является количественным выражением круговорота воды на Земле [Будыко]. Влага в виде выпадающих осадков поступает на земную поверхность, после чего происходит ее перенос в водоемы поверхностным стоком или фильтрация в грунтовые воды. При испарении воды в атмосферу гидрологический цикл замыкается (рисунок 1) [14].

Формула водного баланса в общем виде выглядит следующим образом:

$$X = Y + ET, \quad (1)$$

где X - атмосферные осадки;

Y - поверхностный и подземный сток,;

ET - суммарное испарение.

За прошедшие 150 лет отмечаются изменения водного баланса в глобальном масштабе и это связано, главным образом, с хозяйственной деятельностью человека и значительно превышают изменения, произошедшие за предшествующее тысячелетие [43]. С начала XX века происходит рост глобальной приземной температуры воздуха, а наиболее интенсивное потепление наблюдается после 1976 г. [25]. Рост температуры воздуха ведет к росту влажности воздуха, и, как следствие осадков. При том, что в отдельных регионах может наблюдаться как рост, так и сокращение количества осадков в зависимости от изменения атмосферной циркуляции [43]. Воздействие изменения климата на величину испарения неоднозначно, хотя в целом положительно. Главными факторами, обуславливающими рост испарения, являются рост осадков, дефицит влажности воздуха, суммарная радиация и

увеличение продолжительности вегетационного периода [44]. Наблюдаемое в средних широтах северного полушария с середины 1970-х гг. снижение скорости ветра также является фактором уменьшения суммарного испарения [39]. Соответственно, изменение величин осадков и испарения влечет за собой изменение величины стока.

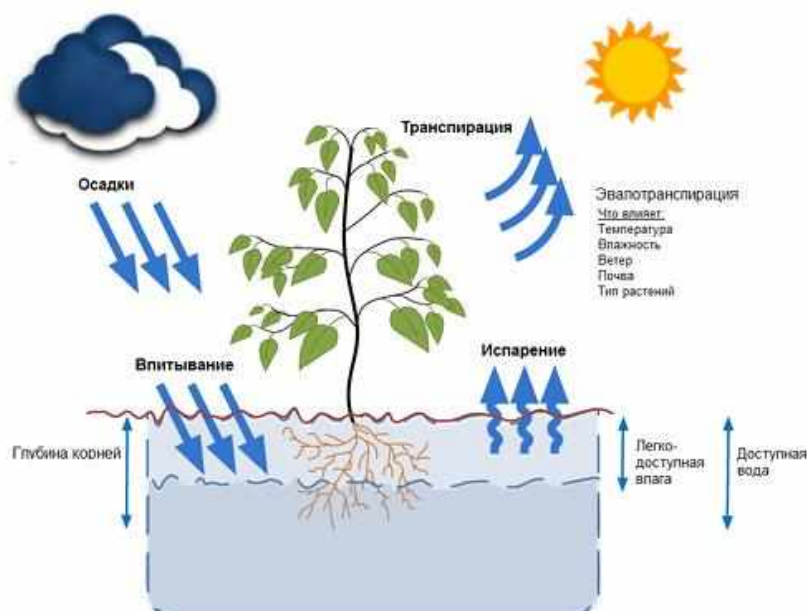


Рисунок 1 – Составляющие водного баланса

1.2 Суммарное испарение или эвапотранспирация

Суммарное испарение – составляющая часть водного баланса речных бассейнов. В начале 30-х годов 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 [6] под суммарным испарением понимают испарение с покрытых растительностью участков суши, состоящее из транспирации (E_t), испарения влаги с поверхности земной поверхности (E_s), а также из испарения осадков (E_i), задержанных растительным покровом [14] (рисунок 1):

$$ET = E_t + E_s + E_i \quad (2)$$

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.

В пределах водного баланса, данные эвапотранспирации были разделены по нескольким направлениям. Первое - потенциальная эвапотранспирация (*PET*). *PET* отражает, что было бы произведено за счет влажности почв и растительного покрова в оптимальных условиях. Т.е. то количество воды, которое испарилось (теоретически), если бы условия окружающей среды были для этого оптимальными.

Второе направление - фактическая эвапотранспирация (*ET*). В данном случае измеряют фактическое количество воды, которое испаряется, исходя из существующих климатических условий в исследуемом районе. Испарение с почвы и транспирация происходят одновременно, и составляют величину эвапотранспирации. Когда доля растительности небольшая, эвапотранспирация определяется преимущественно испарением с поверхности почвы, но когда растительность хорошо развита и имеет почти полное проективное покрытие, транспирация становится основным процессом [14].

Среди пород, произрастающих в Сибири, водоемкость (максимальная способность листа насыщаться водой) распределяется следующим образом: сосна 0,14; лиственница 0,25; пихта 0,5; тополь и береза 0,67 [22].

С другой стороны, древостой влияет на степень задержания кронами осадков. Так, согласно А.В. Лебедеву, ель и пихта отличаются наиболее густым охвоением. Эти породы задерживают в среднем 37% осадков [19]. Иными словами, если принять задержание осадков кронами ели за 100%, то для сосняков и березняков эта величина выразится примерно в 50%. Сосна и пихта имеют разветвленную корневую систему, позволяющую равномерно распределять поверхностный сток, переводя его в подземный. Ель имеет поверхностную корневую систему, что приводит к большему поглощению воды живым напочвенным покровом.

1.3 Методы расчета эвапотранспирации

Существуют различные методы определения эвапотранспирации: метод полевых исследований, расчетные методы и эмпирические зависимости. Наиболее точными являются полевые исследования. В Советском Союзе большое внимание уделялось исследованию данных натуральных наблюдений [21; 27; 19; 29 и др.]. При этом многие исследователи отмечали большую трудоемкость методов прямого измерения суммарного испарения.

А.Р. Константиновым [15] был предложен метод расчета испарения по температуре и влажности воздуха, опираясь на данные метеорологических станций. Однако этот метод прогнозирует значения только в точке для конкретного местоположения и не позволяет делать прогнозы в региональном масштабе. 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 [8; 9; 7; 5]. За рубежом для оценки суммарного испарения развивались главным образом расчетные методы [54; 47; 71]. Из расчетных методов наиболее часто используемый - это метод водного баланса, где испарение - остаточный член уравнения водного баланса. Часто используется при наличии данных сетевых наблюдений за атмосферными осадками и речным стоком.

Широкое распространение получили расчетные схемы М.И. Будыко [8], А.И. Будаговского [6], Х.Л. Пенмана [24]. Они основаны на теории турбулентной диффузии и теплового баланса подстилающей территории. В рамках модели, предложенной М.И. Будыко [9] разрабатываются различные вариации расчетных методов эвапотранспирации в речном бассейне с учетом орографии и растительного покрова [41; 69 и др.]. Одной из наиболее распространенных моделей для изучения суммарного испарения благодаря удобству расчета и легкости получения необходимых метеорологических данных является уравнение Пенмана-Монтейта [53], которую многие исследователи модифицируют с учетом факторов, влияющих на процесс

эвапотранспирации [68; 72]. В 1991 году данная формула была утверждена Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) в качестве стандарта оценки эвапотранспирации по климатическим данным [32]. В уравнениях учитывается множество характеристик: солнечная радиация, плотность теплового потока почвы, среднесуточная температура на высоте 2 м, относительная влажность воздуха, скорость ветра и др.

Еще один из основных методов, применяемых для оценки фактического суммарного испарения является метод энергетического баланса. Энергия, прибывающая на поверхность, должна быть равна энергии, излучаемой поверхностью за тот же период времени. Уравнение для испаряющей поверхности может быть записано так:

$$R - G - \lambda ET - H = 0, \quad (3)$$

где R - чистая радиация;

H - ощутимое тепло;

G - тепловой поток в почве;

λET - скрытый тепловой поток.

Эвапотранспирацию по дням, неделям, месяцам или годам определяют используя спутниковые данные и метод энергетического баланса. Основное преимущество использования данных дистанционного зондирования при расчете эвапотранспирации в том, что значение эвапотранспирации можно рассчитать без количественной оценки других сложных гидрологических процессов. Эвапотранспирация изменчива как в пространстве из-за большой пространственной изменчивости осадков, гидравлических характеристик почв и типов растительности, так и во времени из-за изменчивости климатических условий [67].

Для определения эвапотранспирации на обширные площади с использованием спутниковых данных и минимального количества наземной

информации были разработаны методы SEBS (Surface Energy Balance Systems) [62] и SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) [37]. Методы основываются на решении уравнения энергетического баланса подстилающего слоя и используют ряд дистанционно измеряемых параметров и данные наземных метеорологических наблюдений.

Модель SEBS (Surface Energy Balance Systems) [62] предназначена для оценки турбулентных потоков тепла и суммарного испарения по данным спутниковых наблюдений. В качестве входных данных используются: 1) данные дистанционного зондирования (альbedo, коэффициент излучения, температура, нормализованный относительный индекс растительности (NDVI)), 2) метеорологические параметры (атмосферное давление, температура, относительная влажность, скорость ветра), 3) данные о радиации (солнечная радиация, длинноволновое излучение). Метод состоит из трех моделей: 1) модель для расчета условий энергетического баланса, 2) модель для получения стабильности параметров, 3) модель для оценки шероховатости для теплопередачи.

В работе [48] для оценки эвапотранспирации для плантаций масличной пальмы была апробирована модель SEBAL с использованием спутниковых данных Landsat-8 (OLI/TIRS) и климатических данных с ближайших метеостанций. Была рассчитана спектральная яркость, коэффициент отражения, альbedo, NDVI, излучательная способность, температура поверхности, тепловая энергия. Расчет эвапотранспирации по методу SEBAL по сравнению с аэродинамическими методами не показал существенной разницы, значение $r = 0,598$; $r = 0,75$.

Для использования методов SEBS и SEBAL обязательно необходимо учитывать местные почвенно-климатические условия. Применение методов SEBS, SEBAL исследовалось во многих странах [2; 23; 50] для оценки эвапотранспирации, в основном, сельскохозяйственных посевов, что показало приемлемую точность и высокий потенциал их использования. Исследования, проведенные в Зимбабве продемонстрировали возможность использования

метода SEBS для оценки эвапотранспирации посевов кукурузы. Аналогичные исследования, проведенные в ЮАР [45], Китае [38] и Иране [58], показали, что порядка 85 % результатов, полученных по методу SEBAL, воспроизводят данные полевых экспериментов. Результаты исследований, проведенных в Испании на взвешиваемых лизиметрах [59], показали, что метод SEBAL дает удовлетворительные результаты для люцерны и пшеницы. Аналогичные исследования на взвешиваемых лизиметрах на северо-востоке Китая показали, что метод SEBS, использованный для оценки эвапотранспирации по данным MODIS/Terra хорошо воспроизводит экспериментальные данные, а также, что расхождения экспериментальных данных по эвапотранспирации с оцененными по модели SEBS лежат в пределах 10–15 % [63].

Вышеперечисленные работы посвящены расчетам показателя эвапотранспирации для сельскохозяйственных угодий, для лесной территории такие работы встречаются редко [10; 26; 55].

1.4 Глобальные базы данных для оценки эвапотранспирации

В каталоге облачной платформы Google Earth Engine представлены базы данных (БД) для расчета глобальной эвапотранспирации разного пространственного и временного разрешения. Мы проанализировали только те базы данных, которые предоставляют климатические и гидрологические данные на территорию России.

БД PML_V2 (Приложение А, таблица) использует комбинированную биофизическую модель Пенмана-Монтейта-Леунинга. Преимущество данного продукта в том, что он предлагает разделение эвапотранспирации на 3 компонента: транспирация растительности, испарение с почвы, испарение перехваченных дождевых осадков растительностью [71].

TerraClimate (Приложение А, таблица) - это набор глобальных растровых данных о климатических факторах и переменных водного баланса. В продукте

применяется интерполяция климатических данных высокого пространственного разрешения WorldClim, данных грубого пространственного разрешения CRU Ts4.0 и 55-летнего реанализа климатических данных JRA55. WorldClim, CRU Ts4.0 и JRA55 каждый представляет собой интерполированный набор климатических данных, использующий в основе данные метеостанций. Данные CRU Ts4.0 о температуре, осадках и давлении пара используются для большей территории земной поверхности. Данные JRA55 используются для регионов: Антарктида, часть Африки и южной Америки и отдельные острова.

TerraClimate создает ежемесячные наборы данных о балансе поверхностных вод, используя модель водного баланса, которая включает эталонную эвапотранспирацию, осадки, температуру и интерполированную влагоемкость почвы, извлекаемую растениями. Модифицированная модель климатического водного баланса Торнтвейта-Мазера и данные о влагоемкости извлекаемой почвы использовались на сетке $0,5^\circ$.

Разработчики продукта TerraClimate предупреждают о ряде ограничений: данные не следует использовать для независимой оценки тенденций, применяемая модель водного баланса очень проста и не учитывает неоднородность растительного покрова или их физиологическую реакцию на изменение условий окружающей среды.

MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration представляет собой 8-дневный продукт расчета эвапотранспирации и скрытого теплового потока [49]. Алгоритм вычисления основан на логике уравнения Пенмана-Монтейта, которое учитывает ежедневные метеорологические данные и информацию о типе растительности, альбедо со спутниковых снимков MODIS. Потенциальная и фактическая эвапотранспирации рассчитываются как сумма значений за 8 дней, потенциальное и фактическое значение теплового потока рассчитываются как среднее за 8 дней.

FLDAS: Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System ("C" - глобальный масштаб) включает информацию о

многих переменных, таких как содержание влаги, эвапотранспирация, средняя температура почвы, общее количество осадков, влажность и др [52]. В продукте используется модель поверхности Noah версии 3.6.1 с ежечасным количеством осадков CHIRPS-6, масштаб которого был уменьшен с помощью набора инструментов NASA Land Surface Data Toolkit. Алгоритм работы основан на вычислении энергетического и водного баланса.

ERA5-Land Monthly Averaged - набор данных реанализа, обеспечивающий представление о климатических данных за несколько десятилетий января 1950 г по настоящее время. Реанализ объединяет модельные данные с реальными данными, полученными с гидропостов и метеостанций. База данных ERA5-Land Monthly Averaged содержит 50 климатических переменных, включая эвапотранспирацию. Помимо месячных осадков данные ERA-5 Land предоставляются как дневные (ERA5-Land Daily Aggregated) и почасовые (ERA5-Land Hourly). Для наших исследований подходят среднемесячные расчеты.

WAPOR Actual Evapotranspiration and Interception - продукт, определяющий фактическую эвапотранспирация и поглощение ($ETIa$) (декада, в мм/день) и включает суммарное испарения с почвы (E), транспирацию растительным покровом (T) и испарение от дождя, поглощаемого листьями (I). Значение каждого пикселя представляет собой среднесуточную $ETIa$ за данную декаду.

GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System - глобальная система данных о суше, разработка NASA версии 2 (GLDAS-2) состоит из трех компонентов: GLDAS-2.0, GLDAS-2.1 и GLDAS-2.2. GLDAS-2.0 полностью форсируется входными данными Принстонского метеорологического форсинга и предоставляет согласованные во времени ряды с 1948 по 2014 гг. GLDAS-2.1 форсируется комбинацией модельных данных и данных наблюдений с 2000 г. по настоящее время. Наборы продуктов GLDAS-2.2 используют ассимиляцию данных (DA), тогда как продукты GLDAS-2.0 и GLDAS-2.1 являются «разомкнутыми» (т. е. без ассимиляции данных).

Моделирование Reprocessed GLDAS-2.1 выполнено с 1 января 1948 г. с использованием влажности почвы и других полей состояния из климатологии LSM для каждого дня. В моделировании использовались общие наборы данных GLDAS для земного покрова (MCD12Q1), водная маска суши (MOD44W), текстура почвы и цифровая модель рельефа (GTOPO30). Параметры земной поверхности на основе MODIS использовались в текущих продуктах GLDAS-2.x, в то время как базовые параметры AVHRR использовались в GLDAS-1 и предыдущих продуктах GLDAS-2 (до октября 2012 г.).

База данных Reprocessed GLDAS-2.1 содержит 36 параметров, включая общую эвапотранспирация, испарение с голой почвы и водных поверхностей (реки, озера, моря и океаны), транспирацию, потенциальное испарение.

Характеристики всех вышеперечисленных продуктов представлены в таблице Приложения А.

2 Район исследований и используемые данные и программное обеспечение

2.1 Район исследований

Исследования проводились на Среднесибирском плоскогорье в пределах водосборного бассейна реки Подкаменная Тунгуска, ограниченного гидропостом Кузьмовка (рисунок 2) [10]. Длина реки на рассматриваемом участке составляет около 1 700 км, площадь бассейна - 223 тыс. км². Рельеф исследуемой территории среднегорный.

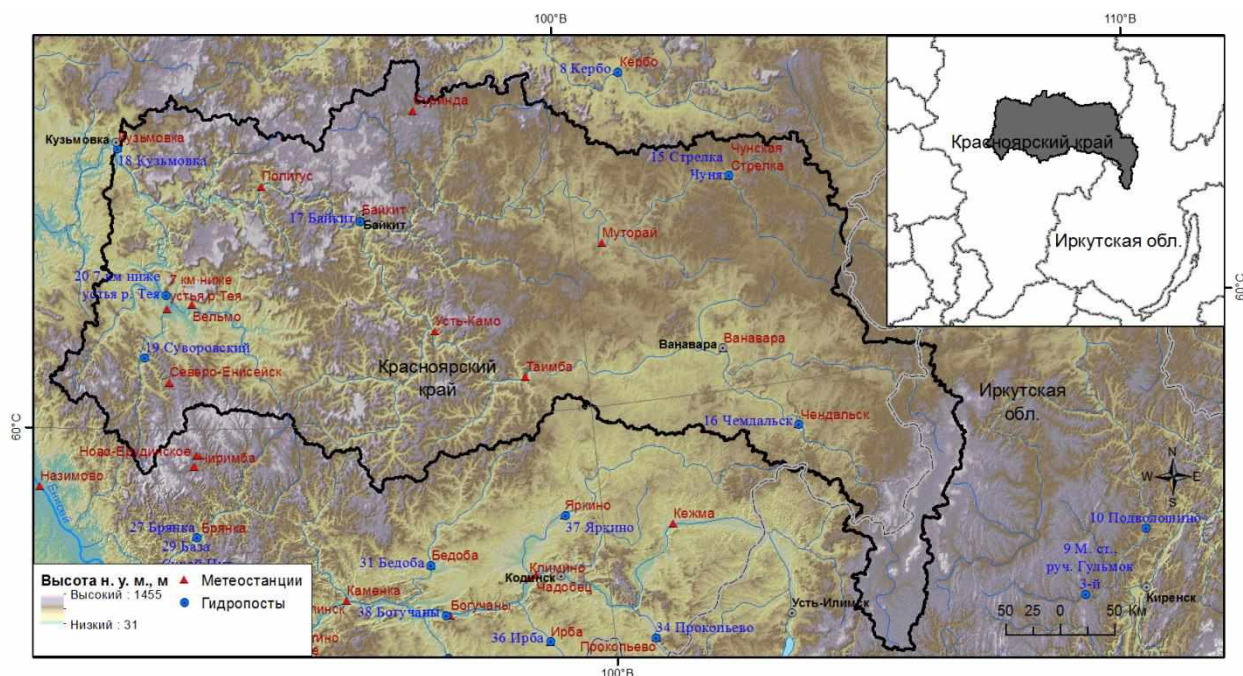


Рисунок 2 – Район исследований

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-Чуня, где разница между среднемесячными температурами самого холодного и самого теплого месяца достигает 60°C, экстремальных – до 82°C. Средняя температура

самого теплого месяца – июля на метеостанциях бассейна варьирует от 16,8 до 17 С⁰, исключение составляет метеостанция Стрелка-Чуня, где средняя температура июля +15,9 С⁰. Диапазон изменения температуры воздуха января в меридиональном направлении достигает 3,1 С⁰ (от -28,1 (Кузьмовка) до -31,2 С⁰ (Стрелка-Чуня)), на крайней юго-восточной метеостанции Чемдальск вновь наблюдается повышение температуры января до -28,4С⁰ [28].

Характер увлажнения территории является одним из ведущих факторов дифференциации ландшафтов. Неравномерное распределение осадков по территории связано с ослаблением западного влагопереноса 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) [10; 28].

На территории исследований на сегодняшний день действуют 6 метеостанций.

Первые наблюдения за расходом воды на реке Подкаменная Тунгуска были начаты в 1932 году на гидропосту Кузьмовка и продолжают по сегодняшний день. В разные годы на нескольких гидропостах (Тея, Суворовский, Байкит, Стрелка Чуня, Чемдальск) исследуемой реки проводились наблюдения, но на сегодняшний день они не работают.

Согласно лесорастительному районированию [17] территория включает Байкитский, Вельминский, Тунгусо-Чунский лесорастительные округа Среднесибирской лесорастительной области. На севере граничит с Нижне-Тунгусским лесорастительным округом северо-таежных лесов. Это слабо расчленённая часть Среднесибирского плоскогорья, занятая хвойными породами, основным лесообразователем является лиственница 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 [20].

2.2 Используемые данные

В исследовательской работе использовались следующие данные:

- база данных по эвапотранспирации MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration (Приложение А, таблица);
- цифровые модели рельефа;
- карты растительного покрова (проект Siberia-II www.siberia2.uni-jena.de; 3; 4; 36);
- почвенная карта (проект Siberia-II www.siberia2.uni-jena.de);
- данные метеорологических станций (атмосферные осадки, температура воздуха) и гидропостов (поверхностный сток);
- базы данных CRU TS 4.06 для определения суммарных месячных осадков и среднемесячных температур воздуха.

2.2.1 Данные по эвапотранспирации MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration

Данные MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration в виду предлагаемого пространственного и временного разрешений являются наиболее подходящими для достижения наших целей.

База данных MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16) (<http://www.ntsug.umd.edu/project/mod16>) разработана для оценки глобальной эвапотранспирации с поверхности Земли с использованием данных дистанционного зондирования. Данный продукт может быть использован для расчета регионального водного и энергетического баланса, влажности почв.

Продукт MOD16 содержит следующие данные (таблица 1): глобальная эвапотранспирация (*ET*); поток скрытого тепла (*LE*); потенциальная эвапотранспирация (*PET*); потенциальный поток скрытого тепла (*PLE*) охватывает площадь 109,03 млн.км². Также имеется 5 слой данных, отвечающий за их качество. Данные поставляются сценами размером 2400 x 2400 пикселей в синусоидальной проекции за 8-дневный (MOD16A2) и годовой (MOD16A3) интервалы начиная с 2000 г. В зависимости от версии продукта эвапотранспирация предоставляется с пространственным разрешением 500-1000 м в формате HDF-EOS.

Таблица 1 – Содержание продукта MOD16

Наименование	Описание	Мин	Max	Единицы измерения	Масштаб MOD16
ET	Общая эвапотранспирация	-32767	32700	кг/м/ 8 дней	0.05-0.1
LE	Средний поток скрытого тепла	-32767	32700	Вт/м ² / день	10000
PET	Общая потенциальная эвапотранспирация	-32767	32700	кг/м/ 8 дней	0.05-0.1
PLE	Средний потенциальный поток скрытого тепла	-32767	32700	Вт/м ² / день	10000

Значения *ET* и *PET* в каждом пикселе рассчитываются как сумма эвапотранспирации за 8 дней, а значения пикселя *LE* и *PLE* рассчитываются как среднее за 8 дней. Последний 8-дневный период в году составляет всего 5 или 6 дней в зависимости от количества дней в году.

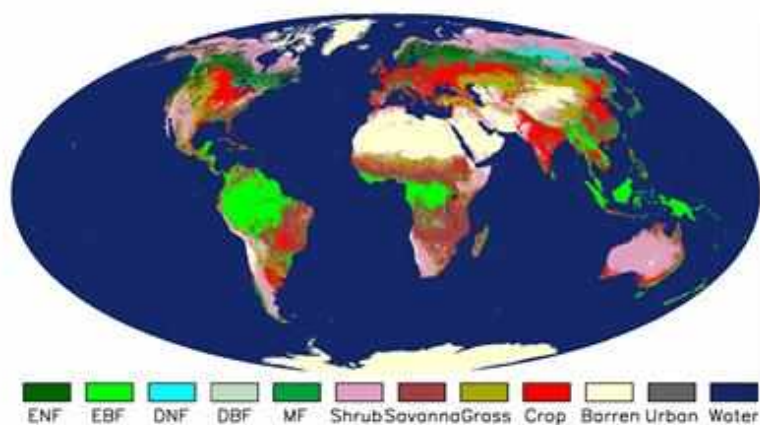
Вычисление эвапотранспирации представляет собой решение двух основных задач: 1) оценка устьичной проводимости для определения

транспирации с поверхности растений; 2) оценка испарения с поверхности земли. Эвапотранспирация рассчитывается ежесуточно и в дневное и в ночное время.

Модель расчета эвапотранспирации MOD16 основана на системе уравнений Пенмана-Монтейта, в которой учитываются множество характеристик: радиация, плотность теплового потока почвы, среднесуточная температура на высоте 2 м, давление насыщенного пара, влажность, скорость ветра и др.

MOD16 в качестве входных данных использует ежедневные метеорологические данные и данные о свойствах подстилающей поверхности - карта типов земной поверхности MCDLCHKM [65]. Карта MCDLCHKM (разрешение 500 м) разработана на основе спутниковых данных спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) - ключевого инструмента на борту американских спутников Terra и Aqua серии EOS, и включает 17 классов согласно классификации IGBP (Международная геосферно-биосферная программа) [65] (рисунок 3).

Ежедневные метеорологические данные, включая среднюю и минимальную температуру воздуха, фотосинтетически активную радиацию (ФАР), удельную влажность предоставляются Управлением глобального моделирования и ассимиляции НАСА (GMAO или MERRA GMAO). Данные получены за каждые 6 часов с использованием модели глобальной циркуляции (GCM), которая включает в себя как наземные (ежедневные данные о погоде из сети ежедневных приземных наблюдений Всемирной метеорологической организации (ВМО) (> 5000 станций), так и данные спутниковых наблюдений [Steven W. Running, 2019]. Т.к. метеорологические данные GMAO/NASA имеют пространственное разрешение 0,5 град, а пиксель MODIS 0.5 км, эту проблему несоответствия пространственного разрешения решили с использованием нелинейной пространственной интерполяции для улучшения метеорологических входных данных.



Land Cover Type 1 in 500-m MCDLCHKM	
Class Value	Class Description
0	Water
1	Evergreen Needleleaf Forest
2	Evergreen Broadleaf Forest
3	Deciduous Needleleaf Forest
4	Deciduous Broadleaf Forest
5	Mixed Forest
6	Closed Shrubland
7	Open Shrubland
8	Woody Savanna
9	Savanna
10	Grassland
12	Cropland
13	Urban or Built-Up
16	Barren or Sparsely Vegetated
254	Unclassified
255	Missing Data

Рисунок 3 – Карта типов земной поверхности MCDLCHKM на основе данных спектрорадиометра MODIS

Валидация данных эвапотранспирации MOD16 проводилась во многих работах [55; 56; 57]. Указывается, что коэффициент корреляции модельной эвапотранспирации с наземными наблюдениями составляет 0,76, а ошибка воспроизведения — около 10 %.

2.2.2 Цифровые модели рельефа

Растровая ЦМР SRTM (Shuttle radar topographic mission) [<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>], данная съемка доступна на всю территорию Российской Федерации, ограниченную 60-й параллелью. ЦМР SRTM имеет точность в плане порядка 16 м и 10 м по высоте при шаге на местности 3

угловые секунды (60-90 м) [18; 64]. Эта модель доступна к скачиванию из открытых источников (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) в виде матрицы размером 5x5 градусов в стандартных форматах, поддерживаемых большинством программных продуктов обработки материалов ДЗЗ.

Другая используемая растровая ЦМР местности была создана на основе данных ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model). Пространственное разрешение в плане – 15 м [ASTER GDEM, 2011]. Данный продукт бесплатно доступен посредством загрузки из Интернет (<http://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/index.html>). ASTER GDEM охватывает поверхность суши между 83° с.ш. и 83° ю.ш., распространяется в формате GeoTIFF в географической системе координат (широта/долгота) и разрешением 1 угловая секунда (примерно 30 м). Система координат данных WGS-1984/EGM96. Оценка точности глобального продукта – 20 м (95 % доверительный интервал) для данных по вертикали и 30 м (95 % доверительный интервал) по горизонтали [34].

2.2.3 Карты растительного покрова

Растительность является одним из главных составляющих эвапотранспирации. В своей работе мы использовали две карты, характеризующие растительность. Карта категорий земель представлена в векторном формате, масштаб 1:1 000 000 и выполнена сотрудниками Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН на основе камерального дешифрирования спутниковых изображений MODIS 2000-2002 года (рисунок 4) по проекту Siberia II (www.siberia2.uni-jena.de). Легенда к карте категорий земель (рисунок 4) дана в Приложении Б, таблица.

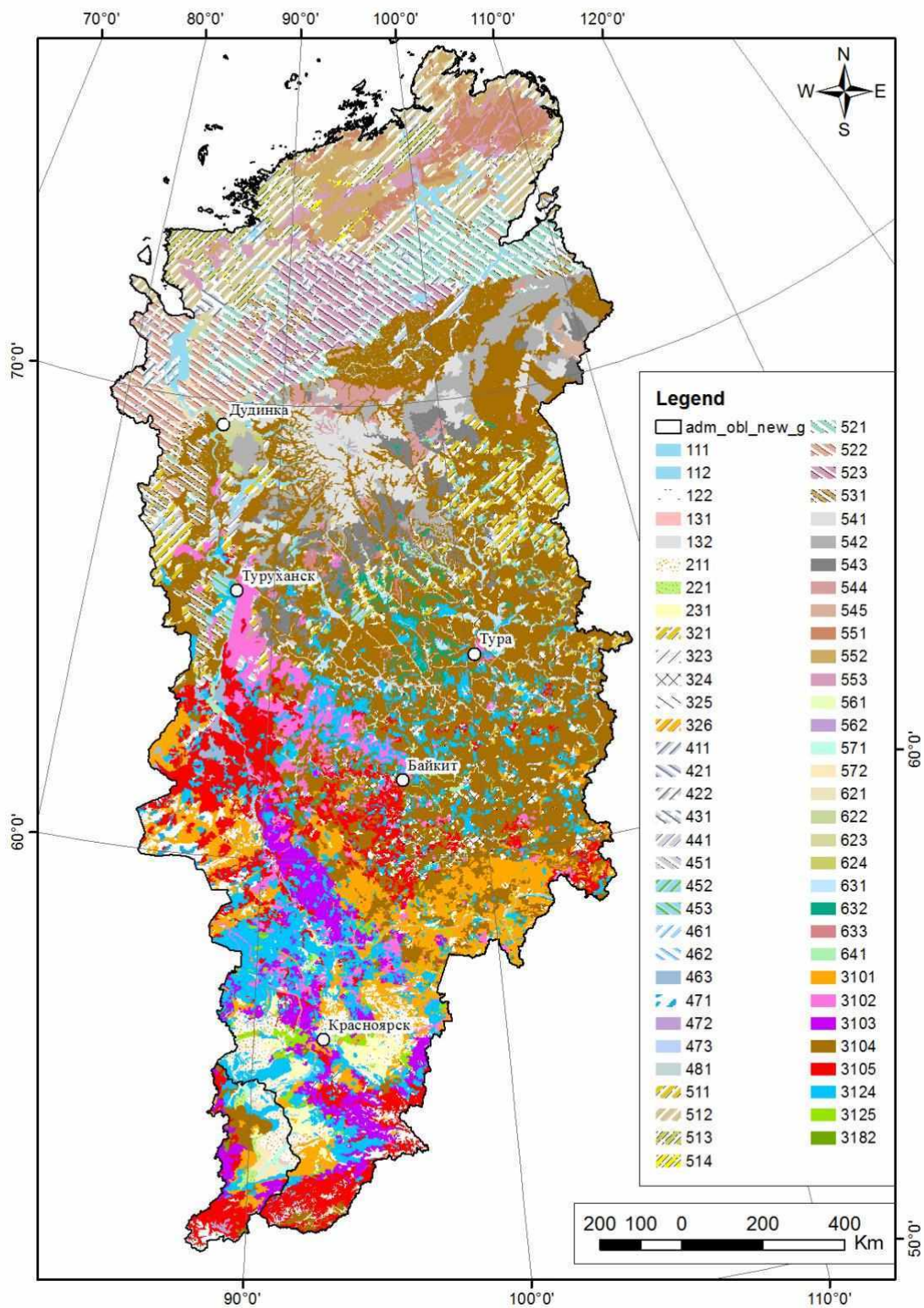


Рисунок 4 – Карта категорий земель

Также использовали карту наземных экосистем Северной Евразии [4], которая создана по данным спутникового прибора SPOT-Vegetation с пространственным разрешением около 1 км и отражает пространственное распределение основных типов растительности и не покрытых растительностью земель по состоянию на 2000 год (рисунок 5).

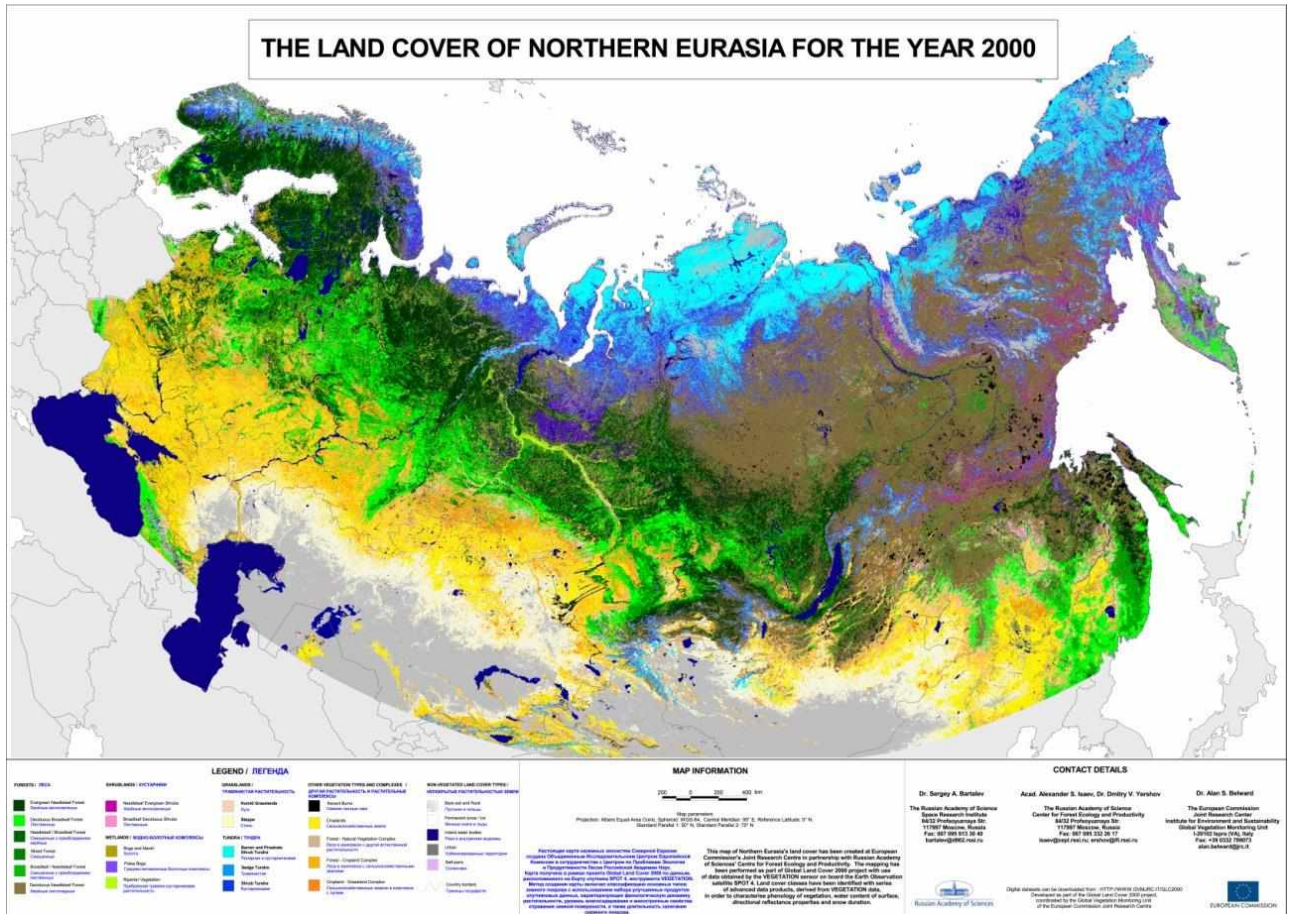


Рисунок 5 – Карта наземных экосистем Северной Евразии

Разработка карты выполнялась сотрудниками Института космических исследований в рамках международного проекта Global Land Cover 2000 в сотрудничестве с Объединенным Центром Европейской Комиссии и Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. Метод создания карты включал классификацию типов наземного и, в частности растительного покрова, с использованием ряда новых спектральных, спектрально-временных спектрально-угловых индексов, отражающих фенологические, влажностные структурные свойства наблюдаемой поверхности.

2.2.4 Почвенная карта

Одним из немаловажных факторов, влияющих на эвапотранспирацию, являются почвы.

Для исследования была использована векторная почвенная карта Красноярского края (проект Siberia-II, www.siberia2.uni-jena.de).

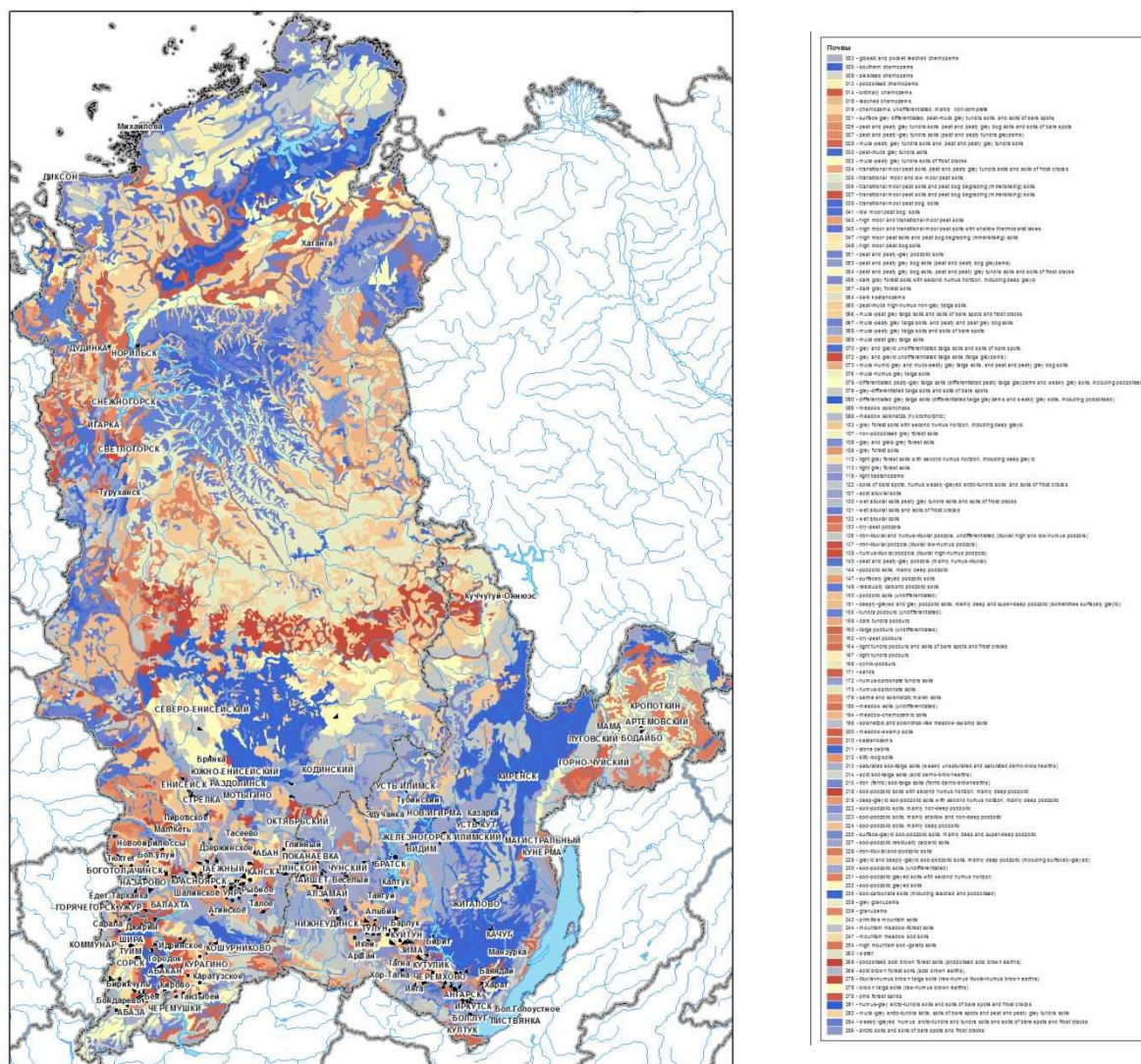


Рисунок 6 – Почвенная карта Красноярского края. М 1:1 000 000

Масштаб карты почв 1:1 000000. Легенда карты включает: типы почв, состав по горизонтам, материнская порода для трех преобладающих почв в полигоне.

2.2.5 Фактические данные метеорологических станций и гидропостов

Для анализа климатических характеристик исследуемой территории, месячные значения температур воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и суммы атмосферных осадков (мм) были получены по данным метеорологических станций из архива ВНИИГМИ-МЦД за период 2000-2014 гг. (<http://www.meteo.ru>) и с сайта pogodaklimat.ru. Осреднение данных по осадкам и температурам воздуха проводилось по шести станциям Красноярского края (Кузьмовка, Байкит, Усть-Камо, Кербо, Стрелка, Чемдальск) и двум метеостанциям Иркутской области (Ика, Токма) (рисунок 2, таблица 2).

Таблица 2 – Метеорологические станции

№ п.п.	Метеорологическая станция	Координаты метеостанции	Наличие данных за период
1	Кузьмовка	62.315371, 92.138411	1973-2022
2	Байкит	61.6833, 96.3833	1934-2022
3	Усть-Камо	60.7100, 97.5100	1973-2022
4	Кербо	62° 42' 51.2208" Е 101° 6' 48.9384"	2000-2019
5	Стрелка	61.738233, 102.802877	1977-2019
6	Чемдальск	59.663157, 103.374504	1971-1994
7	Ика	59.311150, 106.344715	1966-2019
8	Токма	58.253860, 105.874430	2000-2021

К анализу также были привлечены фондовые материалы Федерального государственного бюджетного учреждения "Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды" (УГМС) – данные многолетних наблюдений за среднеголетним расходом воды на гидрологических постах (таблица 3).

Таблица 3 – Гидрологические посты

№ п.п	Река -пост	Координаты гидропоста	Площадь водосбора, км.кв.	Период работы гидропоста
1	Подкаменная Тунгуска - фабрика Кузьмовка	62.3100, 92.1100	218000	1939-2018
2	р. Подкаменная Тунгуска - пос. Суломай	61.5100, 91.0100	232000	1979-2018
3	Тея – прииск Суворовский	60.374487, 92.640544	5670	1934-1951
4	Р. Вельмо - п. 7 км ниже устья Тея	60.996894, 93.424756	22900	1959-1977
5	Р. Подкаменная Тунгуска - п. Байкит	61.6833, 96.3833	159000	1962-1995
6	р. Чуня - п. Стрелка Чуня	61.739852, 102.803230	13300	1961-1994
7	р. Подкаменная Тунгуска- п. Чемдальск	59.663157, 103.374504	16700	1962-1995
8	Р. Подкаменная Тунгуска - фабрика Усть-Камо	60.7100, 97.5100	68400	1963-1994

Единицы измерения расхода воды - м³/с. Данные переписывались вручную с последующей систематизацией в программе Excel.

2.3 Используемое программное обеспечение

2.3.1 ArcGIS

ArcGIS - геоинформационный продукт, разрабатываемый компанией Esri (США) с учетом передовых тенденций развития информационных технологий и потребностей ГИС-пользователей. Компания Esri является признанным лидером в создании и продвижении современных геоинформационных технологий [31].

ArcGIS представляет собой полную систему, которая позволяет собирать, организовывать, управлять, анализировать, обмениваться и распределять географическую информацию. Являясь мировым лидером среди платформ для построения и использования геоинформационных систем (ГИС), ArcGIS используется людьми по всему миру для применения географических знаний в практической сфере государственного управления, бизнеса, науки, образования и СМИ. Платформа ArcGIS позволяет публиковать географическую информацию для доступа и использования любыми пользователями. Система доступна в любой точке, где возможно использование веб-браузеров, мобильных устройств в виде смартфонов, а также настольных компьютеров. ПО представляет собой масштабируемое решение для работы с пространственными данными как отдельных пользователей, так и распределенных рабочих групп.

Отличительная особенность ArcGIS в том, что данное семейство программных продуктов включает в себя все компоненты, необходимые для построения инфраструктуры пространственных данных. В нем есть средства подготовки и ведения геоданных (ArcGIS for Desktop), средства публикации веб-служб и ГИС-функциональности для удаленного доступа (ArcGIS for Server), средства создания каталогов геоданных и геопорталов (Geoportal Server).

2.3.2 Облачная платформа Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) - это облачная платформа для геопространственного анализа данных в планетарных масштабах [<https://developers.google.com/earth-engine/>]. Она позволяет использовать огромные вычислительные мощности компании Google для изучения самых разнообразных проблем: потерь лесов, засухи, стихийных бедствий, эпидемий, продовольственной безопасности, управления водными ресурсами, изменения климата и защиты окружающей среды.

Через Google Earth Engine доступно огромное количество данных, к которым можно применять различные процедуры обработки для получения необходимых изображений. Этот сервис решает главную проблему для ученых, которая заключается в том, как наилучшим образом получить доступ к растущим объемам спутниковых данных и предоставить исследователям удобную площадку для поиска соответствующих данных. Сервис использует облачные вычисления для обеспечения доступа к разным форматам данных, их совместного использования и интеграции. Это повлекло за собой создание не только инфраструктуры с петабайтным масштабом, но также и API-интерфейсов, использующих JavaScript и Python, которые позволяют добавлять и обрабатывать различные данные.

Основные преимущества работы в GEE:

- множество функций для геопространственного анализа и отображения данных;
- каталог глобальных данных в открытом доступе (климатические, почвенные, данные дистанционного зондирования, информация о рельефе и др.);
- возможность загружать свои растровые и векторные данные (снимки с квадрокоптера, точки полевых исследований и др.);
- возможность создания веб-приложений
- GEE является бесплатным инструментом для некоммерческого пользования и научных исследований.

Общедоступный каталог данных Earth Engine (Earth Engine Data Catalog) представляет собой огромный архив часто используемых наборов геопространственных данных. Большая часть каталога состоит из изображений дистанционного зондирования Земли, включая весь архив миссии Landsat (а это почти полвека наблюдений), а также полные архивы данных от европейских спутников Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-5P с различными уровнями обработки, климатические прогнозы, данные о земном покрове, геофизические,

экологические и социально-экономические наборы данных. В каталоге есть удобный инструмент поиска, включая поиск по тегам.

Каталог обновляется со скоростью около 6000 сцен в день для активных миссий дистанционного зондирования. Пользователи могут запрашивать добавление новых наборов данных в общедоступный каталог или загружать свои личные данные через REST-интерфейс с помощью инструментов на основе браузера или командной строки и делиться с другими пользователями или группами пользователей по своему усмотрению.

Пользователи создают запросы к Earth Engine, используя функции, взятые из библиотеки API - это более чем 1500 функций, которые варьируются по сложности от простых математических операций до машинного обучения, мощных геостатистических инструментов и операций обработки изображений.

3 Расчет значений эвапотранспирации для ландшафтно-гидрологических комплексов и экорегионов

3.1 Систематизация климатических и гидрологических данных

Для проведения работы по изучению климатических условий и гидрологического режима рек бассейна реки Подкаменная Тунгуска на начальном этапе работ был произведен сбор, систематизация, анализ и обработка фондовых материалов наблюдений за гидрологическим и метеорологическим режимами. Было выбрано 4 гидропоста (Кузьмовка, Чемдальск, Усть-Камо, Байкит), по которым имеются наиболее полные данные наблюдений за среднемесячным расходом воды. Также было выбрано 6 метеостанции (Кузьмовка, Усть-Камо, Чемдальск, Байкит, Стрелка Чуня, Ика), на которые имеются данные по температуре и осадкам за период 2000-2014 гг.

Данные (среднемесячные осадки и среднемесячная температура воздуха) были получены с сайтов rogodaklimat.ru и meteo.ru и имели расхождения. Для того, чтобы определить данные какого сайта достоверны, данные об осадках

были сверены с данными, полученными в Федеральном государственном бюджетном учреждении "Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды". В итоге данные с сайта pogodaklimat.ru - верны, сайт meteo.ru использовать нельзя для наших исследований.

Верные данные были структурированы в ПО Excel и рассчитаны следующие показатели: сумма осадком за календарный год, сумма осадков за гидрологический год (с ноября прошлого года по октябрь текущего года), сумма жидких осадков (с мая по октябрь), сумма твердых осадков (с ноября по апрель). По температуре были рассчитаны следующие показатели: средняя температура за летний период (июнь-август), средняя температура за ноябрь-апрель, температура самого холодного месяца - января, сумма температур май-август, сумма температур за гидрологический год, сумма температур больше 0 °С.

Данные о расходах воды на 4 гидропостах вручную были также занесены в таблицы в ПО Excel.

3.2 Анализ климатических условий исследуемой территории по данным метеостанций и базы данных CRU

С целью оценки климатических условий исследуемой территории был проведен анализ данных по атмосферным осадкам и температуре воздуха. Месячные значения температур воздуха и суммы атмосферных осадков были получены по данным метеорологических станций с сайта pogodaklimat.ru за период 2000-2014 гг. Минимальные осадки зафиксированы на метеостанции Чемдальск, максимальные - на метеостанциях Кузьмовка и Северо-Енисейский. С продвижением на восток количество атмосферных осадков значительно уменьшается (рисунок 7).

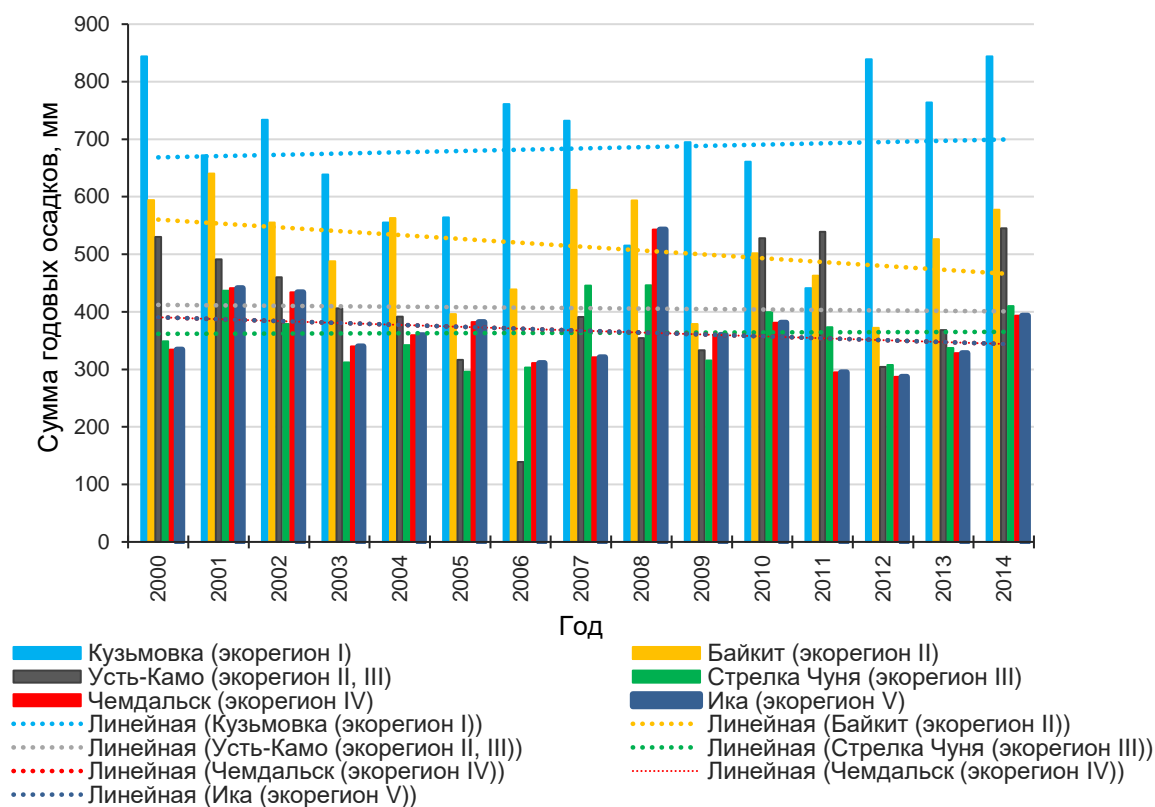


Рисунок 7 – Сумма годовых осадков на реперных метеостанциях за 2000-2019 гг.

Для пространственного распределения атмосферных осадков и температур воздуха на территории исследований были сформированы картографические слои среднемесячных и среднегодовых значений температур и суммарных осадков для всего исследуемого региона. Для этого были использованы: база данных Лаборатории Климатических исследований Университета Восточной Англии - CRU 4.06 (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.06/)., среднемесячные значения температуры и осадков в форме матрицы с размером ячейки 0.5 градуса, экстраполированных по данным метеостанций за период 1950 – 2016 гг.

Как следует из рисунка 8 пространственное распределение осадков в границах исследуемого водосбора отражает как особенности орографии территории, так и специфику атмосферной циркуляции в регионе - подтверждается значительное уменьшение осадков по мере продвижения с запада на восток [10].

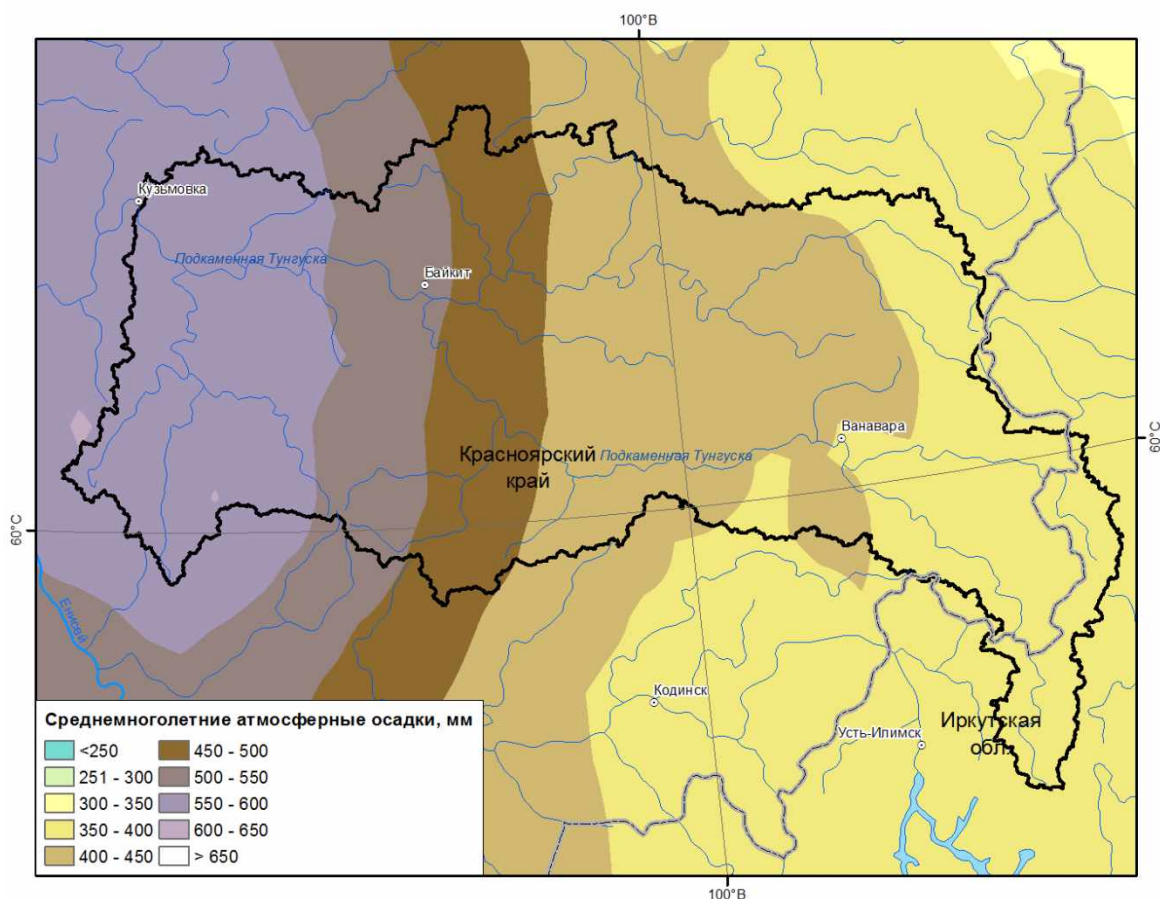


Рисунок 8 – Среднегодовое распределение атмосферных осадков за 2050-2016 гг.

Полученные среднестатистические характеристики осадков позволили более корректно оценить поступление влаги на водосбор, чем это было бы сделано при использовании данных метеостанций.

Аналогично был проведен анализ по температуре воздуха (рисунок 9, 10). Изменение температуры воздуха по метеостанциям в течение года характеризуется определенной синхронностью: отмечается повышение с февраля по июль, спад с июля по декабрь. Тренды среднегодовой температуры воздуха (рисунок 9) показывают ее повышение за 2000-2019 г.

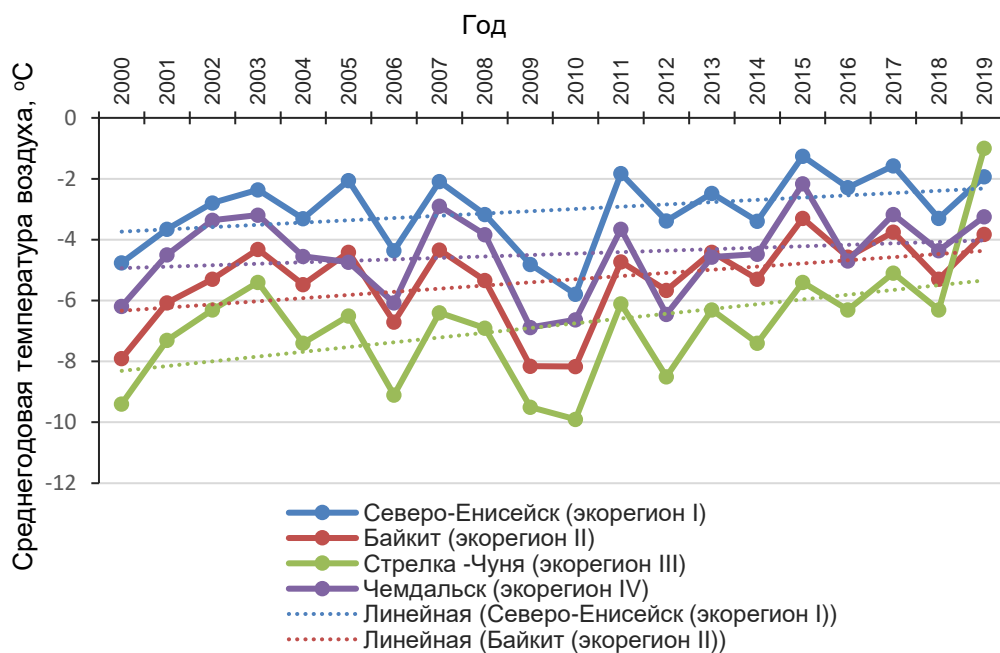


Рисунок 9 – Среднегодовая температура воздуха на реперных метеостанциях за 2000-2019 гг.

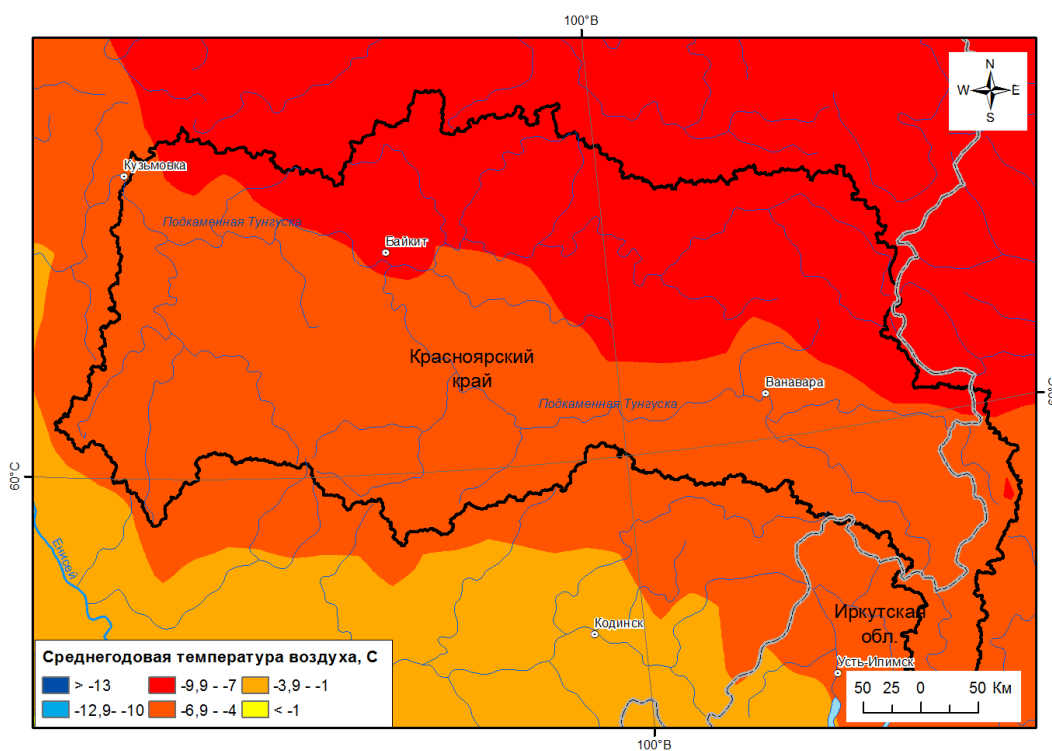


Рисунок 10 – Пространственное распределение показателя среднегодовой температуры воздуха

На рисунке 9 и 10 показано, что температура воздуха изменяется в широтном направлении, наблюдается ее понижение с юга на север.

3.3 Выделение ландшафтно-гидрологических комплексов и экорегионов на основе карт растительности, почвенной и ЦМР

Для определения вклада типа лесной растительности в суммарное испарение на водосборе был проведен анализ карт растительности. Необходимо было выделить ареалы лесной растительности с относительно однородными гидрологическими функциями. На рисунке 11 показана карта, где мы провели объединение классов по составу пород на основе карты категорий земель.

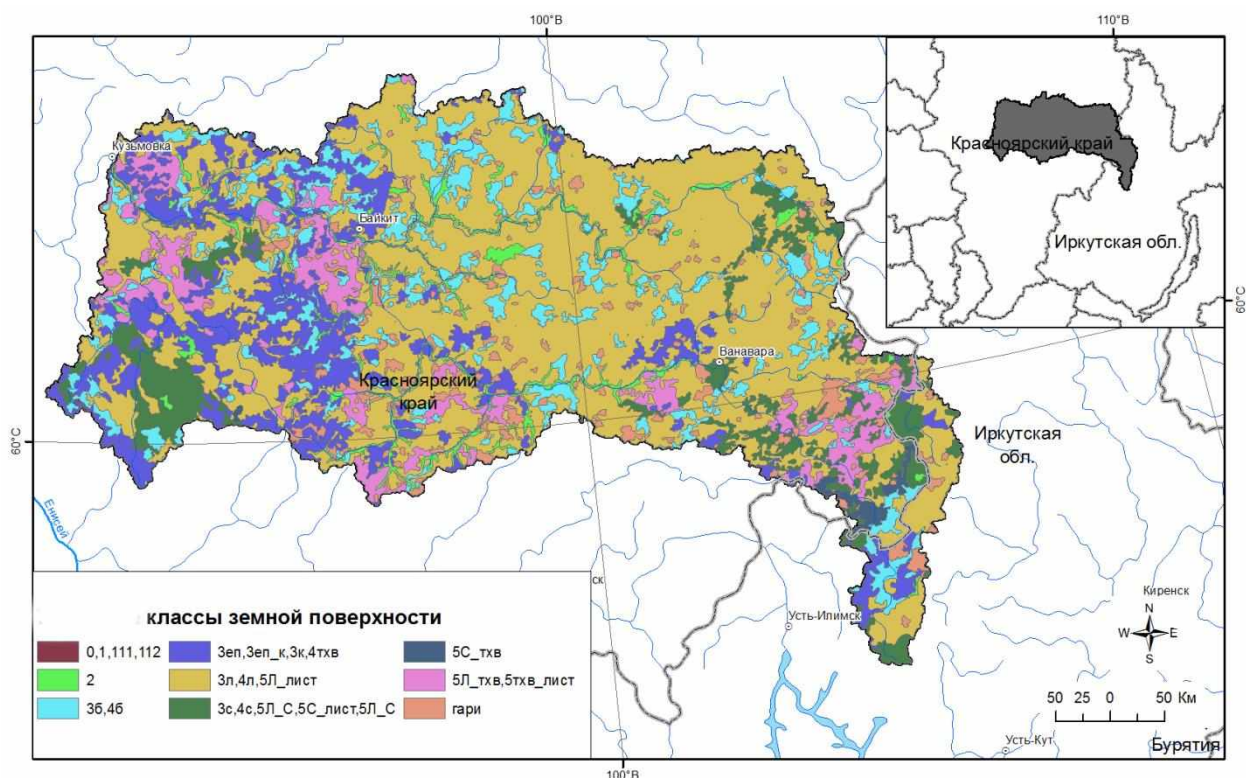


Рисунок 11 – Распределение классов лесной растительности в бассейне реки Подкаменная Тунгуска

Также для исследуемой территории была подготовлена карта почв (рисунок 12). Некоторые типы почв были объединены.

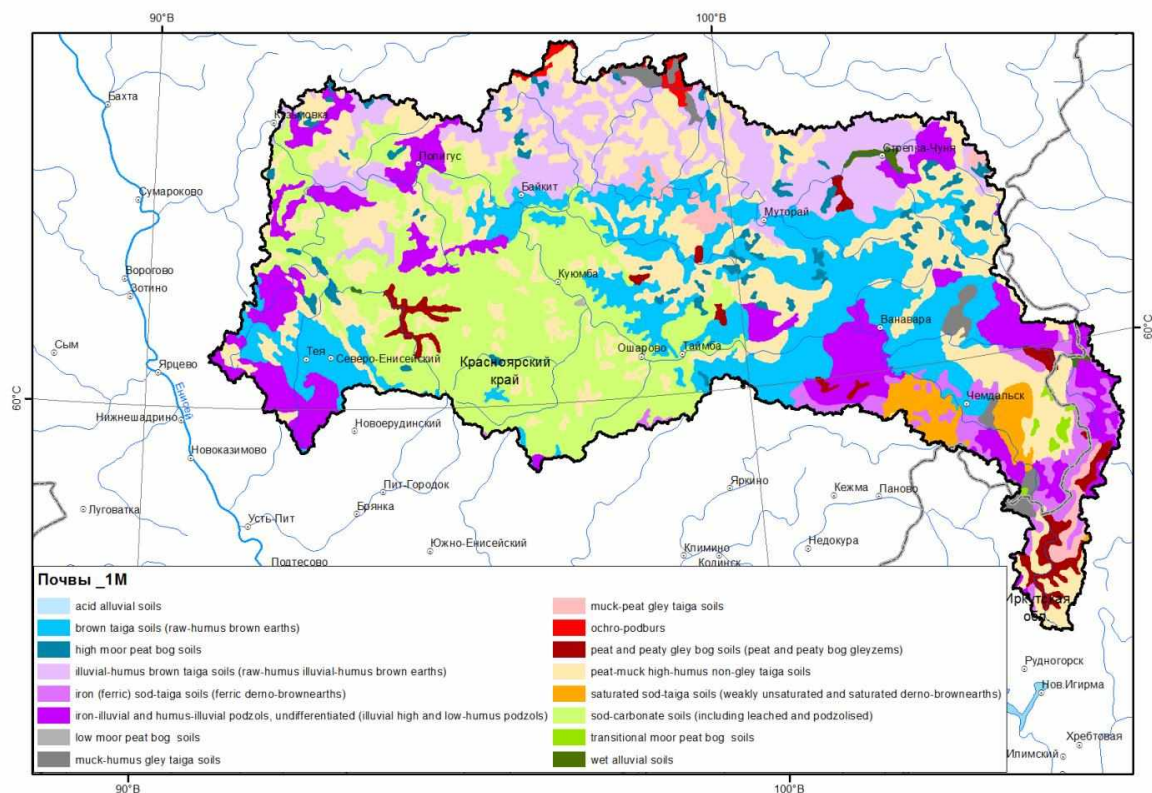


Рисунок 12 – Карта почв на исследуемую территорию

Анализ карт растительности, почв и ЦМР показывает, что бассейн Подкаменной Тунгуски характеризуется сложной ландшафтной структурой. Поэтому мы рассматривали ландшафтную дифференциацию бассейна Подкаменной Тунгуски с точки зрения гидрологической однородности, подразумевая, что каждый природный комплекс имеет определенное гидрологическое содержание. Подход выделения ландшафтно-гидрологических комплексов (ЛГК) был предложен в свое время Виноградовым [11] и Антиповым [1].

С точки зрения оценки влияния различных лесных сообществ на эвапотранспирацию, внимание было акцентировано на гидрологических функциях, выполняемых этими экосистемами, т.е. рассматривались участки земной поверхности, обладающие характерной эвапотранспирацией, сложившейся в результате сочетания определенных типов и видов растительности и почв. На основе пересечения вышеуказанных карт была выполнена дифференциация водосбора Подкаменной Тунгуски на три

категории классов земной поверхности: не покрытые растительностью земли; травяно-кустарниковые + болота и т.п.; лесопокрытые. Для категории лесопокрытых земель были выделены группы растительных формаций, которые являются значимыми в определении таких важнейших экофизиологических характеристик наземного покрова как листовой индекс и эвапотранспирация: не возобновившиеся гари; лиственничные, сосновые, темнохвойные, березовые, смешанные темнохвойные с лиственничными и лиственными породами, смешанные темнохвойно-сосновые насаждения. Выделенные ареалы вышеперечисленных классов земной поверхности условно можно назвать «лесогидрологические комплексы», т.к. через свое влияние на суммарное испарение они играют важную стокоформирующую роль на водосборе (рисунок 13) [10].

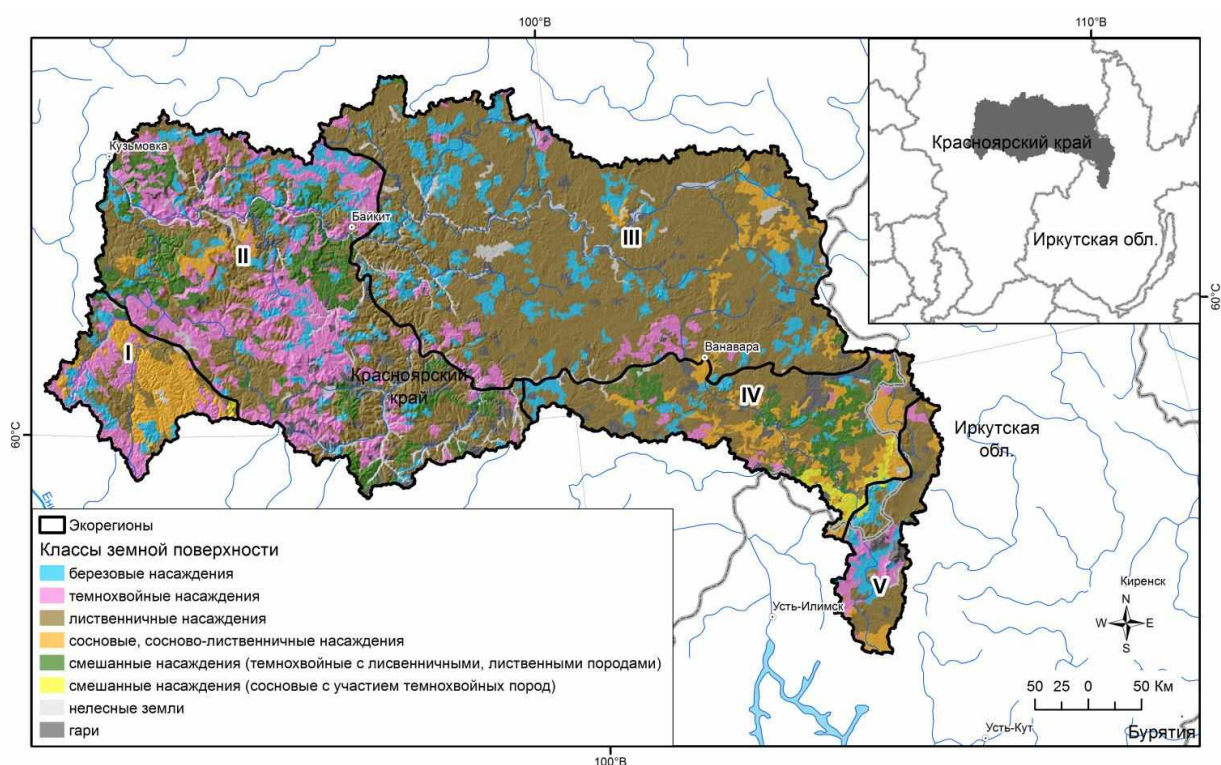


Рисунок 13 – Распределение классов земной поверхности внутри экорегiónов

Следующий шаг – дифференциация изучаемой территории на более крупные единицы – экорегiónы. Экорегiónы должны отражать пространственное распределение факторов климата, рельефа и подстилающей поверхности.

На основе комплексного анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM, лесогидрологических комплексов, а также климатических данных на территории бассейна Подкаменной Тунгуски были выделены экорегионы (рисунок 13). Для каждого лесогидрологического комплекса при помощи пространственного анализа (Zonal Statistics, ArcGIS) были рассчитаны основные статистические характеристики климатических параметров (средняя температура воздуха и осадки) по данным CRU и параметров рельефа (абсолютная высота и уклон поверхности) с использованием ЦМР SRTM (таблица 4).

Таблица 4 - Характеристика экорегионов

№ региона, площадь, км ²	Абсолютная высота, м				Уклон поверхности, град				Температура воздуха, °С				Сумма годовых атмосферных осадков, мм			
	мин	макс	сред +/-	STD	мин	макс	сред +/-	STD	мин	макс	сред +/-	STD	мин	макс	сред +/-	STD
1, 13849	123	1067	433 +/-123		0	25,3	3,7 +/-2,3		-5,5	-4,1	-4,8 +/-0,3		564	601	592 +/-5	
2, 75112	44	831	413 +/-132		0	29,4	3,4 +/-3,4		-8,9	-4,3	-5,8 +/-0,9		415	595	532 +/-49	
3, 94144	147	801	406 +/-65		0	24,6	1,7 +/-1,6		-8,6	-5,3	-7,4 +/-0,8		382	525	426 +/-29	
4, 29237	191	701	368 +/-61		0	30,7	1,7 +/-1,5		-7,2	-5,0	-6,0 +/-0,5		382	420	394 +/-8	
5, 10549	364	911	540 +/-63		0	25,9	2,1 +/-1,8		-7,0	-5,0	-6,1 +/-0,6		383	399	393 +/-3	

Далее комплексы экспертно были объединены в экорегионы. В экорегионы были включены различные лесогидрологические комплексы, которые играют особую роль в структуре водного баланса каждого региона и бассейна в целом (рисунок 13). В результате были получены 2 векторных слоя: экорегионы и лесогидрологические комплексы для каждого экорегиона.

3.4 Результаты обработки данных Terra MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)

Для расчета показателей эвапотранспирации была использована база данных MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006>).

В облачной системе Google Earth Engine (GEE) был разработан скрипт для получения графика (chart) параметров эвапотранспирации.

На рисунке 14 представлены рабочие окна в GEE:

1) окно с перечнем скриптов, баз данных и данные для расчетов. В нашем случае мы подгружали полигоны (экорегiónы и ландшафтно-гидрологические комплексы) в формате shp.

2) окно, где отображается код.

3) графики

4) визуализация данных. В нашем случае показаны полигоны для дальнейших расчетов.

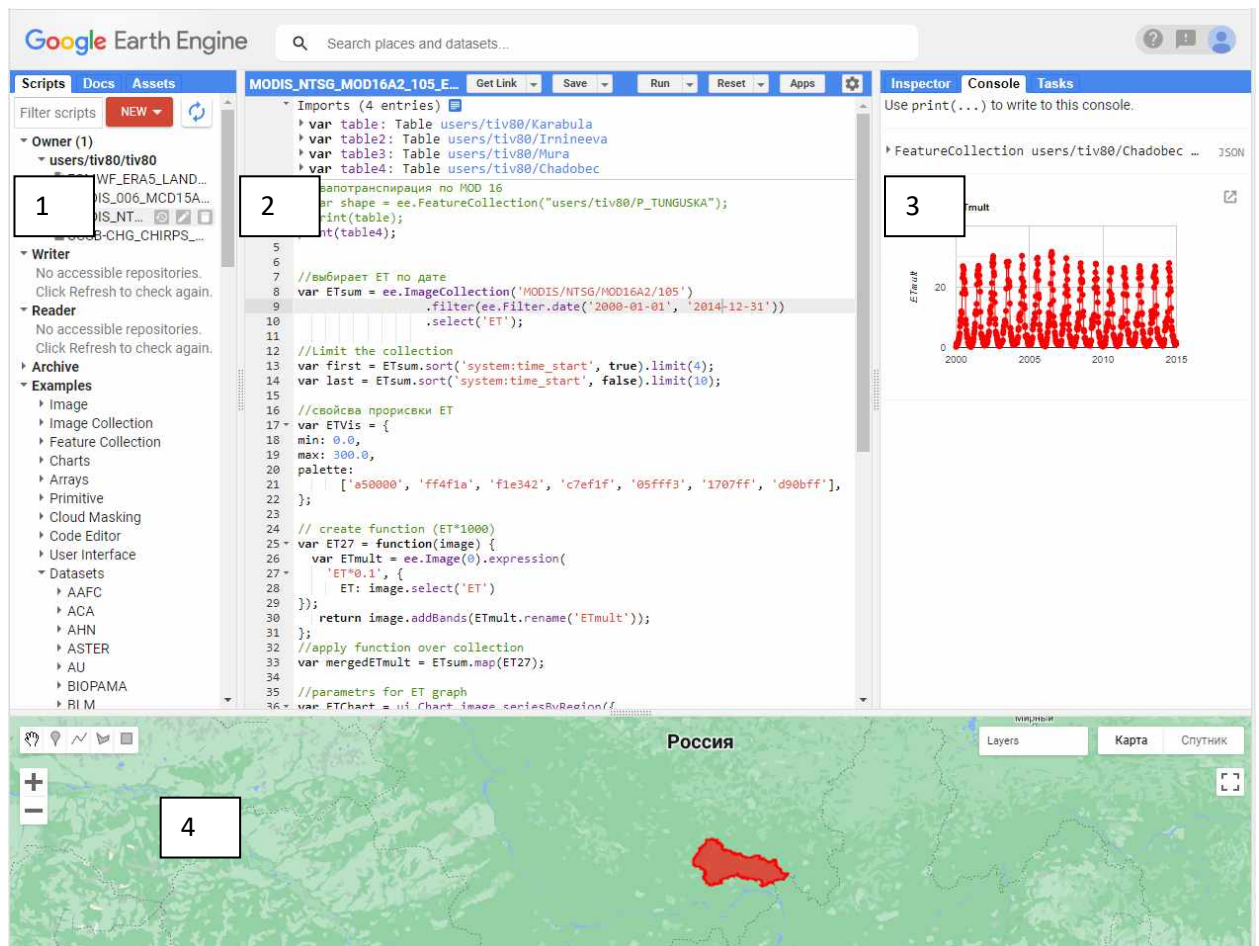


Рисунок 14 – Рабочие окна в Google Earth Engine

Для решения наших задач в GEE рассчитывалась усредненная по площади экорегионов и лесогидрологических комплексов сумма эвапотранспирации за 8-дневный период с 2000 по 2014 год. Рассчитывали только фактическую эвапотранспирацию (ET), пространственное разрешение 500 м.

Данные, показанные на графике выгружаются в формате CSV. Далее мы их импортировали в ПО Excel. Таблица содержала данные за 8 дней, которые суммировались для каждого месяца и затем суммировались по сезонам и годам.

Суммарная эвапотранспирация по сезонам и по годам рассчитывалась для каждого из 5 экорегионов, а также суммарная эвапотранспирация для каждого лесогидрологического комплекса внутри каждого экорегиона.

4 Анализ влияния структуры растительного покрова на суммарное испарение

4.1 Анализ эвапотранспирации 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 листвой деревьев и живым напочвенным покровом (травостой, кустарники, мох). Длительность «зимнего сезона» мы определили по данным справочника [28] - продолжительность 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 вегетации, когда растениями тратится значительное количество влаги на транспирацию. В «летний сезон» в нашем анализе были включены все летние месяцы [28]. 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 период к зимней эвапотранспирации охватывает промежуток времени с 1 сентября по 31 октября [10].

Анализ данных MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16) по эвапотранспирации показал, что значения годовой эвапотранспирации различаются как по экорегионам, так и по выделенным классам растительного покрова - лесогидрологическим комплексам (рисунок 15). При этом зимой выделенные лесогидрологические комплексы испаряют 10-14% от суммарного

испарения, в переходные сезоны – 25-30%, а в период вегетации 60-65% (рисунок 16). Анализ интенсивности эвапотранспирации по сезонам показал, что зимой испарение в листопадных фитоценозах и экосистемах, представленных темнохвойными и сосновыми насаждениями, практически не различается, что говорит о том, что в отношении суммарного испарения эти насаждения «работают» практически одинаково (рисунок 17, 18).

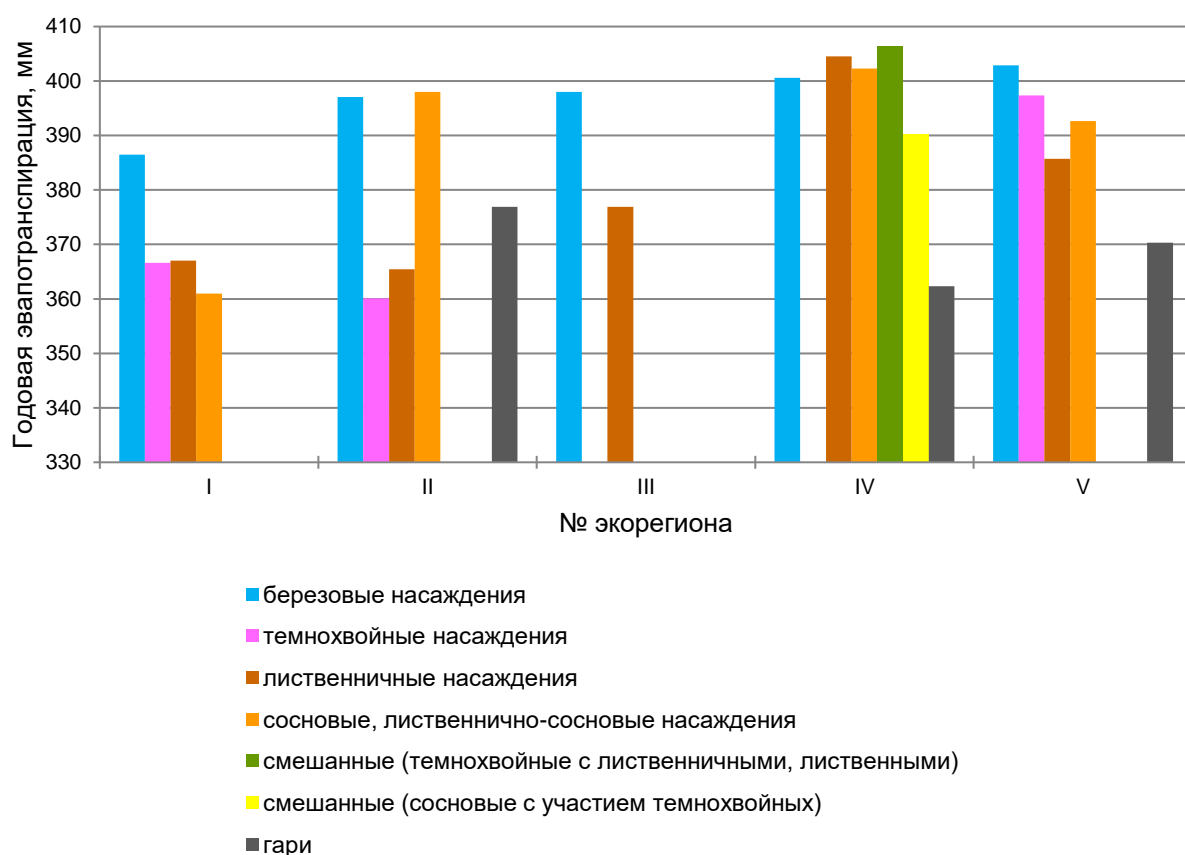


Рисунок 15 – Средняя годовая эвапотранспирация ландшафтно-гидрологических комплексов за 2000-2014 гг по экорегионам

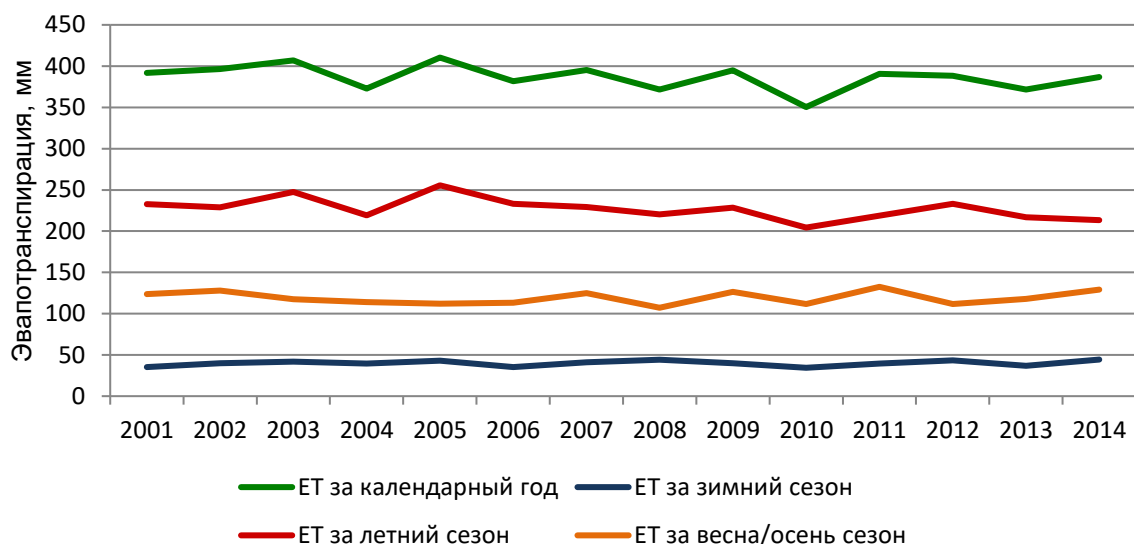


Рисунок 16 – Испарение березовых насаждений в экорегионе I в разные сезоны

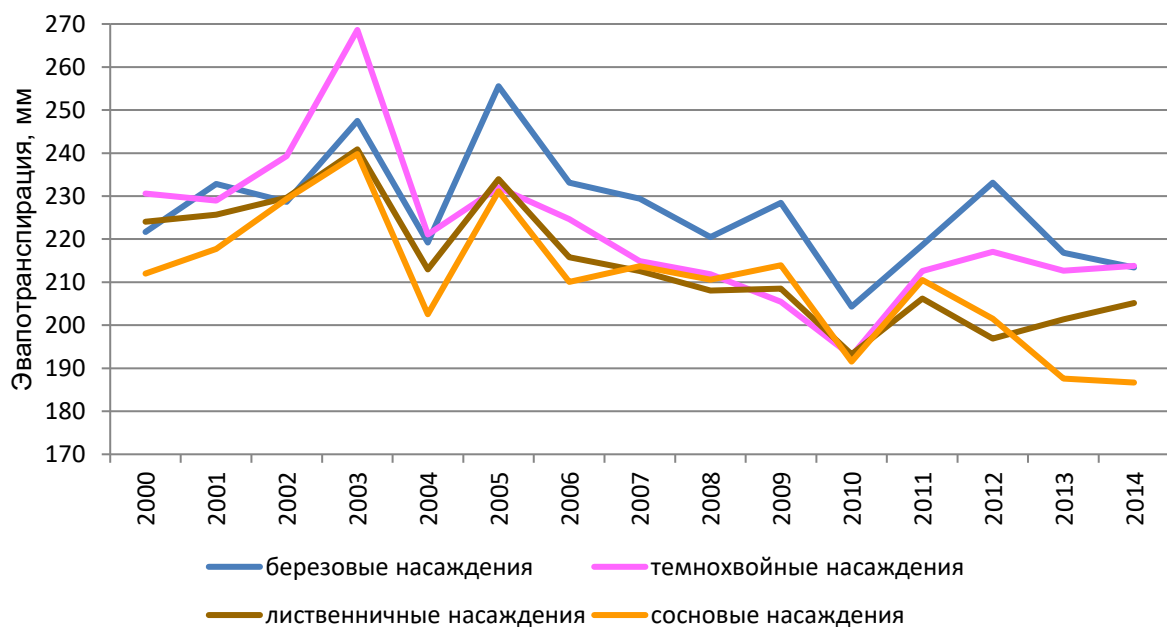


Рисунок 17 – Испарение различных типов насаждений в экорегионе I в летний сезон

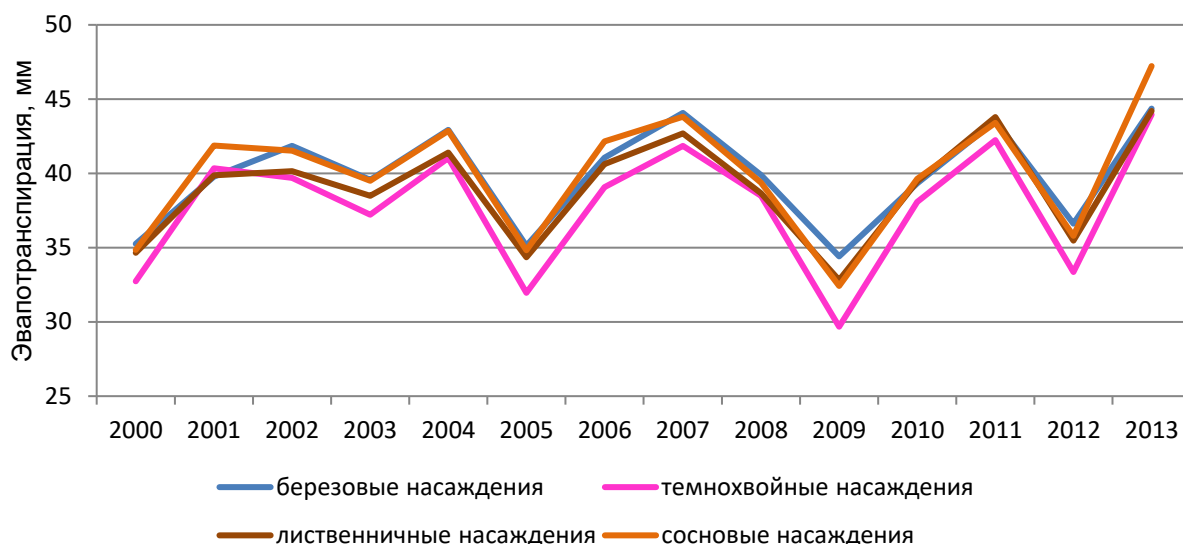


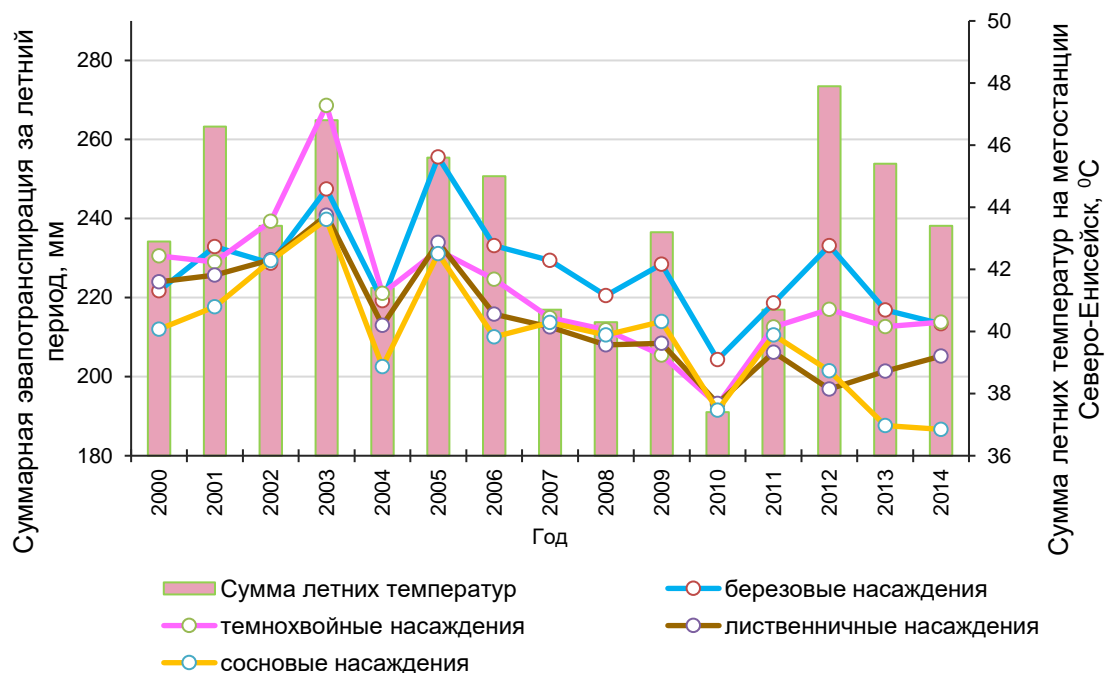
Рисунок 18 – Испарение различных типов насаждений в экорегионе I в зимний сезон

Заметные различия в расходах влаги на испарение между этими лесогидрологическими комплексами проявляются в период вегетации (рисунок 18), что связано как с климатическими параметрами территории, так и различиями листовых индексов этих классов лесной растительности [10].

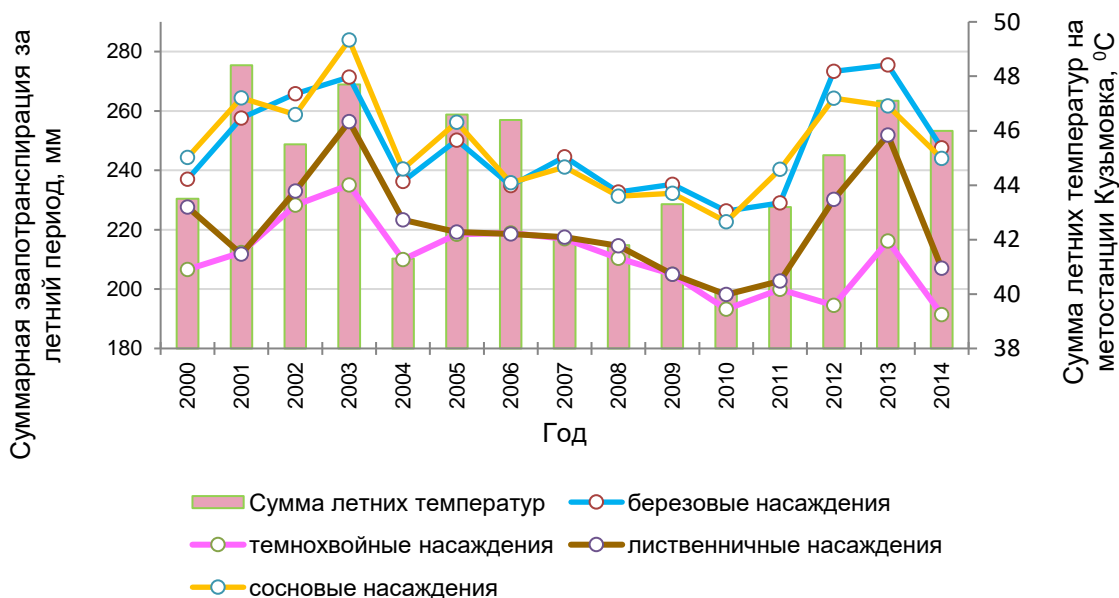
4.2 Связь суммарного испарения с суммой летних температур

На рисунке 19 показано изменение летней эвапотранспирации в сочетании с динамикой суммы летних температур для регионов I и II. Из графиков видно, что пики эвапотранспирации, как правило, приходятся на максимальные значения суммы летних температур. Абсолютный минимум эвапотранспирации для всех представленных здесь лесогидрологических комплексов наблюдался в 2010 году, когда сумма летних температур в Северо-Енисейске составляла всего 38°C, а в Кузьмовке - 36°C, 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 классах растительного покрова.

В экорегионах III-IV не просматривается такой четкой связи между суммой летних температур и эвапотранспирацией, как в первых двух экорегионах. Чем дальше на восток, суммы летних температур растут на 4-6°, но недостаточное количество осадков ограничивает эвапотранспирацию.



а)



б)

Рисунок 19 – Связь суммарного испарения за летний период в регионе I (а) и регионе II (б) с суммой летних температур на метеостанции Северо-Енисейск (а) и Кузьмовка (б)

И только в те годы, когда осадков выпадает на 15-20% выше нормы при сумме температур 47-48°C березняки способны испарять до 280 мм за период вегетации, а лиственничные насаждения при сумме температур 46-48°C тратят на эвапотранспирацию 250-260 мм. Для V экорегiona из-за отсутствия репрезентативной метеостанции не удалось проанализировать связь расхода влаги на испарение с метеорологическими параметрами [10].

4.3 Интенсивность эвапотранспирации лесогидрологических комплексов

Если рассматривать лесогидрологические комплексы по их интенсивности эвапотранспирации, то независимо от географического положения и метеорологических факторов, на первом месте среди рассматриваемых нами насаждений стоят березняки. При это для них характерна значительная вариабельность эвапотранспирации как по годам, так и в рамках одного года по экорегionaм (рисунок 20а). Для лиственничников, несмотря на изменчивость суммарного испарения по годам (рисунок 20б), просматривается тенденция увеличения этого показателя с запада на восток до IV экорегiona (средняя многолетняя величина эвапотранспирации изменяется от 367 мм 405 мм в год), в V – отмечается ее снижение, в среднем почти на 20 мм в год. Аналогичная тенденция прослеживается и для класса растительности, объединяющего сосновые и сосново-лиственничные насаждения (рисунок 20в). 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 экорегionaх, для II экорегiona характерны минимальные значения (рисунок 20г). Очевидно, это связано с тем, что в I и V экорегionaх значительную долю в составе древостоя составляет кедр.

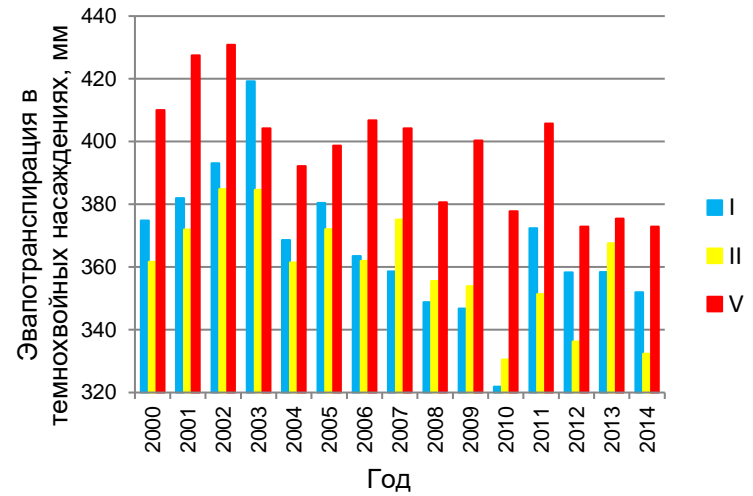
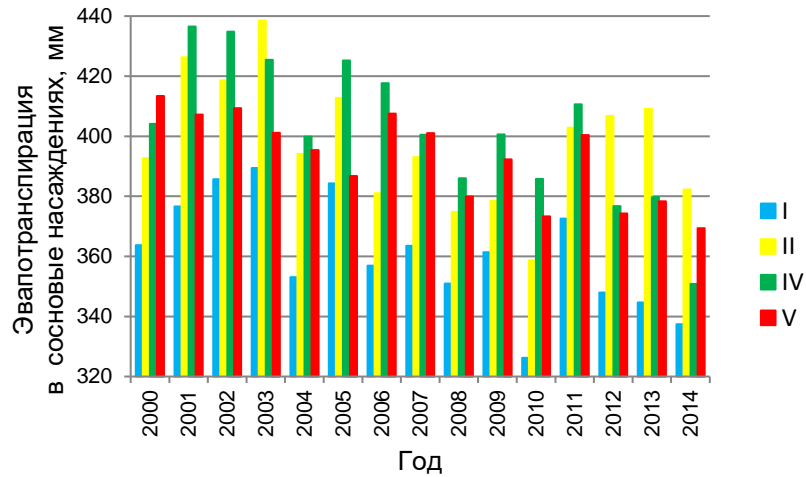
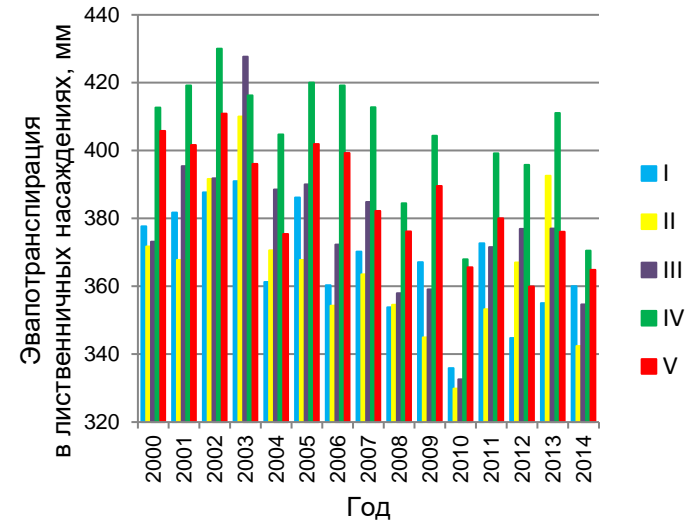
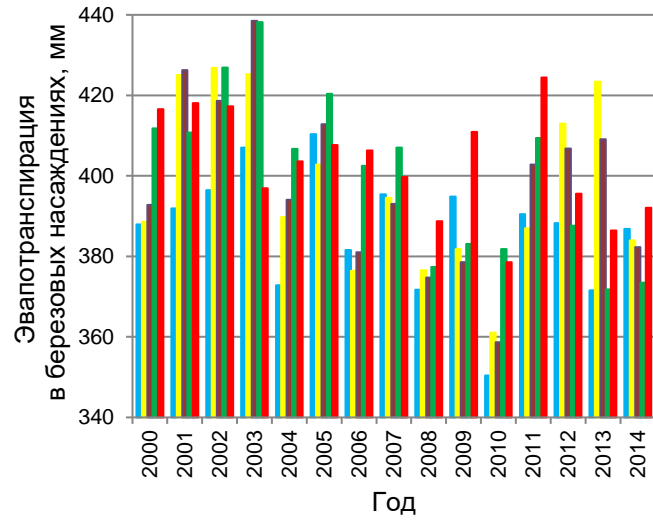


Рисунок 20 – Динамика среднегодовой эвапотранспирации в березовых (а), лиственничных (б), сосновых (в) и темнохвойных (г) насаждениях по экорегионам I-

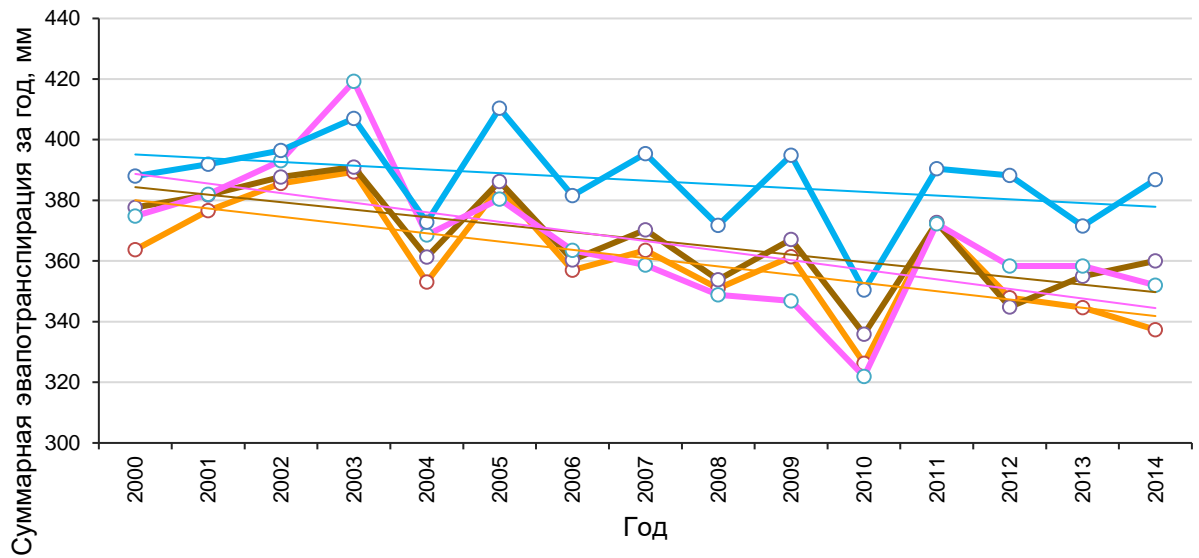
Отличаясь от пихты и ели более высокими значениями биомассы и особенностями кроны, кедровые деревья способны перехватывать и испарять больше осадков (как твердых, так и жидких), что в итоге отражается на общей величине эвапотранспирации. Абсолютные максимумы эвапотранспирации во всех трех экорегионах 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 экорегионов имел место в 2010 году, лето которого было самым холодным за период наших наблюдений.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что разброс и вариабельность эвапотранспирации даже для одного класса растительного покрова по годам прежде всего зависит от погодных условий конкретного года, а по экорегионам – от ландшафтной структуры этих регионов, включая особенности климата. Как известно из литературы, на эвапотранспирацию текущего года влияет режим увлажнения предыдущего года, запасы влаги в почво-грунтах [10].

4.4 Изменчивость суммарного испарения по годам

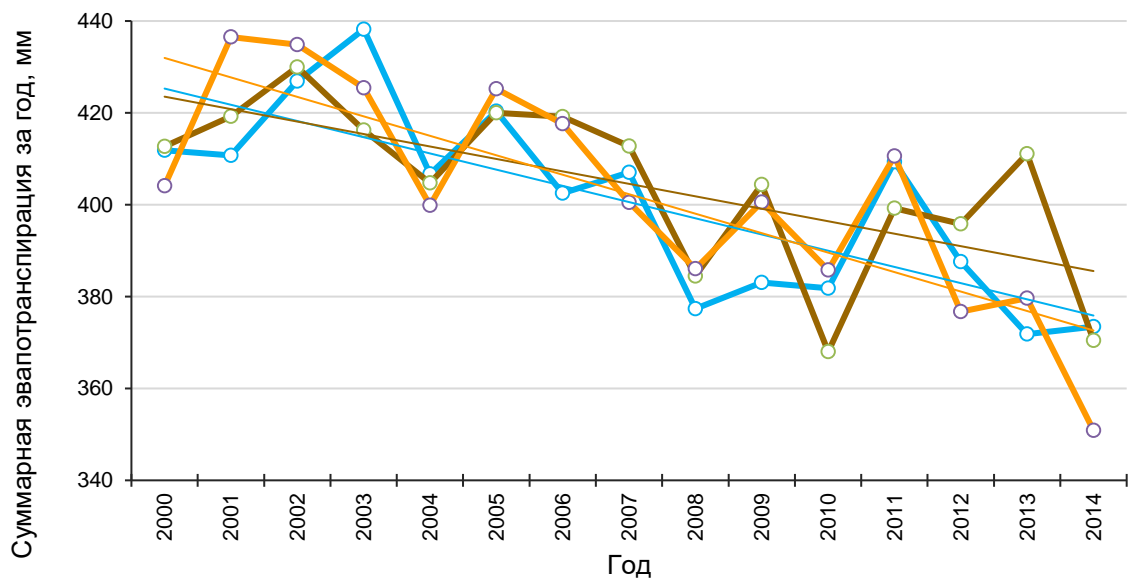
Анализируя изменение суммарного испарения лесогидрологических комплексов по годам была замечена одна особенность динамики этого показателя – тенденция снижения годовой эвапотранспирации с 2000 по 2014 год. Тенденция прослеживается как на уровне экорегионов, так и в целом для исследуемой территории (рисунок 21). Полученные тренды могут быть объяснимы с позиций изменения климатических условий, т.к. масштабные рубки в бассейне Подкаменной Тунгуски в эти годы не проводились. Анализ трендов температуры воздуха и осадков по реперным метеостанциям в бассейне реки Подкаменная Тунгуска (рисунок 22) показывает повышение среднегодовой температуры воздуха при некотором снижении суммы годовых

осадков, т.е. полученные результаты подтверждают, что тенденция к снижению эвапотранспирации обусловлена изменением климата в регионе.



- сосновые насаждения
- лиственничные насаждения
- темнохвойные насаждения
- березовые насаждения
- Тренд (сосновые насаждения)
- Тренд (лиственничные насаждения)
- Тренд (темнохвойные насаждения)
- Тренд (березовые насаждения)

а)



- березовые насаждения
- сосновые насаждения
- лиственничные насаждения
- Тренд (березовые насаждения)
- Тренд (лиственничные насаждения)
- Тренд (сосновые насаждения)

б)

Рисунок 21 – Динамика годовой эвапотранспирации по лесогидрологическим комплексам в регионах I (а) и IV (б)

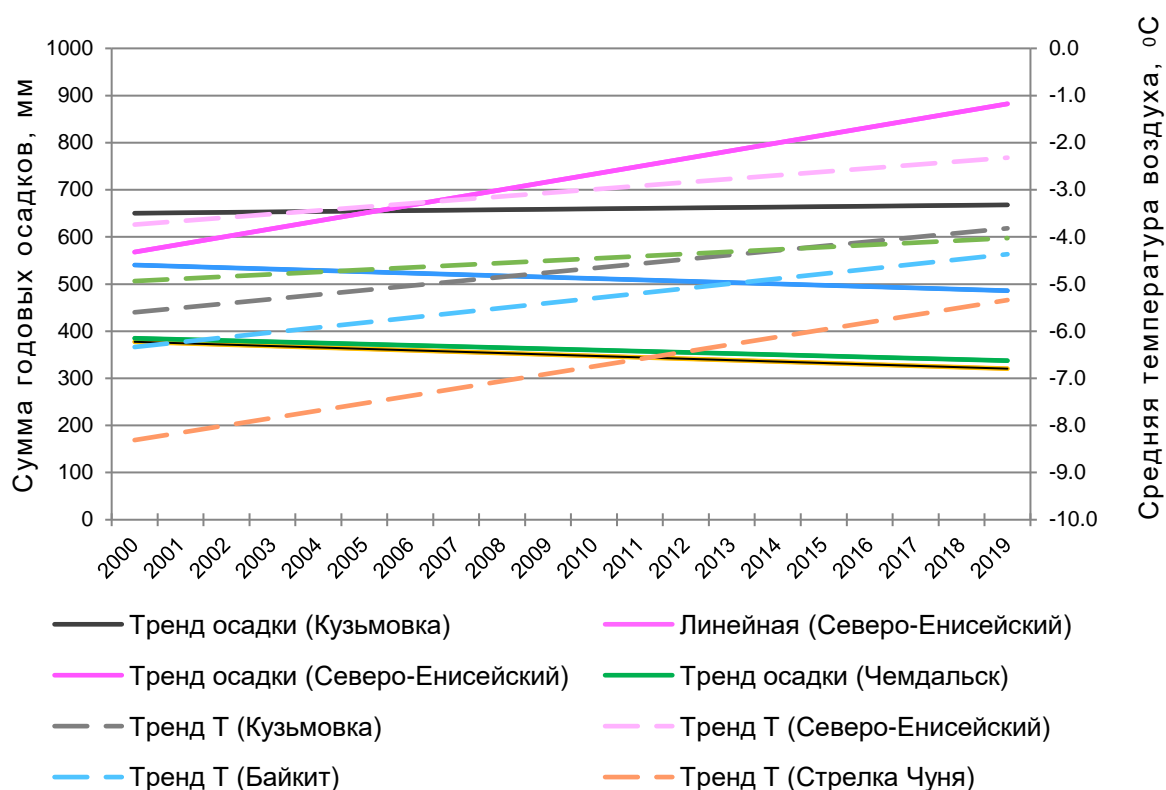


Рисунок 22 – Тренды среднегодовой температуры воздуха и годовых осадков на реперных метеостанциях исследуемого района

4.5 Вклад лесогидрологических комплексов в формирование стока реки Подкаменная Тунгуска

Чтобы показать вклад каждого лесогидрологического комплекса в формирование стока реки Подкаменная Тунгуска мы рассчитали объем влаги, которую каждый комплекс расходует на испарение и определили его вклад (в %) в суммарное испарение данного экорегиона (рисунок 24). Полученные диаграммы показывают, что в I экорегионе основной вклад в суммарное испарение делают сосновые и темнохвойные насаждения (более 60%), тогда как во II экорегионе возрастает роль лиственных лесов (38%) при значительном участии темнохвойных насаждений (29% от суммарного испарения составляют темнохвойные и 16% - смешанные леса со значительным участием темнохвойных пород). В III экорегионе почти 80% от суммарного испарения

приходится на лиственничные леса, к тому же здесь значительный вклад (13%) вносит лесогидрологический комплекс с березовыми лесами.

В IV экорегионе наряду с лиственничными лесами в суммарное испарение значительный вклад вносят сосновые (21%) и смешанные (16%) с участием темнохвойных пород. Для IV экорегиона, который значительно отличается по географическим условиям и структуре лесного покрова от третьего и четвертого экорегионов, характерно то, что значительный вклад в суммарное испарение вносят березовые леса (18%), но основная доля приходится на лиственничные и темнохвойные насаждения (рисунок 24).

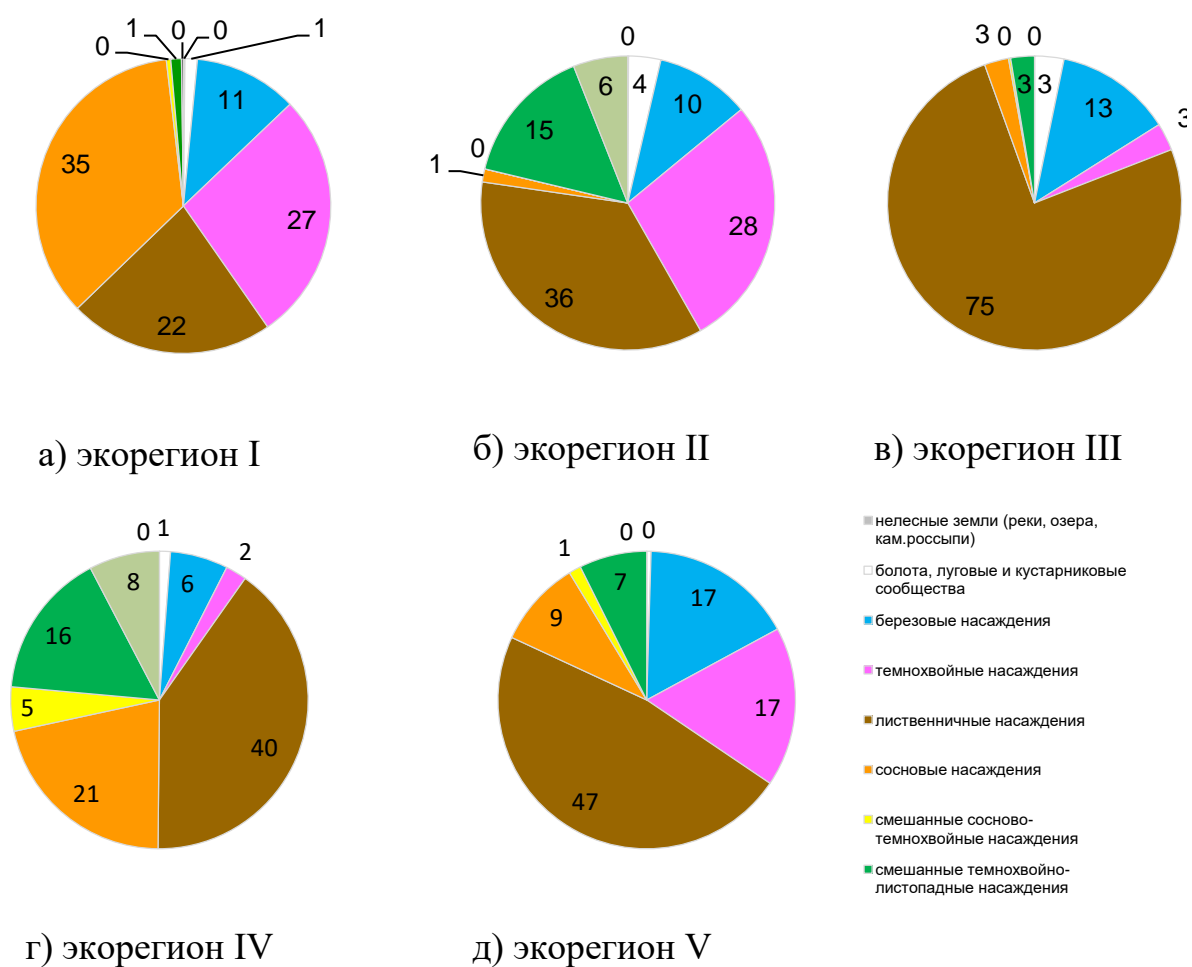


Рисунок 24 – Вклад (%) лесогидрологических комплексов в суммарное испарение по экорегионам I-V

4.6 Анализ испарения лесогидрологических комплексов и климатических данных CRU

Бассейн реки Подкаменная Тунгуска 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. Что касается суммарного испарения, различия средних значений эвапотранспирации между регионами составляет от 20 до 50 мм, причем максимальные различия чаще всего наблюдаются в годы с экстремальными погодными условиями. Гидрологическая эффективность 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 трансформации ими осадков: подсчитали отношение суммарного испарения 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 TS 4.06 для определения средневзвешенных величин осадков для наших экорегионов.

Анализ полученных данных показал, что в I и II экорегионах лесные экосистемы тратят на испарение 54-60% от суммы осадков, в III экорегионе влаги испаряется более 70% от суммарного увлажнения. В IV и V экорегионах лесные экосистемы всех выделенных комплексов тратят на испарение гораздо больше - до 90%. Такое соотношение испарения к осадкам возможно является завышенным из-за погрешностей при оценке осадков на данной территории вследствие низкого пространственного разрешения климатических данных CRU TS 4.06. В перспективе эти расчеты будут продублированы, используя метод водного баланса и моделирования осадков на основе данных метеостанций и собственных данных по результатам снегомерных съемок [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационной работы проведен анализ показателей эвапотранспирации в связи с изменением лесного покрова и климатических условий. Для расчета значений эвапотранспирации был разработан скрипт в облачной системе Google Earth Engine, что значительно позволило сократить время обработки данных.

Дифференциация лесной растительности в бассейне реки Подкаменная Тунгуска на основе карт растительности, почв, ЦМР и базы данных MOD16 позволили получить количественные показатели эвапотранспирации для каждого выделенного лесогидрологического комплекса. Эти показатели характеризуются значительной изменчивостью как в пространстве, так и во времени, это прежде всего связано с пространственно-временной вариабельностью климатических показателей. Разброс и вариабельность эвапотранспирации даже для одного класса растительного покрова по годам прежде всего зависит от погодных условий конкретного года, а по экорегионам – от ландшафтной структуры этих регионов, включая особенности климата.

С позиций вклада каждого лесогидрологического комплекса в суммарное испарение исследуемой территории было выделено пять экорегионов, различающихся между собой не только по показателям эвапотранспирации, но и по структуре суммарного испарения. Отмеченные различия среднегодовых величин суммарного испарения между экорегионами, особенно в летние месяцы, определяются разнообразием породного состава лесов и их лесоводственно-биометрических показателей.

Анализ полученных данных позволил установить связь между эвапотранспирацией и биометрическими характеристиками насаждений. Наиболее высокие значения эвапотранспирации наблюдаются в районах, характеризующихся наибольшим разнообразием по породному составу.

Таким образом, результаты исследований показали, что база данных MOD16 может быть использована для расчета эвапотранспирации, как важной составляющей водного баланса, и дальнейшей оценки гидрологического режима бассейнов рек.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Антипов, А. Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории / А. Н. Антипов, В. Н. Фёдоров, Новосибирск: Изд-во СО РАН - 2000. - 255 с.

2 Балакай, Г. Т. К проблеме автоматизации процесса расчетов эвапотранспирации риса / Г.Т. Балакай, Р. Е. Юркова, Л. М. Докучаева, В. И. Ольгаренко, Т. С. Пономаренко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. - № 1(33) - 2019. - С. 72–91. DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-72-91

3 Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Д.В. Ершов, А.С. Исаев, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, И.А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2011. - Т.8, № 4 - С. 285-302.

4 Барталев, С.А. Карта наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation. Проект Global Land Cover 2000. Информационная система TerraNorte / С.А. Барталев, А.С. Белвард, Д.В. Ершов, А.С. Исаев. - Институт космических исследований РАН. - 2004. (<http://terranorte.iki.rssi.ru>).

5 Бондарик, Н. Л. Сравнение методов определения среднемноголетней величины испарения с леса / Н.Л. Бондарик, Ю.В. Карпечко // Метеорология и гидрология. - 1999. - № 9. - С. 98–105.

6 Будаговский, А. И. Испарение почвенной влаги / А.И. Будаговский. М.: Наука - 1964. - 244 с.

7 Будаговский, А.И. Полуэмпирическая теория транспирации и водного режима растительного покрова / А.И. Будаговский // Водные ресурсы. - 1989. - № 6. - С. 5-17.

8 Будыко, М. И. Тепловой баланс земной поверхности / М.И. Будыко - Л.: Гидрометеиздат - 1956. - 255 с.

- 9 Будыко, М. И. Климат и жизнь / М.И. Будыко. Л.: Гидрометеиздат - 1971. - 472 с.
- 10 Буренина, Т.А. Пространственно-временная динамика эвапотранспирации в бассейне реки Подкаменной Тунгуски / Т.А. Буренина, И.В. Данилова, Н.А. Михеева // Сибирский экологический журнал. - 2022. - №5. - С.507-519.
- 11 Виноградов, Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока (опыт критического анализа) / Ю.Б. Виноградов - Л.: Гидрометеиздат - 1988. - 310 с.
- 12 Воронков, Н.А. Гидрологическая и метеорологическая роль насаждений разного породного состава / Н.А. Воронков // Лесоведение. - 1976. - № 1. - С. 3-10.
- 13 Гвоздецкий, Н.А. Физическая география СССР. Азиатская часть. Н.А. Гвоздецкий, Н.И. Михайлов - М.: Изд-во «Высшая школа» - 1987. - 448 с.
- 14 Доброхов, В.В. Пространственное распределение составляющих энергетического баланса растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли и стандартных метеорологических измерений /В.В. Доброхов. Автореферат на соискание ученой степени кандидата биологических наук - Санкт-Петербург - 2019. - 21 с.
- 15 Константинов, А.Р. Испарение в природе / А.Р. Константинов - Л.: Гидрометеиздат - 1968. - 532 с.
- 16 Краткая географическая энциклопедия. - М. Том 1 - 1960.
- 17 Коротков, И.А. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР / И.А. Коротков // Углерод в экосистемах лесов и болот России. - Красноярск: ИЛ СОРАН - 1994. - С.29-47.
- 18 Исследование возможностей применения материалов дистанционного зондирования при государственной инвентаризации лесов: отчет о НИР / ЗАО «СОВЗОНД». – М.: 2008. – 260 с.
- 19 Лебедев, А.В. Гидрологическая роль горных лесов Сибири / А.В. Лебедев - Новосибирск: Наука - 1982. - 235 с.

20 Лесные экосистемы Енисейского меридиана (под ред. Ф.И. Плешикова) - Новосибирск: Изд-во СО РАН - 2002. - 357 с.

21 Молчанов, А.А. Гидрологическая роль леса / А.А. Молчанов - М.: Изд-во АН СССР - 1960. - 487 с.

22 Молчанов, А.А. Влияние леса на окружающую среду / А.А. Молчанов - М.: Изд-во Акад. наук СССР - 1973. - 352 с.

23 Музылев, Е.Л. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона / Е.Л. Музылев, З.П. Старцева, А.М. Зейлигер, О.С. Ермолаева, Е.В. Волкова, Е.В. Василенко, А.И. Осипов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2019. - Т. 16, №3 - С. 44–60.

24 Пенман, Х.Л. Растение и влага / Х.Л. Пенман - Л.: Гидрометеиздат - 1968. - 161 с.

25 Ранькова, Э.Я. Температура приземного воздуха / Э.Я. Ранькова, Г.В. Груза, Э.В. Рочева, О.Ф. Самохина // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации - Москва - 2014. - С. 37–72.

26 Расулова, А.М. Расчет эвапотранспирации на территории бассейна Ладожского озера / А.М. Русалова // Серия Лимнология и океанология - Труды Карельского научного центра РАН - 2021. - №9 - С. 146-156.

27 Раунер, Ю.Л. Тепловой баланс растительного покрова / Ю.Л. Раунер - Л.: Гидрометеиздат - 1972. - 206 с.

28 Справочник по климату СССР. Выпуск 21. Часть IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров // Гидрометеорологическое изд-во - Л. - 1969.

29 Федоров, В.Н. Растительность как индикатор речного стока / В.Н. Федоров // Структура и динамика речного стока горных регионов. - Новосибирск: Наука - 1987. - С. 74-108.

30 Федоров, С. Ф. Исследование суммарного испарения с различных по составу и возрасту лесных насаждений / С.В. Марунич, А.С. Федоров // Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот. - М.: Наука - 1990. - С. 41–53.

31 Что такое ArcGIS? <https://resources.arcgis.com/ru/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

32 Allen, R.G. Satellite - based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) / R.G. Allen, M. Tasumi, A. Morse, R. Trezza, J.L. Wright, W. Bastiaanssen, C.W. Robison // Applications. J. Irrig. Drain Eng. ASCE - 2007. - Vol. 133. - P. 395–406.

33 ArcGIS Spatial Analyst. Руководство пользователя. – 2001 – 216 с.

34 ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model) – 2011. - <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/> (дата обращения 28.04.2022 г.)

35 Abatzoglou, J.T. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015 / J.T. Abatzoglou, S.Z. Dobrowski, S.A. Parks, K.C. Hegewisch - Scientific Data 5:170191 - 2018 - [doi:10.1038/sdata.2017.191](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191)

36 Bartalev, S.A. The Land Cover Map for Northern Eurasia for the Year 2000. A.S. Belward, D.V. Erchov, A.S. Isaev, E. Bartholom, V. Gond, P. Vogt, F. Achard, A.M. Zubkov, D. Mollicone, I.Yu. Savin, S. Fritz, G. Repinan, A. Hartley. - GLC2000 database, European Commission Joint Research Centre - 2003. (<http://www.gvm.jrc.it/glc2000>).

37 Bastiaanssen, W. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) / W. Bastiaanssen, M. Menenti, R. Feddes, A. Holtslag // J. Hydrol. - 1998. - Vol. 212. - P. 198-212.

38 Bastiaanssen, W. The Surface EnergyBalance Algorithm for Land (SeBAL): Part 2 validation / W. Bastiaanssen, H. Pelgrum, J. Wang, Y. Ma, J. Moreno, G.J. Roerink, T. van der Wal // J. Hydrol. – 1998. – Vol. 212–213. – P. 213–229.

39 Bichet, A. Causes for decadal variations of wind speed over land: sensitivity studies with a global climate model / A. Bichet, M. Wild, D. Folini, C. Schar // *Geophys. Res. Lett.* - 2012. - Vol. 39. - L11701. Doi:10.1029/2012GL051685.

40 Chen, Y. How multiple factors control evapotranspiration in North America evergreen needle leaf forests / Y. Chen, Y. Xue, Y. Hu // *Science of the Total Environment* - 2018. - Vol. 622. - P. 1217-1224.

41 Donohue, R. J. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model / R.J. Donohue, M.L. Roderick, T.R. McVicar // *Journal of Hydrology* - 2012. - P. 35–50.

42 Ettala, M. Evapotranspiration from a *Salix aquatica* plantation at a sanitary landfill / M. Ettala // *Aqua-Fennica* - 1988. - Vol. 18, N 1. - P. 3–14.

43 Fu, Q. Changes in terrestrial aridity for the period 850–2080 from the Community Earth System Model / Q. Fu, L. Lin, J. Huang, // *J. Geophys. Res. Atmos.* - 2016. - Vol. 121. - P. 2857–2873. Doi:10.1002/2015JD024075.

44 Huntington, T.G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis / T.G. Huntington // *Journal of Hydrology*. - 2006. - Vol. 319. - P. 83–95. DOI:10.1016/j.jhydrol.2005.07.003

45 Gibson, L. Review: Estimating evapotranspiration using remote sensing and the Surface Energy Balance System—A South African perspective / L. Gibson, C. Jarman, Z. Su, F. Eckardt // *WaterSA*. – 2013. – Vol. 39. N 4. - P. 477-484.

46 Glatthorn, J. Effects of forest management on stand leaf area: Comparing beech production and primeval forests in Slovakia / J. Glatthorn, V. Pichler, M. Hauck, Ch. Leuschner // *Forest Ecology and Management*. - 2017. - V. 389. - P. 76–85.

47 Klaassen, W. Evaporation from Rain-Wetted Forest in relation to Canopy Wetness, Canopy Cover, and Net Radiation / W. Klaassen // *Water Resources Research*. - 2001. - Vol. 37, N 12. - P. 3227-3236.

48 Kumala, T. Application of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) for spatial analysis of evapotranspiration in a commercial oil palm

plantation in Jambi Province, Indonesia / T. Kumala, J. Bunga, C. Stiegler, A. Knohl // Proceedings of the SPIE. - 2019. - Vol. 11372, id. 1137212 - 8 pp. doi: 10.1117/12.2540161.

49 Qiaozhen, Mu. Running and Numerical Terradynamic Simulation Group (2014): MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product MOD16A2 Collection 5 / Mu. Qiaozhen, Z. Maosheng, W. Steven.

50 Leng, P. A method for deriving all-sky evapotranspiration from the synergistic use of remotely sensed images and meteorological data / P. Leng, Z. Li., S. Duan, R.L. Tang // Journal of Geophysical Research-Atmosphere. - 2017. - Vol. 122. - P. 13263-13277.

51 Li, Z. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data / Z. Li, R. Tang, Z. Wan, Y. Bi, C. Zhou, B. Tang et al. // Sensors. – 2009. – Vol. 9. – № 5. – P. 3801–3853.

52 McNally, A. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications / A. McNally, K. Arsenault, S. Kumar, S. Shukla, P. Peterson, S. Wang, C. Funk, C.D. Peters-Lidard, J. Verdin // Scientific Data, 4, 170012. - 2017.

53 Monteith, J. L. Evaporation and environment. In The State and Movement of Water in Living Organisms / J. Monteith // XIXth Symposium Soc. for Exp. Biol. Swansea: Cambridge Univ. Press. - 1965. - P. 205–234.

54 Morton, F.I. What are the limits of forest evaporation? / F.I. Morton // Journal of Hydrology. - 1984. - Vol. 74 . - N 3-7. - P. 373-398.

55 Mu, Q. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data / Q. Mu, F. Heinsch, M. Zhao, S. Running // Remote Sensing of Environment. - 2007. - Vol. 111, N 4. - P. 519-536.

56 Mu, Q. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm / Q. Mu, M. Zhao, S. Running // Remote Sensing of Environment. - 2011. - Vol. 115, № 8. - P. 1781-1800.

57 Mu, Q. Algorithm Theoretical Basis Document: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Collection 5 / Q. Mu, M. Zhao, S. Running. - NASA Headquarters. - 2013. - No. 20.

58 Muthuwatta, L. Assessment of water availability and consumption in the Karkheh River basin, Iran using remote sensing and geostatistics / L. Muthuwatta, M. Ahmad, M. Bos, T. Rientjes // *Water Resources Management*. – 2010. – Vol. 24. – No 3. – P. 459–484.

59 Ramos, J.G. Elevation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of NE Spain / J. Ramos, C. Cratchley, J. Kay, M. Casterad, A. Martínez-Cob, R. Dominguez // *Agricultural water management*. – 2009. – Vol. 96. – No 4. – P. 638–652.

60 Rozhkov, V.A. GIS-model of the forest cover dynamics in landscapes of Russia / V.A. Rozhkov // *Productivity and resistance of forest soils. III International forest soil science conference*. - Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS - 2009. - P. 24-27.

61 Rwasoka, D.T. Estimation of actual evapotranspiration using the surface energy balance system (SEBS) algorithm in the Upper Manyame catchment in Zimbabwe / D. Rwasoka, W. Gumindoga, J. Gwenzi // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. –2011. – Vol. 36. – No 14–15. – P. 736–746.

62 Su, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes / Z. Su // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* - 2002. - № 6 - P. 85–100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>, 2002.

63 Su, H. Modeling evapotranspiration during SMACEX: Comparing two approaches for local-and regional-scale prediction / H. Su, M. McCabe, E. Wood, Z. Su, J. Prueger // *Journal of Hydrometeorology*. – 2005. – Vol. 6. – No 6. – P. 910–922.

64 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 3 arc second (90 meter) SRTM DTED (r) Level 1 – 2002. – Access mode: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (дата обращения 15.04.2022 г.).

65 Running, S. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). Version 2.2 / S.W. Running, Mu. Qiaozhen, Z. Maosheng, M. Alvaro. - 2019. - p. 38.

66 Tang, R. A sinter comparison of three remote sensing-based energy balance models using Large Aperture Scintillometer measurements over a wheat-corn production region / R. Tang, Z. Li, Y. Jia, C. Li, X. Sun, W. Kustas // Remote Sensing of Environment. - 2011. - Vol. 115. - No 12. - P. 3187-3202

67 Waters R. SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land Idaho Implementation / R. Waters, R. Allen, W. Bastiaanssen, M. Tasumi, R. Trezza, W. Bastiaanssen // Advanced Training and Users Manual. - 2002. - p. 97.

68 Yang, D. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis / D. Yang, F. Sun, Z. Liu, Z. Cong, G. Ni G // Water Resour Res. - 2007. - Vol. 43. - W04426.

69 Yiping, H. Cumulative forest disturbances decrease runoff in two boreal-forested watersheds of the northern interior of British Columbia, Canada / Y. Yiping, X. Wei, V. Margot et.al. // Journal of Hydrology. - 2021. - Vol. 605.

70 Zhang, L. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance / L. Zhang, W. Dawes, G. Walker // Tech. Rep. 99/12. Coop. Res. Cent. for Catchment Hydrol., Canberra, ACT, Australia. - 1999. - 42 p.

71 Zhang, L. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale / L. Zhang, W. Dawes, G. Walker // Water resources research. - 2001. - Vol. 37, N 3. - P. 701-708.

72 Zhang, L. Estimating effects of plantation expansion and climate variability on streamflow for catchments in Australia / L. Zhang, Z. Fangfang, C. Yunn, N. Renee // Water resources research. - 2011. - Vol. 47. - W12539.

73 Zhang, Y. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components / Y. Zhang, J. Peña-Arancibia, T. McVicar, F. Chiew, and et.al. // Sci. Rep. - 2011. - №6 - W19124. [doi:10.1038/srep19124](https://doi.org/10.1038/srep19124)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Базы данных по эвапотранспирации

Таблица – Базы данных по эвапотранспирации, представленные в каталоге облачной платформы Google Earth Engine

№	Тип продукта	Полный временной ряд	Пространственное разрешение	Временное разрешение	Измеряемые компоненты	Единицы измерения
1	PML_V2 0.1.7: Coupled Evapotranspiration and Gross Primary Product (GPP)	2000-2020	500 м.	8 дней	GPP - первичная валовая продукция	г/м ² /день
					Es - транспирация растительностью	мм/день
					Es - испарение с почвы	мм/день
					Ei - испарение перехваченных осадков растительностью	мм/день
					ET_water - фактическое испарение с водоема, льда, снега, рассчитанной e по формуле Пенмана.	мм/сутки
3	TerraClimate: Monthly Climate and Climatic Water Balance for Global Terrestrial Surfaces, University of Idaho	1958-2022	4638,8 м	1 месяц	aet - фактическая эвапотранспирация, (модель водного баланса)	мм
					def - дефицит климатической воды, полученный с использованием одномерной модели водного баланса почвы	
					pet - эталонная эвапотранспирация (модель пенмана-монтейта)	
					pr - сумма осадков	
					ro -сток, полученный с использованием одномерной модели водного баланса почвы.	
					soil - влажность почвы, полученная с использованием одномерной модели водного баланса почвы	
swe - эквивалент снеговой воды, полученный с использованием одномерной модели почвенного водного баланса.						

					tmmn - мин температура	°С
					tmmx - максимальная температура	°С
					var - давление газа, vpd - дефицит давления газа	кПа
					vs - скорость ветра на 10 м.	м/с
					pdsi- индекс суровости засухи палмера	индекс
4	MOD16A2.00 6: Terra Net Evapotranspiration	2001-2023	500 м	8 дней	ET - общая эвапотранспирация	кг/м ²
					LE - средний поток скрытого тепла	вт/м ²
					PET - суммарная потенциальная эвапотранспирация	кг/м ²
					PLE - средний потенциальный поток скрытого тепла	вт/м ²
					ET_QC - флаги контроля качества эвапотранспирации	
5	FLDAS: Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System	2000-2014	1 км		Evap_tavg - эвапотранспирация	кг/м ²
		2000-2014	1 км		Qs_tavg - Ливневый поверхностный сток	кг/м ²
		1982-2023	11132 м		Qsb_tavg - Базовый сток-подземный сток	кг/м ²
					Rainf_f_tavg - Суммарная норма осадков	кг/м ²
					SnowCover_inst - Доля снежного покрова	
					SnowDepth_inst - глубина снега	м
					SoilMoi00_10-40cm_tavg - влажность почв (см под землей)	объемная доля
					SoilTemp00_10-40cm_tavg - температура почвы (см под землей)	к
					SWE_inst - эквивалент снеговой воды	кг/м ²
		и др.				
6	ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis	1963-2023	11132 м	месяц	evaporation_from_bare_soil_sum - количество испарения с голой почвы	м водный эквивалент
					evaporation_from_open_water_surfaces_except_oceans_sum - количество испарения с поверхности водохранилищ, озер, исключая океаны.	м водный эквивалент
					evaporation_from_the_top_of_canopy_sum - количество	м водный

					испарения с крон деревьев	эквивалент
					evaporation_from_vegetation_transpiration_sum - сумма испарения от транспирации растительности	М водный эквивалент
					potential_evaporation_sum - потенциальное испарение	М
					snow_evaporation_sum - испарение со снега	М
					и др.	
7	WAPOR Actual Evapotranspiration and Interception	2009-2023	248,2 м	декада	L1_AETI_D - фактическая эвапотранспирация и перехват осадков	мм
8	Reprocessed GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System	1948-2014, 2000 - 2023 (GLDAS-2.1) 2003-2022 (GLDAS-2.2)	27830 м	день	Evap_tavg - эвапотранспирация	кг/м ²
					Esoil_tavg - прямая эвапотранспирация от голой почвы	кг/м ²
					CanopInt_inst - транспирация	кг/м ²
					AvgSurfT_inst - средняя температура поверхности	К
					PotEvap_tavg - потенциальная скорость испарения	Вт/м ²
					Rainf_tavg - интенсивность осадков в виде дождя	кг/м ² /с
					SnowDepth_inst - глубина снега	м
					и др.	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Карта категорий земель и легенда к ней

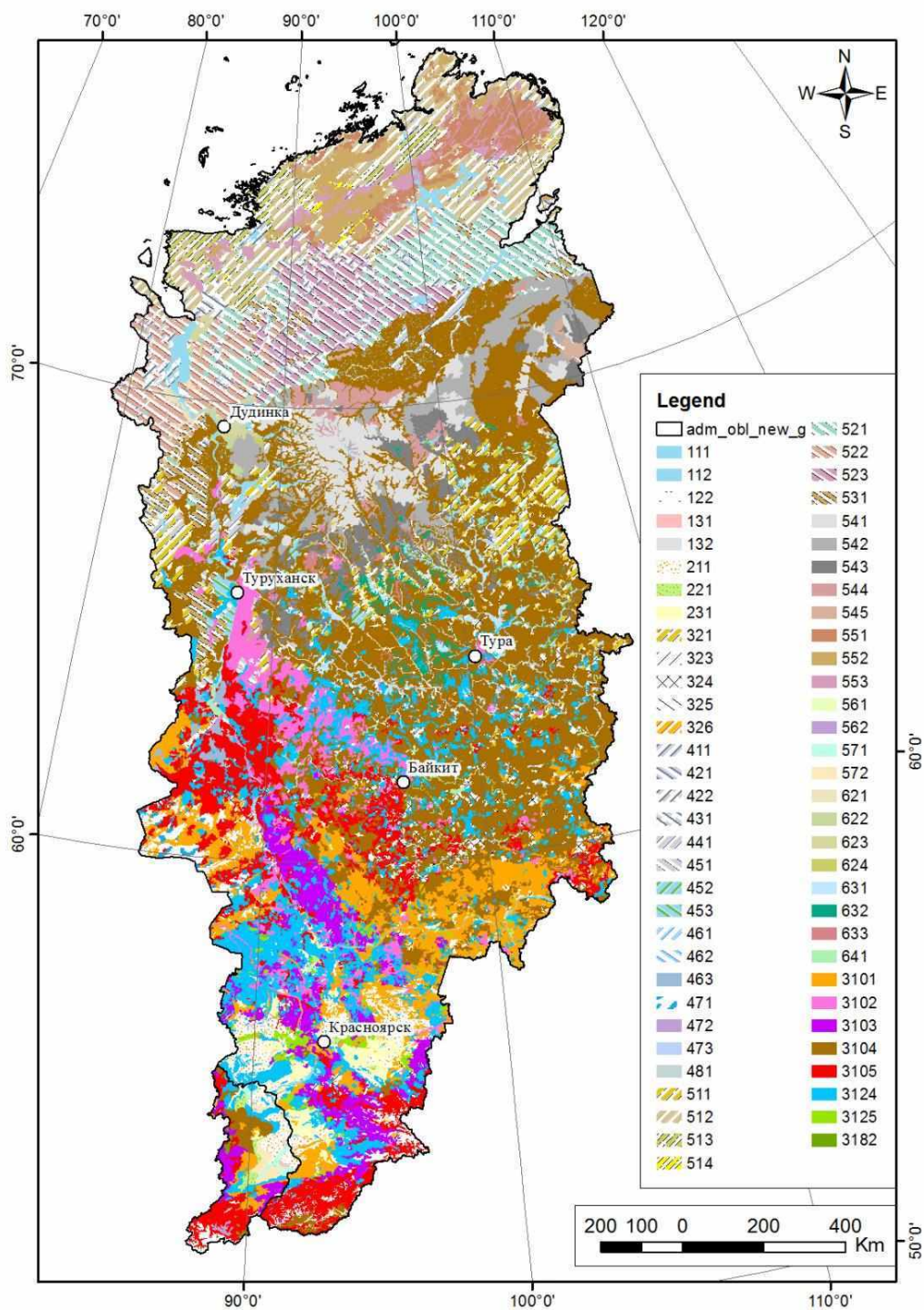


Рисунок - Карта категорий земель

Таблица – Легенда к карте категорий земель

1. Непродуктивные земли	11. Воды	111. Реки 112. Озера
	12. Земли без почвенного покрова	121. Пески 122. Каменистые россыпи и крутосклоны 123. Ледники и снежники
	13. Инфраструктура	131. Индустрия 132. Населенные пункты 133. Дороги и продуктопроводы
2. Сельскохозяйственные земли	21. Пахотные земли	211. Пахотные земли
	22. (Культивируемые) пастбища и сенокосы	221. Культивируемые пастбища и сенокосы
	23. Многолетняя растительность	231. Многолетняя растительность
3. Лесные земли	31. Покрытые лесом	3101. Сосна 3102. Ель 3103. Пихта 3104. Лиственница 3105. Кедр 3124. Береза 3125. Осина 3131. Тополь 3132. Ива 3106. Кедровый стланик 3182. Кустарниковые березы 3190. Кустарниковые ивы
	32. Не покрытые	321. Редины естественные 322. Пустыри и прогалины описываются как травяные или кустарниковые сообщества 323. Вырубки 324. Гари 325. Погибшие насаждения 326. Несомкнувшиеся лесные культуры
4. Болота	41. Арктические тундры	411. Полигональные осоково-гипновые, пушицево-гипновые и некомплексные осоково-моховые болота
	42. Типичные (субарктические) тундры	421. Валиково-полигональные комплексные болота (комплекс ерниково-ивково- (<i>Salix reptans</i>) кустарничковых ассоциаций по валикам с осоково-моховыми мочажинами, трещинами-канавками и озерами) 422. Болота в долинах рек (комплекс ерниково-ивово- (<i>Salix glauca</i>) осоково-сфагново-моховых ассоциаций с осоково-моховыми мочажинами и озерами)
	43. Южные тундры	431. Плоскобугристо-мочажинный лишайниковый комплекс: кустарниково-кустарничково- лишайниково-моховые ассоциации по буграм и осоково-моховые мочажины 432. Кустарниково-кустарничково-осоково-моховые трещиновато-полигональные болота

	44. Лесотундра	441. Бугристо-мочажинные и грядово-мочажинные болотные комплексы (березково-кустарничково-зеленомошные ассоциации по буграм и грядам и осоково-сфагновые в мочажинах)
	45. Северная тайга	451. Плоскобугристые комплексные болота (ерниково-кустарничково-лишайниково-зеленомошные ассоциации на буграх и осоково-моховые в мочажинах) 452. Крупнобугристые комплексные болота (кустарничково-кустарничково-лишайниково-зеленомошные ассоциации на буграх и осоково-сфагново-зеленомошные мочажинны) 453. Кустарничково-сфагновые и травяно-моховые рядово-мочажинные аапа-болота
	46. Средняя тайга	461. Сфагновые (сосново)-кустарничковые олиготрофные выпуклые болота 462. Крупнобугристые болота долин 463. Бугристо-озерные болота террас водоразделов
	47. Южная тайга	471. Сосново-сфагновые и сфагновые олиготрофные выпуклые болота со вторичными озерами и мезо-евтрофными грядово-мочажинными топиями 472. Разнотипные травяные, осоковые, гипновые, кустарничково-сфагновые болота долин рек. 473. Разнотипные троговые, сфагновые, кустарничковые, сфагново-кустарничковые, зеленомошные болота террас.
	48. Подтайга	481. Лесные мезотрофные и евтрофные болота 482. Осоково-гипновые и травяные евтрофные болота
	49. Лесостепь	491. Травяные болота 492. Болотно-лугово-лесная растительность долин рек
5. Травы	51. Арктические тундры	511. Каменистые тундры с фрагментами лишайниково-моховых и моховых сообществ 512. Кустарничково-лишайниково-моховые полигонально-пятнистые тундры 513. Осоково-дриадово-моховые тундры 514. Тундры в долинах рек: злаково-осоково-моховые 515. Приморские засоленные злаково-осоковые заболоченные луга
	52. Типичные тундры	521. Кустарничково-осоково-моховые тундры 522. Кустарничково-моховые пятнистые тундры 523. Кустарничково-осоково-пушицево-моховые кочкарные тундры 524. Сообщества разнотравно-злаковых лугов и моховых тундр долин рек
	53. Южные тундры	531. Кустарничково-осоково-моховые, лишайниково-моховые кустарничковые (ивняковые, ерниковые, ольховниковые) тундры 532. Лугово-кустарничковые сообщества долин рек

	54. Горные тундры, субарктические	541. Горные тундры каменистые (разреженная растительность каменистых россыпей с фрагментами алекторий, кустарничков и накипными лишайниками) 542. Горные тундры кустарничково-мохово-лишайниковые 543. Горные тундры кустарниковые кустарничково-лишайниково-зеленомошные 544. Горные тундры пятнистые лишайниково-моховые, кустарничково-моховые 545. Горные тундры кочкарные осоково-пушицево-зеленомошные
	55. Горные тундры арктические	551. Разреженные мохово-лишайниковые группировки среди камней и каменистых россыпей 552. Каменистые пятнистые арктические пустыни с фрагментами кустарничково-моховых сообществ и дриадово-моховые тундры на каменистом субстрате 553. Арктические горные тундры кустарничково-моховые пятнистые
	56. Лесная зона	561. (Равнинные) луга 562. Горные тундры лесной зоны
	57. Лесостепи и степи	571. Разнотравно-злаковые луговые степи и остепненные луга 572. Разнотравно-дерновиннозлаковые степи
	58. Альпийские луга	
6. Кустарники	61. Южные тундры	611. Лугово-кустарниковые сообщества долин рек
	62. Южные тундры и лесотундра	621. Лугово-кустарниковые сообщества долин рек 622. Ивняки с ерником, ольховники кустарничково-лишайниковые, кустарничково-зеленомошные 623. Ольховники злаково-разнотравно-моховые 624. Ивняки злаково-разнотравные в сочетании с разнотравно-злаковыми и разнотравно-моховыми сообществами 625. Ольховники подгольцовые кустарничково-лишайниковые, кустарничково-зеленомошные на каменистом субстрате 626. Ерники кустарничково-зеленомошные
	63. Северная и редкостойная тайга	631. Лугово-кустарниковые сообщества долин рек 632. Ольховники подгольцовые кустарничково-лишайниковые, кустарничково-зеленомошные на каменистом субстрате 633. Подгольцовые лиственничные и березовые криволесья кустарничково-зеленомошные с душекией
	644. Средняя и южная тайга	641. Кустарниково-лесная растительность долин рек (ольхово-ивняково-березовая)
	645. Субальпийские	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Код для расчета эвапотранспирации по MOD 16

```
//Эвапотранспирация по MOD 16
//var shape = ee.FeatureCollection("users/tiv80/P_TUNGUSKA");
//print(table);
print(table4);
//выбирает ET по дате
var ETsum = ee.ImageCollection('MODIS/NTSG/MOD16A2/105')
    .filter(ee.Filter.date('2000-01-01', '2021-12-31'))
    .select('ET');
//Limit the collection
var first = ETsum.sort('system:time_start', true).limit(4);
var last = ETsum.sort('system:time_start', false).limit(10);
//свойсва прорисвки ET
var ETVis = {
  min: 0.0,
  max: 300.0,
  palette:
    ['a50000', 'ff4f1a', 'f1e342', 'c7ef1f', '05fff3', '1707ff', 'd90bff'],
};
// create function (ET*1000)
var ET27 = function(image) {
  var ETmult = ee.Image(0).expression(
    'ET*0.1', {
      ET: image.select('ET')
    });
  return image.addBands(ETmult.rename('ETmult'));
};
```

```

//apply function over collection
var mergedETmult = ETsum.map(ET27);

//paramtrs for ET graph
var ETChart = ui.Chart.image.seriesByRegion({
  imageCollection: mergedETmult ,
  regions: table4,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  band: 'ETmult',
  scale: 200,
  xProperty: 'system:time_start',
  seriesProperty: 'label'
});
ETChart.setChartType('ScatterChart');
ETChart.setOptions({
  title: 'ETmult',
  vAxis: {title: 'ETmult'},
  lineWidth: 1,
  pointSize: 4,
  series: {
    0: {color: 'red'},
    1: {color: 'green'},
    2: {color: 'blue'},
  }
});
print(ETChart);
Map.setCenter(96.0, 60.0, 5);
Map.addLayer(table4, {color: 'red'}, 'feature');
//Map.addLayer(ETsum, ETVis, 'Evapotranspiration');

```